

TOSCOGEO

geothermal energy

Società del gruppo



GRAZIELLA  
green power

magma ENERGY ITALIA

# RETE GEOTERMICA TOSCANA

C/O TOSCOGEO S.R.L.

VIA ERNESTO ROSSI N° 9 - 52100, AREZZO

TEL. 0575 32641 - FAX. 0575 326464

## Impianto Geotermico Pilota Castelnuovo

PROGETTO DEFINITIVO



00	06/11/2015	Emissione	Magma Energy Italia S.r.l.	Magma Energy Italia S.r.l.	Rete Geotermica Toscana
REV.	DATA	OGGETTO	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

PROGETTISTA:

**magma** ENERGY ITALIA

MAGMA ENERGY ITALIA SRL  
Via E. Rossi n. 9 - Arezzo 52100  
Tel 0575 32641 - Fax 0575 326457  
magmaenergy@legalmail.it  
C.F. 06059240488

TITOLO:

**STUDIO E MONITORAGGIO DELLA SISMICITA'**

NOTE:

TOSCO GEO SRL  
VIA E. ROSSI N.9 - AREZZO 52100  
TEL 0575 32641 - FAX 0575 326464  
C.F. e P.IVA 06142590485  
Capitale sociale sottoscritto e versato € 12.000.00  
Società soggetta a direzione e coordinamento di  
Graziella Green Power spa - via E. Rossi, 9 - Arezzo 52100  
C.F. e P.IVA 02033840519

IDENTIFICAZIONE ELABORATO

C	A	S	0	2	D	E	A	M	R	0	0	7
ARGOMENTO	PROGETTO	LIVELLO	AREA	TIPO	PROGRESSIVO							

FOGLIO:

1 di 26

FORMATO:

A4

Questo documento contiene informazioni di proprietà della RETE GEOTERMICA TOSCANA e può essere utilizzato esclusivamente dal destinatario in relazione alle finalità per le quali è stato ricevuto. È vietata qualunque forma di riproduzione o divulgazione senza l'esplicito consenso della RETE GEOTERMICA TOSCANA.

INDICE

1. Introduzione .....	3
2. La sismicità storica e strumentale della zona .....	4
<b>2.1. Pericolosità sismica .....</b>	<b>4</b>
2.1.1. La pericolosità Sismica dell’area di interesse .....	4
2.1.2. Stime di pericolosità con l’approccio standard .....	4
2.1.3. La Pericolosità Sismica nella zona del Comune di Castelnuovo Val di Cecina .....	6
2.1.4. Stime di pericolosità con l’approccio macrosismico .....	7
<b>2.2. Analisi di disaggregazione .....</b>	<b>8</b>
2.2.1. Analisi di disaggregazione con l’approccio standard .....	8
2.2.2. Analisi di disaggregazione con l’approccio macrosismico .....	9
<b>2.3. La Sismicità Naturale .....</b>	<b>11</b>
2.3.1. I cataloghi storici (1900-1980) .....	12
2.3.2. I cataloghi strumentali (1980-2012) .....	13
3. Stime degli effetti della iniezione di fluidi sulla sismicità nei sistemi geotermici	17
4. Monitoraggio della microsismicità.....	19
<b>4.1. Progetto della rete di monitoraggio .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2. Sistema di gestione ed allerta.....</b>	<b>23</b>
5. Conclusioni .....	25

## 1. Introduzione

I sistemi geotermici sono generalmente localizzati in aree tettonicamente attive e caratterizzati dalla presenza di moderata sismicità che si manifesta con microterremoti di medio-bassa magnitudo ( $< 2$ ) per la preesistenza di sistemi di fratture. Durante le fasi di coltivazione di un campo geotermico, le operazioni estrazione e reiniezione di fluidi geotermici possono, in alcuni casi, modificare lo stato tensionale delle strutture geologiche e provocare microterremoti.

Le modalità con le quali si manifesta la sismicità sono diverse in funzione del tipo di campo geotermico:

- nei sistemi idrotermali la sismicità è correlata alla circolazione dei fluidi nei sistemi di fratture permeabili già presenti interno delle rocce serbatoio;
- nei sistemi EGS (Engineered Geothermal System) la sismicità si manifesta per effetto della creazione di fratturazione idraulica nelle rocce serbatoio indotta dall’ iniezione di fluidi ad elevata pressione.

Le aree geotermiche di Larderello-Travale e del Monte Amiata sono sistemi idrotermali e sono stati oggetto di monitoraggio microsismico sin dalla fine degli anni '70 (Batini et al. 1985 , Batini et al. 1980 ). Tali aree sono collocate in una fascia caratterizzata da un’evoluzione tettonica e geodinamica complessa. Si tratta di un’area sottoposta a stress tensionali che si manifestano con il rilascio di energia lungo zone di debolezza strutturale con eventi sismici molto frequenti, relativamente superficiali (entro i 10 km di profondità), ma di moderata intensità con magnitudo usualmente inferiori a 2.6, che solo in un caso hanno raggiunto il valore di 3.8 nell’area di Larderello e di 4,1 nell’area del Monte Amiata.

La sismicità rilevata nelle aree geotermiche Toscane non sembra mostrare relazioni causa-effetto con le attività di perforazione in senso stretto, ma in qualche caso è correlabile alle operazioni di reiniezione dei fluidi. In particolare è stato osservato come la frequenza degli eventi sismici aumenti all’aumentare della quantità di fluido reiniettato nel sottosuolo mentre la magnitudo degli eventi tenda a diminuire, lasciando ipotizzare che il costante ma moderato rilascio di energia attraverso microterremoti, impedisca l’accumulo di grandi tensioni e riduca il numero di terremoti di magnitudo elevata. Tuttavia le informazioni su come effettivamente siano state gestite le operazioni di reiniezione non sono pubbliche, ed è quindi impossibile mettere in relazione diretta le portate di reiniezione con eventuali “cluster” di eventi.

Il permesso pilota “Castelnuovo” si trova sul margine Nord dell’area geotermica idrotermale di Larderello-Travale, adiacente alle Concessioni di Coltivazione Geotermiche vigenti e ricade all’interno di una zona sismicamente attiva, come dimostrato dai dati simologici raccolti sia in epoca storica che negli ultimi decenni con reti di rilevamento della microsismicità.

Al fine di monitorare con maggior livello di dettaglio l’attività sismica naturale all’interno del permesso e nelle zone limitrofe, verrà installata una idonea rete di rilevamento costituita da sismometri distribuiti su tutta l’area del permesso Castelnuovo, opportunamente integrata con la rete di sismometri già installati nell’adiacente Permesso di Ricerca Mensano. La rete sismica sarà quindi in grado di rilevare eventuali variazioni della sismicità eventualmente legate alle attività previste per la realizzazione del progetto industriale ed inoltre consentirà di acquisire i dati necessari a ricostruire un modello tridimensionale della velocità e, quindi, delle proprietà meccaniche che caratterizzano le strutture geologiche del sistema geotermico.



## **2. La sismicità storica e strumentale della zona**

### **2.1. Pericolosità sismica**

#### **2.1.1. La pericolosità Sismica dell’area di interesse**

Lo studio della pericolosità sismica è finalizzato in prima istanza alla definizione del massimo scuotimento sismico ragionevolmente atteso (ovvero caratterizzato da una fissata probabilità di eccedenza) in un intervallo di esposizione pre-determinato. In questa sede, tuttavia, questo tipo di indagine è inteso come preliminare rispetto allo studio, più importante, legato all’identificazione del tipo di terremoto rappresentativo di questo scuotimento massimo in termini di una generica coppia magnitudo/distanza (p.es., McGuire, 1994), ovvero una classe di eventi storicamente determinati (Pace et al., 2012; Albarello, 2012). La trattazione si articola quindi in due parti. Nella prima viene descritta la pericolosità sismica della zona così come viene ricavata dalle analisi standard del tipo Cornell-McGuire disponibili per il territorio italiano (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>) e da analisi condotte mediante un approccio alternativo di tipo macrosismico ovvero basato sull’analisi delle storie sismiche di sito (Albarello e Mucciarelli, 2002). Nella seconda parte, queste analisi sono considerate come base per studi di disaggregazione, condotti rispettivamente con un approccio standard (Barani et al., 2009) con il metodo Cornell-McGuire e con un approccio di tipo differente (Albarello, 2012) a partire dall’approccio macrosismico.

#### **2.1.2. Stime di pericolosità con l’approccio standard**

Stime di pericolosità dedotte con un approccio standard sono state eseguite per tutto il territorio nazionale dall’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia nel 2007 (Stucchi et al., 2007). La base metodologica è quella definita inizialmente da Cornell (1968) ed implementata nel codice di calcolo SEISRISK III (Bender e Perkins, 1987). Fondamentalmente il protocollo di calcolo è basato su tre elementi informativi: la geometria delle zone sismogeniche (intese come aree caratterizzate da una uniforme probabilità di generazione di terremoti alle diverse magnitudo con specifici tassi di occorrenza), un catalogo sismico epicentrale (in questo caso il catalogo CPTI04 di Camassi e Stucchi del 1997) e di leggi di attenuazione dello scuotimento sismico valide per il territorio nazionale. Per i dettagli della metodologia si rimanda a Stucchi et al. (2011) e si segnala che, nonostante le possibili criticità del metodo nella sua declinazione italiana (p.es., Mucciarelli et al., 2008; Albarello e D’Amico 2008; Mucciarelli e Albarello, 2012), si tratta di una procedura di stima del tutto in linea con gli standard internazionali. La zona di Castelnuovo Val di Cecina, così come più nel dettaglio quella del P.R. Castelnuovo, si trova all’interno della zona sismogenica 921 (Fig. 1) indicata da Meletti et al. (2008) come caratterizzata da sismicità con meccanismi di faglia di tipo normale con eventi sismici sporadici di magnitudo intermedia.

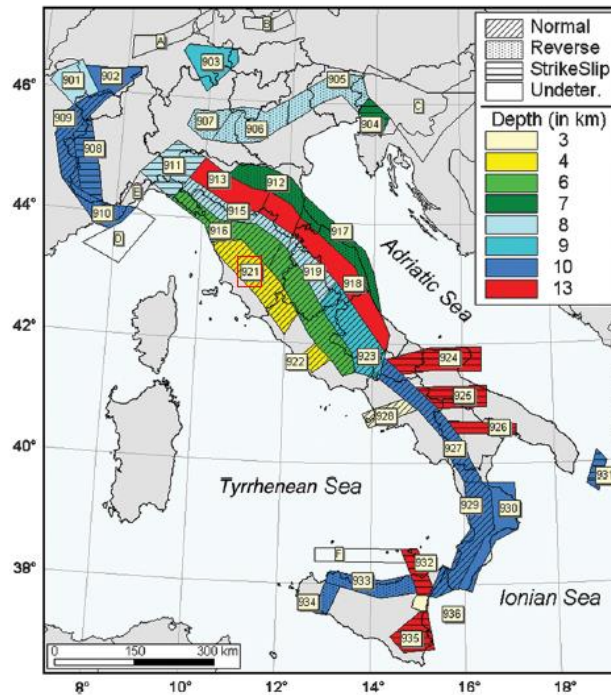


Fig. 1. Zone sismogeniche utilizzate per la stima della pericolosità sismica secondo l'approccio standard (Stucchi et al., 2011).

La stima della pericolosità legata ai terremoti è un tema di rilievo, di conseguenza la conoscenza approfondita e la corretta collocazione delle faglie capaci assume un ruolo chiave per la mitigazione del rischio. A questo scopo, il Servizio Geologico d'Italia - ISPRA ha sviluppato il progetto ITHACA (ITaly HAZard from CAPable faults), un database creato per la raccolta e la consultazione di tutte le informazioni disponibili riguardo le strutture tettoniche attive in Italia, con particolare attenzione ai processi tettonici che potrebbero generare rischi naturali. Il progetto si occupa in modo particolare delle faglie capaci, definite come faglie che potenzialmente possono creare deformazione in superficie. Si riporta la carta delle faglie capaci relative al centro Italia (Fig. 2).

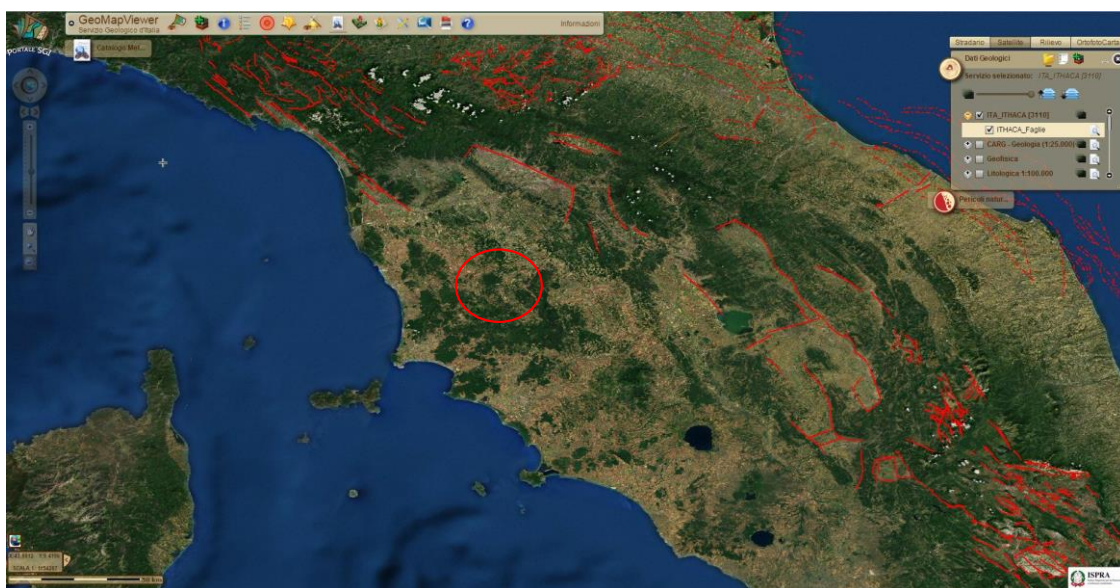


Fig. 2. Mappa delle faglie capaci e localizzazione della zona in esame (da ITHACA).

E' facilmente visibile come nella zona di interesse (cerchio rosso), non sia segnalata la presenza di faglie in grado di generare sismi associabili a effetti catastrofici (e.g. i terremoti del 1693 in Sicilia orientale, 1783 in Calabria, 1805 a Bojano, 1908 a Messina e 1915 nel Fucino).

### 2.1.3. La Pericolosità Sismica nella zona del Comune di Castelnuovo Val di Cecina

Secondo la classificazione sismica della Regione Toscana, approvata con Delib.G.R. n. 421 del 26/05/2014 pubblicata sul BURT Parte Seconda n. 22 del 04.06.2014, che aggiorna l'allegato 1 della deliberazione GRT n. 878 dell'8 ottobre 2012, recante "Aggiornamento della classificazione sismica regionale in attuazione dell'O.P.C.M. 3519 /2006 ed ai sensi del D.M. 14.01.2008 - Revoca della DGRT 431/2006", il territorio comunale di Castelnuovo Val di Cecina rientra nella Zona 3 di sismicità, zona a sismicità bassa.

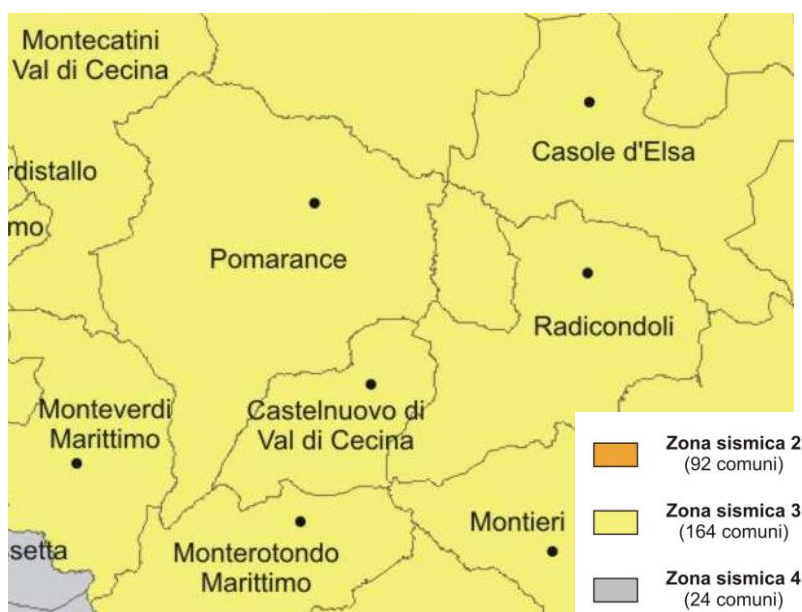


Fig. 3. Estratto della carta dalla zonazione sismica della Regione Toscana conforme alla DGRT 241/2014

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), nel 2004, ha predisposto la mappa di pericolosità di riferimento che è stata adottata con l'O.P.C.M. n.3519 del 28 aprile 2006 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi della medesima zona". La pericolosità sismica è determinata sulla base del picco di massima accelerazione orizzontale del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e in base al suo valore le Regioni individuano la zona sismica cui appartiene un determinato comune.

Secondo l'allegato A "Pericolosità sismica" del D.M. 14 gennaio 2008 recante "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni", emanato dal Ministero delle Infrastrutture e pubblicato su G.U. S.O. n. 29 del 04 febbraio 2008, integrato dal D.M. del 06 maggio 2008, pubblicato su G.U. n. 153 del 02 luglio 2008, è previsto che l'azione sismica di riferimento per la progettazione sia definita sulla base dei valori di pericolosità sismica dall'OPCM n. 3519/2006. Le relative stime di pericolosità espresse in termini del massimo picco di accelerazione sismica orizzontale (PGA) del moto del suolo caratterizzato da una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. Per il territorio del Comune di Castelnuovo Val di Cecina tali valori sono riportati nel sito WEB dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>). La zona interessata dal progetto ha valori di accelerazione orizzontale di picco (PGA) che variano tra 0.100 e 0.125 m/s<sup>2</sup>.

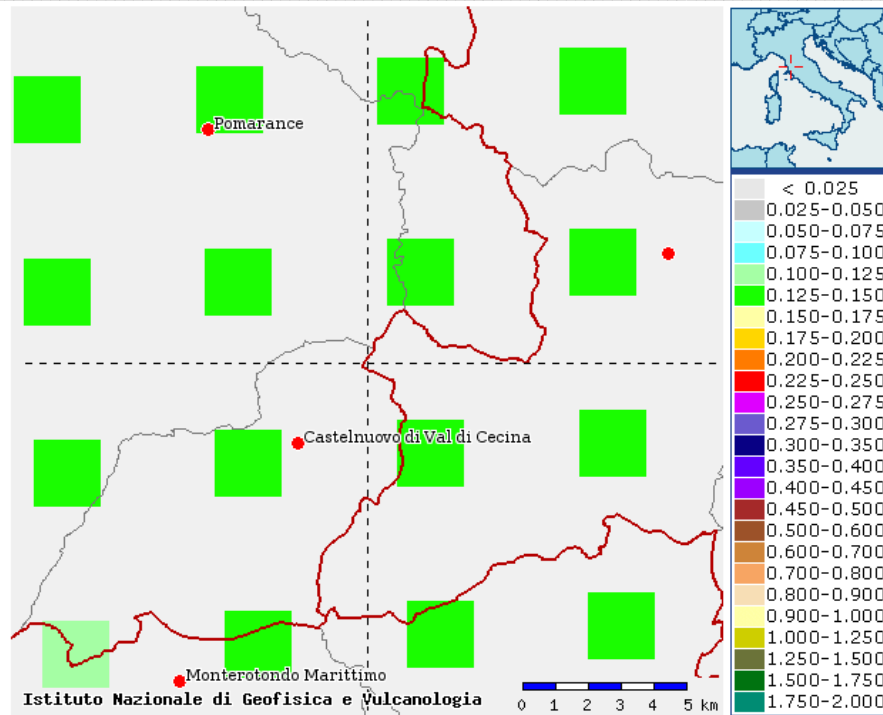


Fig. 4. Valori dell'accelerazione massima orizzontale (PGA) caratterizzata da una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per le due aree oggetto di studio e indicate dai riquadri rossi. I colori pieni indicano i valori di PGA nei diversi punti in valori della percentuale di accelerazione di gravità secondo la scala cromatica a destra

#### 2.1.4. Stime di pericolosità con l'approccio macrosismico

Stime di pericolosità alternative alle precedenti sono state effettuate a partire da un approccio differente basato sull'analisi statistica diretta dei dati macrosismici relativi agli effetti dei danni osservati nelle aree di studio nei secoli passati. Questa procedura di analisi è stata utilizzata in diverse occasioni sull'intero territorio nazionale (p.es. Albarello et al., 2002) e rappresenta un'utile base di confronto per la validazione delle stime fornite con l'approccio standard (p.es. Mucciarelli et al., 2008). L'approccio è descritto in dettaglio in Albarello e Mucciarelli (2002) ed è stato qui utilizzato nella versione implementata nel codice di calcolo SASHA (D'Amico e Albarello, 2008). In questo approccio, la pericolosità sismica è calcolata attraverso una apposita procedura statistica utilizzando le informazioni macrosismiche disponibili per ciascuna parte dell'area di studio. A questo scopo sono state qui utilizzate due compilazioni. La prima è la versione più recente del Database macrosismico italiano (DBMI11) recentemente pubblicato a cura di Locati et al. (2011), che contiene le informazioni macrosismiche relative agli effetti di tutti i terremoti documentati sull'intero territorio nazionale per l'intervallo 1000-2006. La seconda compilazione è il catalogo epicentrale dei terremoti italiani (CPTI11), pubblicato a cura di Rovida et al. nel 2011 e contenente le informazioni epicentrali relative ai terremoti italiani con magnitudo momento ( $M_w$ ) almeno pari a 4.5 (anche se questa soglia è stata abbassata in alcune aree quali quelle vulcaniche) nell'intervallo fra il 1000 e il 2006. Scopo della procedura è quello di determinare per ciascuna delle località oggetto di studio la massima Intensità caratterizzata da una probabilità di eccedenza almeno pari al 10% in 50 anni. Mediante opportune operazioni di conversione, è anche possibile ottenere stime di pericolosità in termini di PGA, direttamente confrontabili con quelle dedotte mediante l'approccio di sito. I risultati di quest'analisi, dopo aver ampliato l'area di studio oltre i confini della zona di realizzazione dei pozzi sono riportati in Tab. 1. Nelle prime tre colonne sono riportate: la



denominazione della località e le relative coordinate geografiche. Nella colonna indicata con “I\_ref” è riportato il valore dell’Intensità massima caratterizzata da una probabilità di eccedenza non superiore al 10%. Nella colonna indicata con “N\_felt” è riportato il numero di dati di risentimento documentati alla località indicata (0 indica che la storia locale è stata ricostruita per via indiretta da dati epicentrali) mentre la colonna indicata con I\_max riporta la massima intensità documentata al sito. Infine, l’ultima colonna riporta i valori di pericolosità in termini di PGA espressa in frazioni dell’accelerazione di gravità.

Tab. 1 – Risultati stime di pericolosità

Località	Loc_Lat	Loc_Lon	I_ref	N_felt	I_max	PGA (g)
Quartaia	43.3840	11.0854	VII	0	0	0.167
Il Piano	43.3653	11.0562	VII	0	0	0.164
Ponsano	43.3614	10.0562	VII	0	0	0.123
Mensano	43.3014	11.0546	VII	0	0	0.156
Monteguidi	43.2977	11.0052	VII	0	0	0.157
Radicondoli	43.2614	11.0435	VII	13	7.5	0.156
Pievescola	43.3106	11.1316	VII	0	0	0.171
Campiglia	43.4138	11.0787	VII	0	0	0.178
Castel S.Gimignano	43.4052	11.0214	VII	0	0	0.187
Colle di Val D'elsa	43.4199	11.1269	VII	23	6.5	0.176
Casole D'Elsa	43.3410	11.0480	VII	6	5	0.152
Montecastelli	43.2617	10.9528	VII	0	0	0.135

Dato che l’analisi è essenzialmente basata sulle storie sismiche di sito senza nessun riferimento ad ipotesi riguardo alla geometria delle zone sismogeniche, la qualità dei risultati dipende largamente dalla disponibilità locale di queste informazioni. Come si vede, storie sismiche significative (con almeno 5 risentimenti documentati), esistono solo per Radicondoli, Colle Val D’Elsa e Casole D’Elsa. Si vede tuttavia che le intensità di riferimento delle altre località comprese nelle aree corrispondenti non si discostano da quelle delle località per cui si hanno maggiori informazioni dettagliate. Si vede come l’area di interesse, sia caratterizzata da valori di intensità di riferimento pari al VII grado MCS. I valori di PGA per l’area di studio risultano generalmente compresi fra 0.15g e 0.18g e risultano compatibili (anche se mediamente più elevati) con le valutazioni ottenute mediante l’approccio standard.

## 2.2. Analisi di disaggregazione

### 2.2.1. Analisi di disaggregazione con l’approccio standard

L’analisi di pericolosità condotta con l’approccio standard da Stucchi et al. (2011) permette anche di identificare la coppia magnitudo-distanza rappresentativa della pericolosità sismica locale. La procedura è detta di “disaggregazione” ed è stata in questo caso condotta con l’approccio descritto da Barani et al. (2009). Il risultato relativo all’area che copre il P.R. Castelnuovo è riportato nella Fig. 5. Come si vede il ruolo maggiore è giocato da eventi vicini (5-10 Km) con magnitudo  $M_w$  comprese fra 4.5 e 5. Considerando l’intera distribuzione dei contributi, la coppia magnitudo-distanza media risulta 4.8  $M_w$ / 7.7 Km. Essendo frutto di un’analisi condotta a partire da un modello di calcolo basato sull’assunzione che la sismicità sia distribuita uniformemente all’interno delle zone sismogeniche, su questa base non è possibile identificare nessun singolo terremoto rappresentativo di questa combinazione magnitudo-distanza effettivamente avvenuto nell’area di studio.



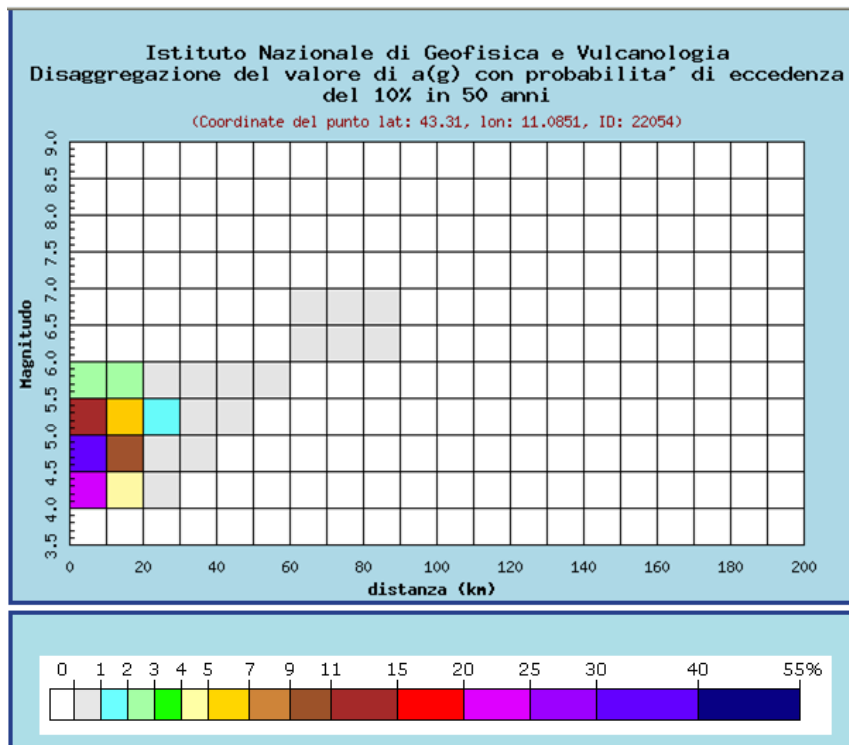


Fig. 5. Grafico di disaggregazione per la zona coperta dal P.R. Castelnuovo secondo l'approccio standard. I colori sono rappresentativi (secondo la scala cromatica in basso), dell'importanza per la pericolosità sismica locale di eventi con la magnitudo riportata in ordinata e la distanza in ascissa

### 2.2.2. Analisi di disaggregazione con l'approccio macrosismico

A partire dai risultati dell'approccio macrosismico è possibile eseguire una analisi di disaggregazione analoga a quella relativa all'approccio standard (Albarellò, 2012) ma con un' importante differenza. Anche in questo caso è infatti possibile identificare le coppie combinazioni magnitudo-distanza maggiormente responsabili della pericolosità sismica locale ma, dato che non si fa riferimento zone sismogeniche definite a priori, è anche possibile identificare i singoli terremoti del passato più pericolosi per il sito di studio. In Tab. 2 sono riportati i risultati di questa analisi per due località rappresentative dell'area di Castelnuovo.

Come si vede, in entrambe le località, il ruolo maggiore viene svolto da eventi vicini (entro 10 Km) ma con magnitudo relativamente elevata (5.5-6.0). Inoltre gli eventi posti nell'intervallo di distanza 0-20 km e di magnitudo 5.0-6.0 rappresentano quasi la metà del contributo totale.

Nella Tab. 3 è riportato il contributo di ciascun terremoto alla pericolosità corrispondente all'intensità di riferimento (VII MCS per entrambe le località). Questi risultati mostrano quindi l'importanza di terremoti con magnitudo maggiore di quelli indicati dall'analisi standard per quest'area.

Tab. 2 - Risultati dell’analisi di disaggregazione macrosismica per le due località più rappresentative dell’area del P.R. Castelnuovo. Per ciascuna località e coppia magnitudo (colonne) e distanza (righe), è riportato il ruolo relativo (in frazioni di unità). I valori di distanza e magnitudo si riferiscono al punto centrale di intervalli di ampiezza 10 km per la distanza e 0.5 in valori di magnitudo. Maggiore è il valore riportato, maggiore è l’importanza della coppia relativa. La cella bordata in nero indica la coppia con il contributo maggiore, mentre i bordi tratteggiati indicano contributi almeno pari al 10%.

Casole D’Elsa								Mensano							
Dis/Mw	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	Dis/Mw	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25
5	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	5	0.00	0.01	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	15	0.00	0.04	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	25	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	35	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
45	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	45	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00
55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00
95	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	95	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
105	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	105	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
115	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	115	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
135	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	135	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
145	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	145	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
155	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	155	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
165	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	165	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
175	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	175	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
185	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	185	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
195	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	195	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tab. 3 - Eventi sismici che contribuiscono alla pericolosità sismica di Castelnuovo per l’intensità di riferimento (VII MCS). Per ciascun evento viene riportata la data di occorrenza, la localizzazione epicentrale, la distanza dal sito (in km) e il contributo percentuale. In rosso è indicato il contributo maggiore mentre il giallo sono individuati quelli superiori al 10%

Anno	Mese	Giorno	Lat	Lon	Mw	Dist	Contributo
1279	4	30	43.093	12.872	6.31	149	0.01
1320	12	16	43.321	11.328	5.14	22	0.01
1352	12	25	43.469	12.127	6.44	89	0.10
1361	12	27	43.321	11.328	4.93	22	0.00
1389	10	18	43.527	12.299	5.99	104	0.01
1414	8	7	43.271	11.118	5.61	6	0.34
1558	4	13	43.457	11.564	5.82	45	0.05
1661	3	22	44.021	11.898	6.09	105	0.01
1703	1	14	42.708	13.071	6.74	177	0.03
1724	12	11	43.206	11.008	5.14	11	0.16
1741	10	1	43.321	11.328	5.14	22	0.01
1751	7	27	43.225	12.739	6.25	137	0.01
1781	6	3	43.597	12.512	6.42	122	0.03
1804	10	18	43.453	11.105	4.93	17	0.03
1832	1	13	42.98	12.605	6.33	131	0.01
1846	8	14	43.47	10.562	5.91	44	0.12
1848	5	12	43.283	11.167	4.72	9	0.01
1909	8	25	43.15	11.403	5.37	33	0.01
1909	8	25	43.133	11.2	5.17	22	0.01
1916	8	2	43.3	11	4.51	4	0.01

Come si vede dai valori in Tab. 3, quasi il 50% del contributo proviene da due soli eventi piuttosto antichi (1414 e 1724) relativamente vicini (entro 15 Km) con magnitudo Mw stimate (nel catalogo CPTI11) di 5.6 e 5.1 rispettivamente. Nel caso del terremoto del 1414, si tratta di un terremoto con effetti documentati a Radicondoli, Belforte e Montingegnoli (Castelli et al., 1996) ma complessivamente mal definito in termini di area di danneggiamento e quindi di localizzazione epicentrale. Migliore è la documentazione relativa al terremoto del 1724 con danni documentati a Travale ed altre località (Castelli et

al., 1996). In Fig. 6 è riportata la collocazione epicentrale dei due eventi del 1414 e del 1724 così riportata dal catalogo CPTI11.

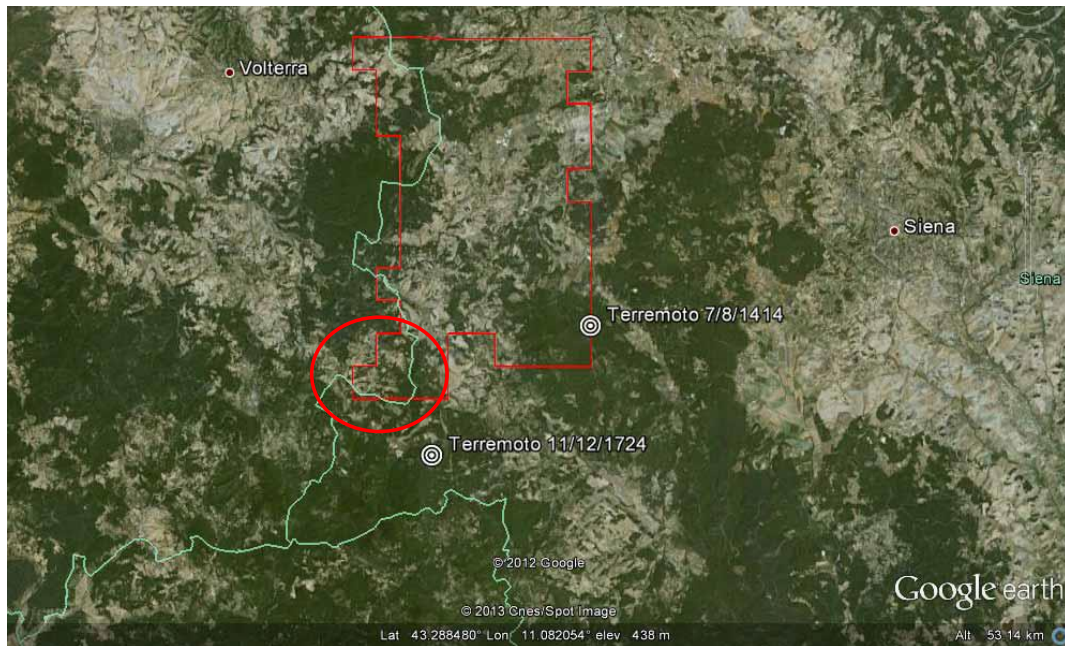


Fig. 6. Localizzazione epicentrale dei due eventi vicini più rappresentativi per la pericolosità sismica locale nell’area di Castelnuovo (Fonte catalogo CPTI11)

### 2.3.La Sismicità Naturale

Le analisi di pericolosità considerate nella prima parte di questa trattazione sono essenzialmente basate sulla ricostruzione della sismicità storica per l’area di studio. Infatti, anche se l’approccio standard contiene informazioni sulla sismotettonica dell’area (attraverso la definizione della geometria della zone sismogeniche) che sono parzialmente basate anche sull’analisi della sismicità recente, la maggior parte delle informazioni utilizzata proviene da fonti documentarie relative ai terremoti maggiori, ovvero quelli responsabili di danni ai manufatti. Risulta quindi utile tentare una analisi della sismicità più recente misurata dalle stazioni sismiche disponibili per l’area.

Questa analisi è però resa piuttosto difficile per l’eterogeneità dei cataloghi sismici strumentali disponibili per l’area di studio. Questa eterogeneità riguarda le modalità di calcolo dei parametri epicentrali (soprattutto la magnitudo), la densità delle informazioni effettivamente disponibili e il relativo livello di completezza. Altre difficoltà sono inoltre legate al basso numero di stazioni della rete sismica nazionale effettivamente collocate nell’area di studio che viene tradizionalmente considerata a bassa sismicità e quindi di minore interesse per gli Enti preposti al monitoraggio della sismicità.

Complessivamente sono considerate sei compilazioni di dati strumentali relativamente ad un’area compresa all’interno di 50 km dal Comune di Castelnuovo Val di Cecina che includono l’area di studio. I cataloghi considerati sono:

- PFG (Postpischl, 1985) : Dati storici e strumentali fino al 1980
- CPTI11 (Rovida et al.2011) : Dati storici e strumentali ( $M_w > 4.5$ ) fino al 2006
- CSI 1.1 (Castello et al., 2006): Dati strumentali 1981-2002
- INGV - Bollettino sismico : 2003-2005 (dal 15 Maggio 2003)
- ISIDe (ISIDe WG, 2010): 2005 (16 Maggio)- 2012 (Agosto)



Si tratta di compilazioni assai differenti. Le prime due includono dati strumentali accanto ad una maggiore quantità di dati di tipo documentario (dati macrosismici). Nel caso del catalogo PFG non sono state poste soglie inferiori per le magnitudo considerate includendo tutti i terremoti noti all’epoca. Nel caso del catalogo CPTI11, invece sono considerate solo le scosse principali responsabili di possibili danni (magnitudo maggiore di 4.5). Nei due casi le magnitudo considerate sono differenti (magnitudo locale  $M_l$  nel caso del PFG e magnitudo momento  $M_w$  nel caso del CPTI11). Inoltre, in nessuno dei due casi sono state svolte analisi volte ad omogeneizzare le procedure di calcolo delle localizzazioni epicentrali. Infine solo nel caso del catalogo PFG sono indicate le profondità ipocentrali (peraltro senza nessuna indicazione di qualità). Nel presente studio sono stati considerati solo gli eventi potenzialmente frutto (almeno parzialmente) di determinazioni strumentali ovvero quelli nell’intervallo 1900-1980.

Gli altri tre cataloghi sono di tipo interamente strumentale. Questi coprono intervalli temporali diversi e si integrano fra loro. Tuttavia va tenuto presente che la modalità di calcolo della magnitudo presenta delle diversità significative nelle tre compilazioni, il che ha suggerito di tenere separate le diverse banche dati senza fare nessun tentativo di combinazione.

Per i dettagli relativi alle modalità di compilazione dei diversi cataloghi qui considerati si rimanda agli articoli citati.

### 2.3.1. I cataloghi storici (1900-1980)

In Fig. 7 è mostrato il numero cumulativo di eventi riportati nel catalogo PFG per il periodo 1900-1980.

Nel complesso sono riportati 333 terremoti con magnitudo comprese fra 2.5 e 5.2.

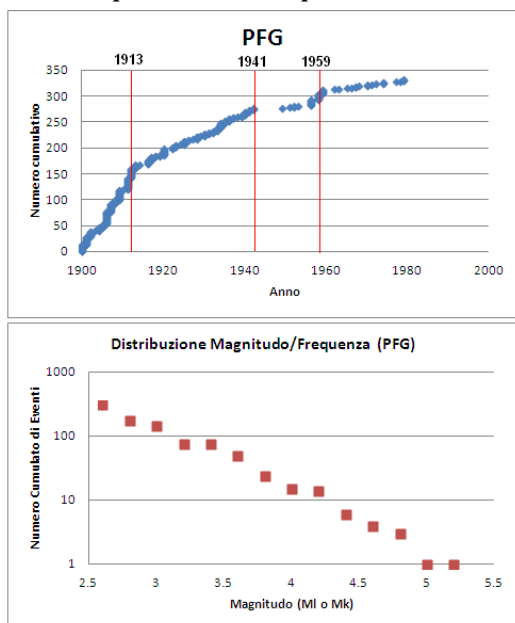


Fig. 7. Statistiche relative all’andamento della sismicità riportata nel catalogo PFG nell’intervallo 1900-1980. In alto è riportato il numero cumulato di eventi riportati in funzione del tempo. In basso è indicato lo stesso numero di eventi in funzione della magnitudo ( $M_l$  o  $M_k$ )

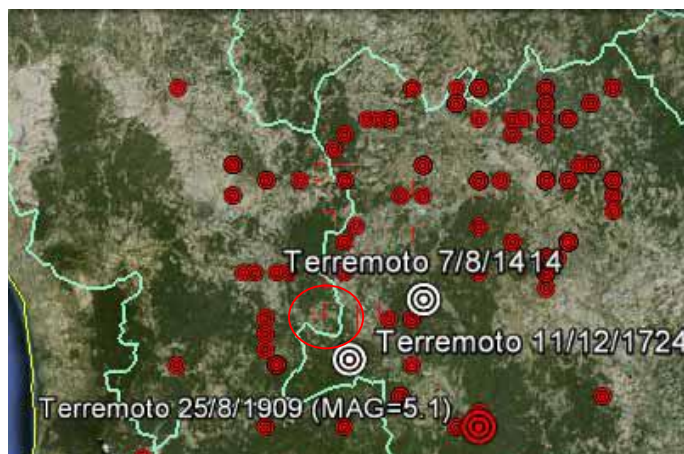


Fig. 8. Epicentri dei terremoti riportati dal catalogo PFG nella zona di studio nell’intervallo 1900-1980. I cerchi in rosso indicano gli epicentri di tutti gli eventi. Viene anche riportato (cerchio in rosso più grande) l’unico evento con magnitudo maggiore di 5.. Sono anche riportati (cerchi bianchi) i due eventi storici di maggiore importanza per l’area.

La distribuzione in frequenza mostra un apparente tasso di sismicità assai più elevato di quello attuale nel periodo precedente al 1913. Il tasso di sismicità si abbassa nell’intervallo compreso fra il 1913 e il 1940. Dopo questa data, il numero di eventi riportati quasi si annulla (probabilmente per un effetto di incompletezza dovuto agli eventi della Seconda Guerra Mondiale e gli anni seguenti) per riprendere con un tasso di occorrenza piuttosto basso nell’intervallo compreso fra il 1959 e il 1980. Queste variazioni del tasso di occorrenza possono essere legate a fenomeni fisici reali o a differenti modalità di calcolo della magnitudo (macrosismica o strumentale): non è possibile distinguere i due parametri sulla base di una semplice analisi del catalogo PFG che, come è noto, è assai eterogeneo al suo interno. Sembra però interessante osservare come la distribuzione del numero di eventi in funzione della magnitudo si avvicini alla distribuzione log-lineare attesa (Distribuzione di Gutenberg e Richter) almeno per le magnitudo superiori a 3.4, suggerendo la sostanziale completezza del catalogo per quella magnitudo nell’intervallo esaminato.

### 2.3.2. I cataloghi strumentali (1980-2012)

Per quanto riguarda le informazioni relative al periodo 1980-2012 è possibile fornire una valutazione approssimativa della qualità delle stime di sismicità disponibili considerando la distribuzione delle stazioni sismiche utilizzate per l’area di studio. In Fig. 9 è riportata la collocazione delle stazioni della Rete Sismica Nazionale gestita dall’INGV utilizzate per la compilazione del catalogo CSI e quindi relative al periodo 1980-2002.

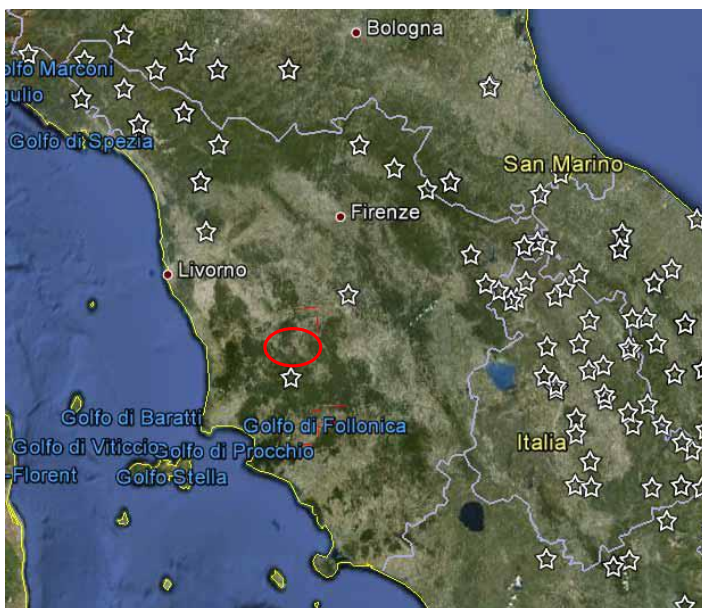


Fig. 9. Distribuzione delle stazioni sismiche della Rete Sismica Nazionale gestita dall’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ed utilizzate per la compilazione del catalogo CSI (1981-2002).

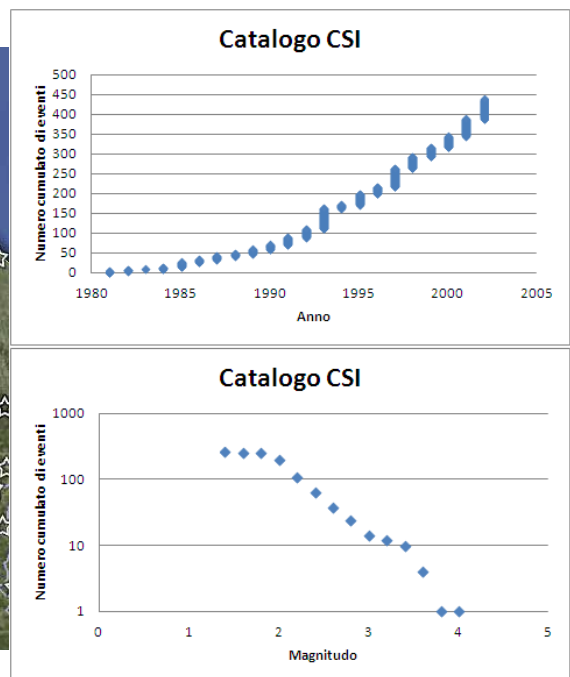


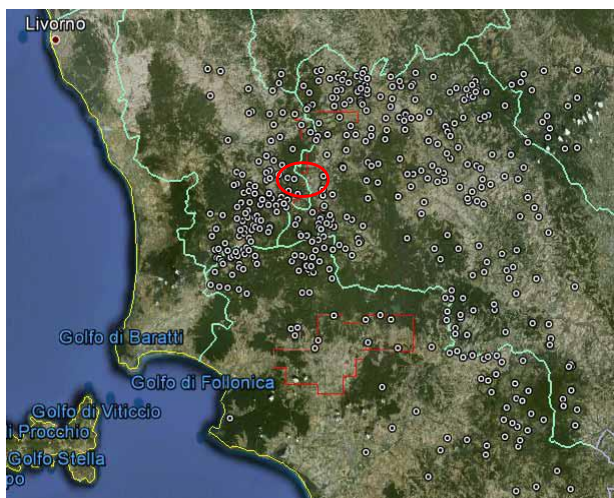
Fig. 10. Statistiche relative all’andamento della sismicità riportata nel catalogo CSI nell’intervallo 1980-2002. In alto è riportato il numero cumulato di eventi riportati in funzione del tempo. In basso è indicato lo stesso numero di eventi in funzione della magnitudo (Ml)

Si vede come nelle vicinanze dell’area di studio si trovino solo due stazioni sismiche con una densità che è fra le più basse dell’intera area italiana. In presenza di una sismicità relativamente bassa, con eventi sismici che raramente superano magnitudo 4., una così

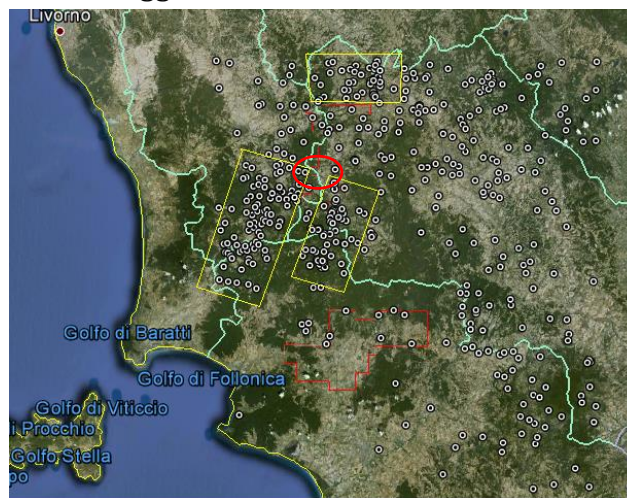
bassa densità di stazioni ha come effetto diretto una possibile marcata incompletezza per quanto riguarda soprattutto la sismicità minore e una peggiore qualità nelle localizzazioni epicentrali nell’area di studio. Nonostante queste limitazioni, dal 1980 al 2002, il catalogo CSI riporta 438 eventi per l’area di studio anche se per 180 di questi non è fornita la magnitudo. La distribuzione in frequenza di questi eventi è mostrata nella Fig. 10 in funzione del tempo e della magnitudo (MI).

L’andamento del tasso di sismicità sembra indicare una variazione (in aumento) del tasso di sismicità apparente successivamente al 2003. Questo tipo di andamento segnala solitamente un aumento del livello di completezza del catalogo. La distribuzione in magnitudo sembra indicare un andamento log-lineare al di sopra della magnitudo 2. Tuttavia questo andamento cambia di pendenza sopra magnitudo 3.3, suggerendo questo valore come soglia di completezza. La massima magnitudo osservata è stata pari a 3.9 MI per un evento collocato al margine sud orientale dell’area coperta dal catalogo qui considerato. La distribuzione geografica degli epicentri dei terremoti del catalogo CSI è riportata nella Fig. 11.

La distribuzione degli eventi permette di osservare come nell’area di Castelnuovo oltre alla nota zona sismogenica a nord-est dell’area (zona del Chianti), si mettono in evidenza due zone (evidenziate in giallo nella Fig. 12 e grossomodo centrate attorno alle zone di Larderello e Travale), caratterizzate da una elevata densità di eventi allineati lungo due fasce parallele in direzione SSW che raggiungono la parte meridionale dell’area di Castelnuovo. Si noti che nella fascia più orientale, si colloca l’epicentro del terremoto del 1724. Si delinea infine un’altra zona apparentemente sismogenica lungo il margine settentrionale della stessa area, attorno all’abitato di Poggibonsi.



*Fig. 11. Epicentri dei terremoti riportati nel catalogo CSI1.1 nella zona di studio nell’intervallo 1981-2002. I cerchi in bianco indicano gli epicentri di tutti gli eventi.*



*Fig. 12. Zone caratterizzate da una maggiore densità di epicentri (in giallo) sovrapposte alla sismicità riportata nel catalogo CSI1.1 nell’intervallo 1981-2002*

Il Bollettino dell’INGV riporta solo 45 eventi per l’intervallo 2002-2005 con magnitudo comprese fra 2.0 e 3.3.

La distribuzione degli epicentri relativi a questi terremoti sono riportati nella Fig. 13. Sebbene in questo caso il numero di terremoti riportati nel catalogo sia relativamente esiguo, la distribuzione degli epicentri sembra confermare la presenza delle tre fasce di sismicità già messe in evidenza dai dati nel catalogo CSI1.1.



L'ultima compilazione considerata è quella relativa alla Banca Dati ISIDE. Questa raccolta completa la copertura temporale dell'area di studio per il periodo 2005-2012. Oltre alla sua estensione temporale, questa banca dati può contare su una maggiore quantità di stazioni sismiche nell'area di studio. Come si vede infatti in Fig. 14 la Toscana meridionale può ora contare su un numero circa doppio di stazioni rispetto alla situazione di 10 anni fa. Come effetto di questo incremento la completezza sembra aumentare progressivamente nel tempo con un miglioramento che diviene sensibile a partire dal 2010 (Fig. 15). Anche la soglia di magnitudo minima tende a diminuire al di sotto di magnitudo 2 (si confronti l'andamento della distribuzione in frequenza dei terremoti in funzione della magnitudo per il catalogo CSI). Nel periodo esaminato, nessun evento ha superato la magnitudo 3.4.

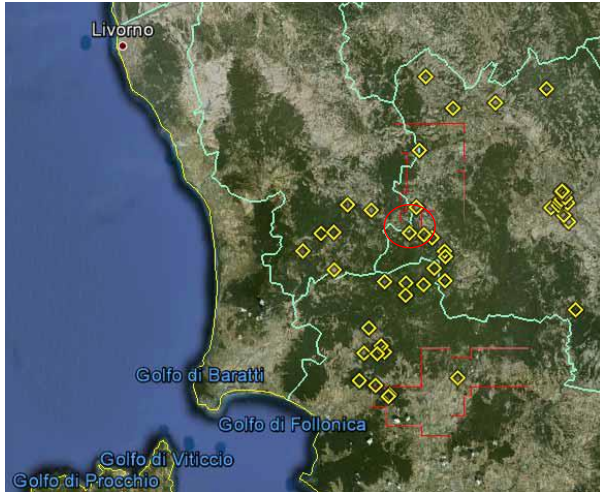


Fig. 13. Epicentri dei terremoti riportati nel Bollettino dell'INGV nella zona di studio nell'intervallo 2002-2005. I rombi in giallo indicano gli epicentri di tutti gli eventi.

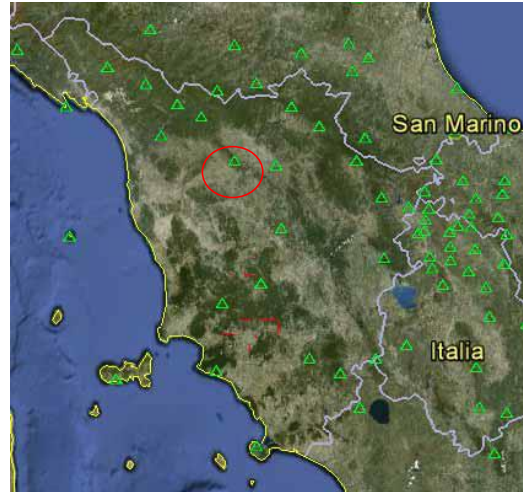


Fig. 14. Distribuzione delle stazioni della Rete Sismica Nazionale gestita dall'INGV utilizzate per la determinazione delle caratteristiche epicentrali dei terremoti riportati nella banca dati ISIDE.

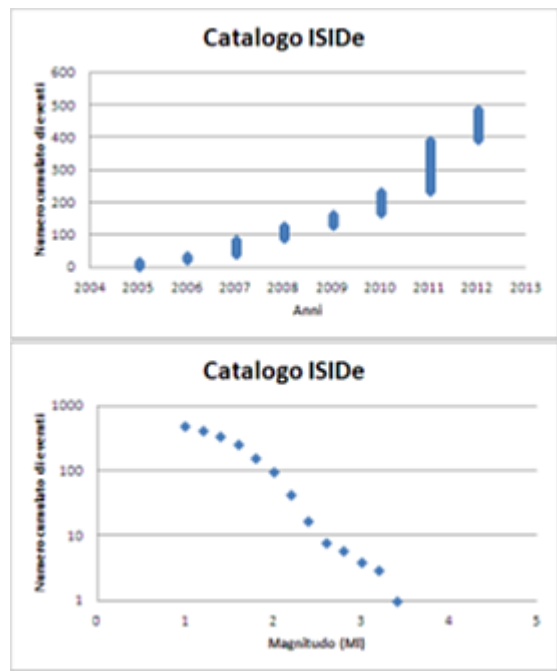
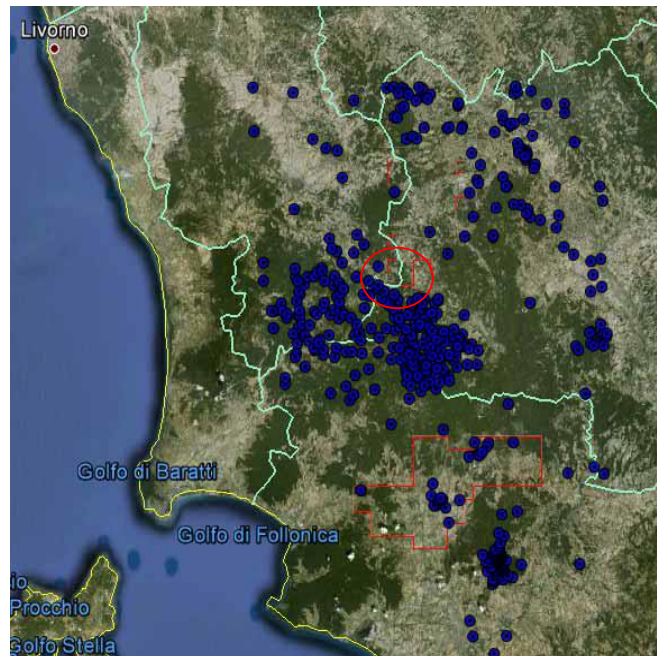


Fig. 15. Statistiche relative all'andamento della sismicità riportata nel catalogo ISIDE nell'intervallo 2005-2012. In alto è riportato il numero cumulato di eventi riportati in funzione del tempo. In basso è indicato lo stesso numero di eventi in funzione della magnitudo (MI)

La distribuzione degli epicentri riportati per la zona di studio nel catalogo ISIDe, sono mostrati in Fig. 16. La distribuzione geografica degli epicentri sembra confermare la presenza di una zona sismicamente attiva a sud dell’area di Castelnuovo (cerchio rosso), in particolare nella zona del campo geotermico di Travale. L’attività microsismica sembra sottolineare la maggiore attività di questa regione (anche se le fasce in Fig. 11 appaiono assai meno distinguibili fra loro) rispetto all’area di Poggibonsi a Nord dell’area di Castelnuovo.



*Fig. 16. Epicentri dei terremoti riportati nel catalogo ISIDe nella zona di studio nell’intervallo 2005-2012. I cerchi in blu indicano gli epicentri di tutti gli eventi in catalogo.*

### 3. Stime degli effetti della iniezione di fluidi sulla sismicità nei sistemi geotermici

Numerosi studi sono stati condotti per stabilire una relazione causa-effetto tra iniezione di fluidi nel sottosuolo ed aumento della sismicità.

E’ stato verificato che, in particolari siti ed in particolari condizioni geologiche del sottosuolo, si possano generare eventi sismici in funzione della massa e della pressione del fluido iniettato sia in giacimenti di idrocarburi che in sistemi geotermici EGS (McGarr, 2014<sup>1</sup>).

Nella sottostante tabella sono riportati i dati relativi a sei sistemi geotermici EGS nei quali è stata osservata una correlazione causa-effetto tra iniezione dei fluidi e sismicità.

E’ interessante notare che la magnitudo ha raggiunto valori superiori a 2.2 solo in tre casi (Basilea, Copper Basin e Soultz) quando l’iniezione dei fluidi è stata condotta con elevate portate e pressioni.

Tab. 4 - Sintesi dei dati relativi a sei campi EGS in produzione e magnitudo massime registrate in funzione del volume iniettato durante la stimolazione (McClure et al., 2014).

	Depth range	Maximum magnitude	Temperature	Degree of fault development	Volume of fluid injected during stimulation
Basel	4.6–5.0 km	3.4	190 °C at 5.0 km	High	11,570 m <sup>3</sup>
Cooper Basin (Habanero 1)	4.1–4.4 km	3.7	250 °C at 4.4 km	High	20,000 m <sup>3</sup> in 2003, 25,000 m <sup>3</sup> in 2005
Fjällbacka	0.5 km	–0.2	16 °C at 0.5 km	Low	400 m <sup>3</sup> in Fjb1 and 36 m <sup>3</sup> in Fjb3
Ogachi (OGC-1)	0.99–1.0 km	–1.0 except a 2.0 outlier	230 °C at 1.0 km	Low	10,140 t (approximately 9200 m <sup>3</sup> )
Rosemanowes	1.7–2.65 km	0.16	100 °C at 2.6 km	Low	100,000 m <sup>3</sup> over two months in RH11 and RH12 (1982) and 5700 m <sup>3</sup> in RH15 (1985)
Soultz (shallow)	2.8–3.4 km	1.9	150 °C at 3.4 km	High	Two stimulations of 20,000 m <sup>3</sup> each
Soultz (deep)	4.5–5 km	2.9	200 °C at 5.0 km	High	Three wells stimulated at volumes between 20,000 and 35,000 m <sup>3</sup>

Anche nel caso dei sistemi geotermici idrotermali, come quelli attualmente utilizzati in Toscana per la produzione di energia elettrica, l’estrazione e la reiniezione di fluidi geotermici possono modificare lo stato tensionale delle strutture geologiche e provocare microterremoti.

A The Geysers in California – il più grande sistema geotermico del mondo in fase di intensivo sfruttamento da oltre 40 anni – attualmente sono installati 800 MW su circa 120 kmq, con 333 pozzi di estrazione a vapore e 60 pozzi di reiniezione.

Numerosi studi scientifici sono stati condotti sulla sismicità dell’area geotermica di The Geysers che si trova in una regione a elevato rischio sismico, nella quale nel 1969 (prima dell’inizio dello sfruttamento industriale del sistema geotermico, si sono verificati due terremoti di magnitudo 5.6 e 5.7. (cfr: <http://resilience.abag.ca.gov/earthquakes/sonoma/> : “Sonoma County is bounded on the west and the east by earthquake faults. Four active or potentially active earthquake faults are identified within the County’s boundaries by the Alquist-Priolo Earthquake Fault Maps and represent the earthquake scenarios of greatest risk to Sonoma County. The Northern Segment of the San Andreas Fault lies off the west coast of the County, and crosses land at Bodega Bay, goes out to sea and crosses the County again from Fort Ross, past the community of Sea Ranch, exiting the County at its northern border. The Northern Hayward/Rodgers Creek Fault enters Sonoma County at San Pablo Bay and extends northward through the City of Santa Rosa. The Maacama Fault lies to the east of the Healdsburg Fault and continues northward, passing east of the City of Cloverdale. The Hayward/Rodgers Creek fault

<sup>1</sup>McGarr A., 2014 – Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 1008–1019, doi:10.1002/2013JB010597



---

*system has the highest likelihood of an M 6.7 or greater earthquake occurring before 2036. Other potential unknown faults that are at risk of affecting Sonoma County may exist but have not been identified or mapped. Although the epicenter of the magnitude 7.8 1906 San Francisco earthquake was not within Sonoma County's boundaries, horizontal displacement along the San Andreas Fault averaged 15 feet in Sonoma County and caused major damage in Santa Rosa, Sebastopol, Healdsburg, Petaluma and other communities. The last major earthquakes in Sonoma County occurred on October 1, 1969. Two earthquakes of Magnitudes 5.6 and 5.7 originated near the juncture of the Rodgers Creek and Healdsburg Faults, approximately two miles north of Santa Rosa. The potential for liquefaction in Sonoma County exists primarily in the wetlands areas adjacent to San Pablo Bay; along the Russian and Petaluma Rivers and Santa Rosa and Sonoma Creeks; the Laguna de Santa Rosa and Santa Rosa Plains."*

Sulla base delle informazioni reperibili direttamente sul sito della società che gestisce gli impianti geotermici di The Geysers (<http://www.geysers.com/seismicity.aspx>) la correlazione tra reiniezione dei fluidi geotermici e microsismicità (Magnitudo <3) appare evidente, ma non è altrettanto evidente la relazione con gli eventi di magnitudo maggiore di 3, i quali addirittura si manifestano con minore frequenza rispetto al 1990, anno in cui è stata incrementata la portata di reiniezione.

Anche nelle aree geotermiche di Larderello-Travale e del Monte Amiata sono stati condotti vari studi per verificare eventuali relazioni tra reiniezione dei fluidi e microsismicità (Batini et al. 1985<sup>2</sup>, Batini et al. 1980<sup>3</sup>).

Nell'area di Larderello non è evidente una relazione spazio-temporale tra eventi sismici e reiniezione su singoli pozzi, ma si osserva che all'aumentare della quantità di fluido reiniettato nel sottosuolo la frequenza degli eventi microsismici tende ad aumentare mentre la loro magnitudo tende a diminuire.

Analogamente a quanto osservato anche a The Geysers (sistema geotermico a vapore dominante come quello di Larderello), si può ipotizzare che il costante ma moderato rilascio di energia attraverso microterremoti impedisca l'accumulo di grandi tensioni evitando la generazione di terremoti di magnitudo elevata.

Sulla base delle informazioni disponibili è ragionevole affermare che la relazione causa-effetto tra sismicità e iniezione dei fluidi non è sempre verificata nei sistemi geotermici idrotermali a vapore dominante, e, anche qualora esistesse non determina un aumento del numero di eventi ad elevata magnitudo (>3).

---

<sup>2</sup> Batini F., Console R. and Luongo G. – Seismological study of Larderello-Travale geothermal area – 1985 – Geothermics, Vol. 14. No, 2/3

<sup>3</sup> Batini F., Bufè C., Cameli G.M., Console R., Fiordelisi A. – Seismic monitoring in Italian geothermal areas – 1980 – 2nd DOE-ENEL Workshop, proceedings

## 4. Monitoraggio della microsismicità

Un idoneo sistema di acquisizione ed elaborazione dati “in real time” verrà installato per consentire il continuo monitoraggio della sismicità e per verificare la sua eventuale correlazione con le attività di reiniezione.

### 4.1. Progetto della rete di monitoraggio

La rete è stata progettata al fine di ottenere i risultati ottimali in termini di localizzazione ipocentrale e rilevamento della Magnitudo, tenendo conto delle indicazioni contenute nelle “linee guida” in materia di osservazione degli effetti delle attività antropiche correlate all’estrazione/stoccaggio di idrocarburi e delle relative acque di strato, emanate dal Gruppo di Lavoro istituito dal MISE nel Novembre 2014. La rete di monitoraggio microsismico che sarà installata consentirà di rilevare eventi di Magnitudo anche inferiore a 1.

La scelta dell’ubicazione del sito di installazione rappresenta una delle fasi più delicate che si devono affrontare per avere una buona riuscita nelle successive operazioni di monitoraggio sismico. Dovranno essere attentamente valutati una serie di parametri che spaziano dalla facilità di accesso al sito, necessaria per la realizzazione fisica delle infrastrutture e delle successive fasi di manutenzione, alla copertura del segnale UMTS per lo streaming dei dati, necessaria per un efficace monitoraggio in tempo reale delle operazioni. Nondimeno la scelta dell’ubicazione del sito di monitoraggio dovrà essere supportata da una accurata analisi del rumore ambientale per verificare se i siti attualmente individuati come di possibile interesse, siano effettivamente ottimali per l’installazione della strumentazione.

Per rispondere a questo punto Magma Energy Italia ha già testato un software per lo studio e l’analisi del rumore ambientale nonché i sensori per il campionamento in campagna. L’analisi del rumore partirà dal ricavare la PSD (Power spectral density) mediante un algoritmo che utilizza la fast Fourier Transform in finestre temporali di ampiezza variabile. Una volta ricavate le varie PSD per verificare la corretta stima del rumore ambientale per un dato sito, verrà generata una funzione che quantifichi la densità di probabilità ad una determinata frequenza (PDFs). Un esempio che mostri il risultato dell’analisi sopra descritta è visibile in Fig. 17.

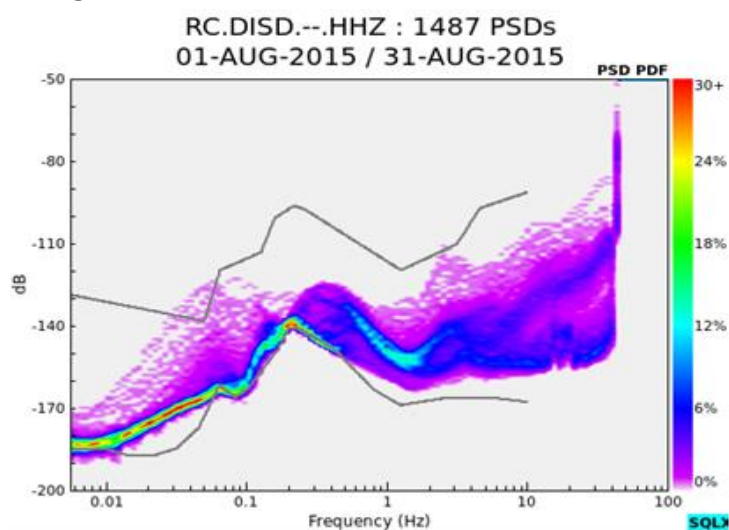


Fig. 17 – Curve di densità di probabilità per la stazione di rilevamento microsismico denominata DISD attualmente in funzione nel P.R. “Roccastrada”

Le PFDs oltre a fornire un criterio per la scelta o meno del sito possono fornirci informazioni anche sul grado di funzionamento della strumentazione una volta installata e sulle possibili operazioni di manutenzione. Come esempio, si riporta le variazioni di rumore giornaliero a due stazioni di monitoraggio per la rete sismica USA (McNamara et al., 2004). Se paragoniamo la Fig. 18A con la Fig. 18B, sono evidenti dei forti disturbi soprattutto per periodi lunghi (frequenze dell’ordine di 0.05 Hz). In questo range di frequenza vengono mostrate delle variazioni anche di 50 dB durante l’intero arco della giornata. Una possibile spiegazione può essere data dalla cattiva coibentazione termica della stazione in A rispetto a quella in B. Per questi ed altri motivi sarà prestata particolare attenzione all’alloggiamento del sensore e degli altri strumenti di cui si compone una stazione di monitoraggio microsismico.

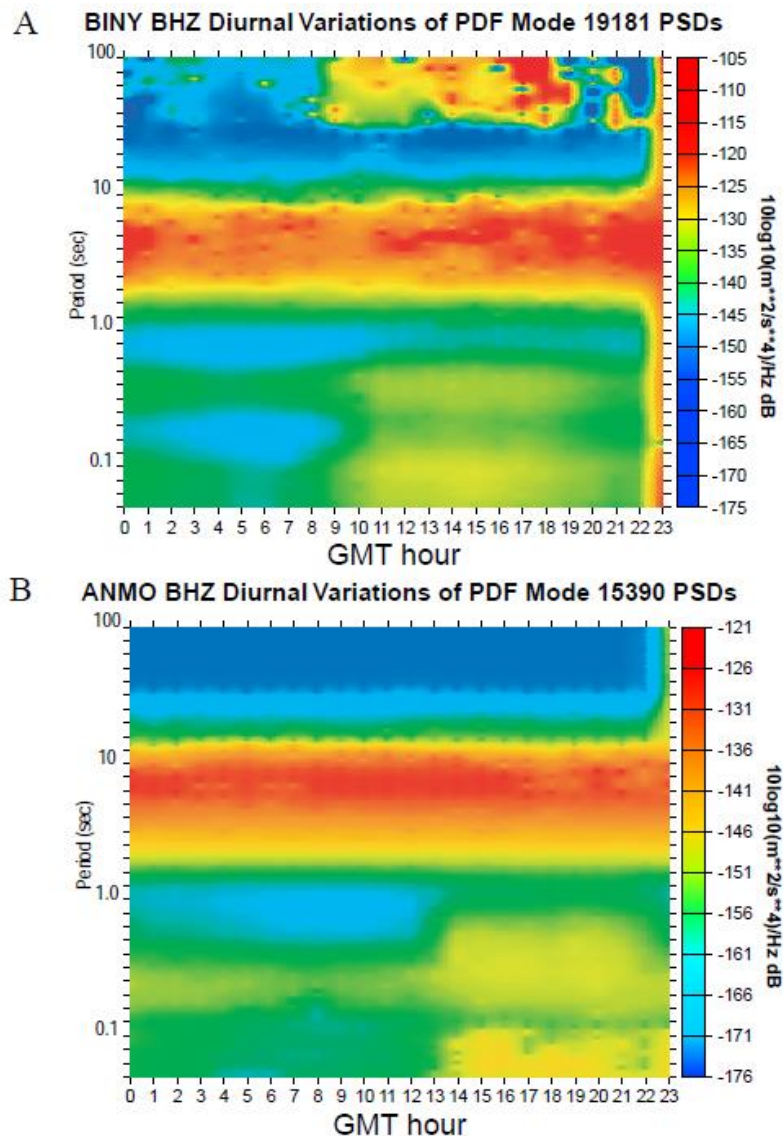


Fig. 18 – Variabilità giornaliera del noise in due stazioni della rete Statunitense ,USNSN e ANSS (McNamara et al.)

La scelta dei siti di monitoraggio sarà, quindi, condizionata dalle misure di rumore sismico di sito. I dati ottenuti verranno elaborati tramite software dedicato, le cui soglie di



ampiezza in funzione della frequenza, saranno utilizzate come discriminante per la scelta di un sito o il suo abbandono. La rete di rilevamento così progettata, permetterà di raggiungere nel dominio interno di rilevazione, una accuratezza nella localizzazione ipocentrale di alcune centinaia di metri per terremoti con magnitudo locale  $M_L$  compresa tra 0.5 e 1. Il network di monitoraggio verrà anche implementato con stazioni esterne al P.R. Castelnuovo già operative nell’adiacente P.R. Mensano, al fine di migliorare la copertura nel dominio interno di rilevazione con modelli di distribuzione della velocità nel sottosuolo più completi e estesi possibili (Fig. 19).

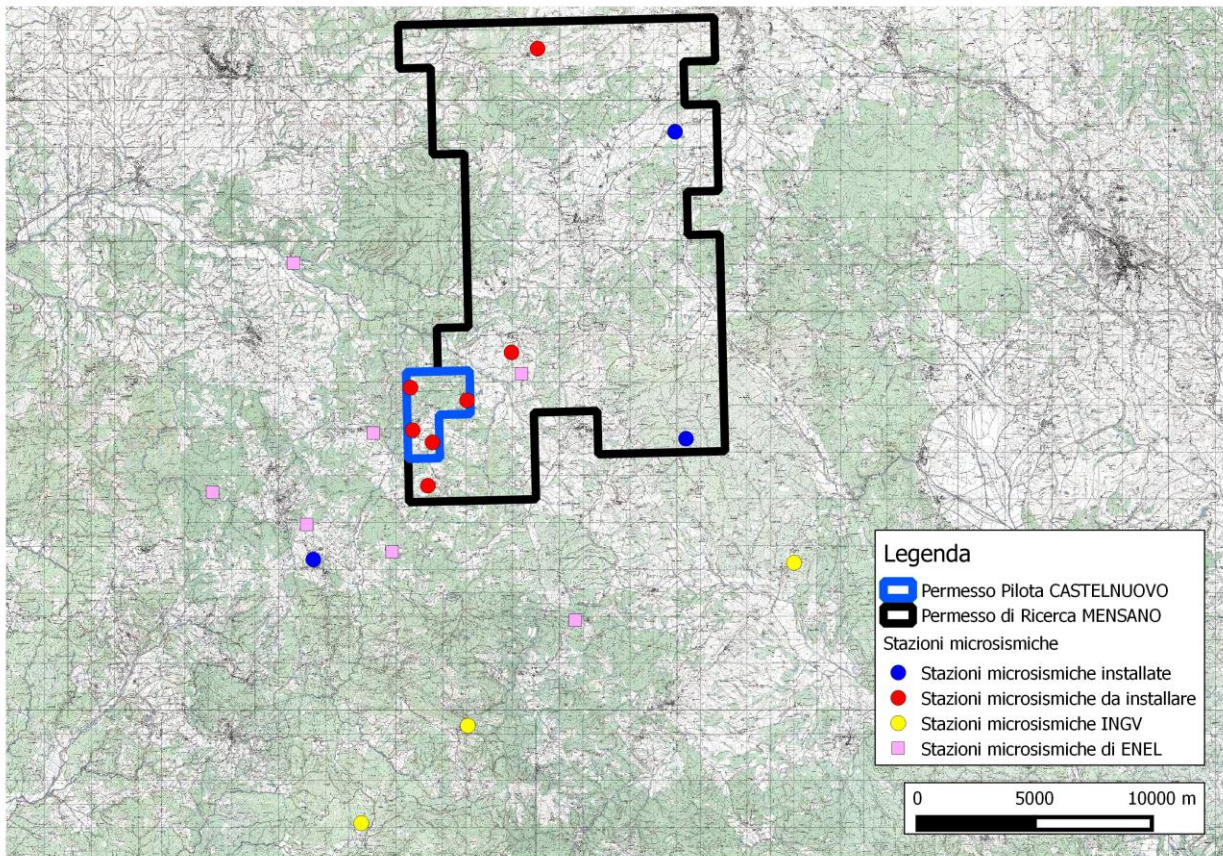


Fig. 19 Stazioni microsismiche installate e in progetto nell’area adiacente al Permesso “Castelnuovo”

Tale rete consentirà di localizzare gli eventi sia all’interno del permesso Castelnuovo sia nelle adiacenti Concessioni Minerarie geotermiche di Enel Green Power.

Ad autorizzazione ottenuta i segnali saranno acquisiti a partire da circa un anno prima dell’inizio delle operazioni di perforazione (salvo ritardi causati da eventuali rallentamenti legati al rilascio delle autorizzazioni da parte delle autorità competenti) e, ove necessario, verranno installati anche uno o più strumenti ad elevata dinamica (accelerometri). I dati registrati in continuo, potranno avere una frequenza di campionamento di 200Hz per i sismometri e 100Hz per gli accelerometri, come indicato dalle linee-guida MISE. Tutti i dati verranno elaborati in real-time, fornendo per ogni evento classificato i parametri di sorgente che verranno organizzati in cataloghi e che saranno periodicamente messi a disposizione del pubblico.

Il diagramma di flusso (Fig. 20) mostra i principali step del processing che verranno utilizzati da Magma Energy.



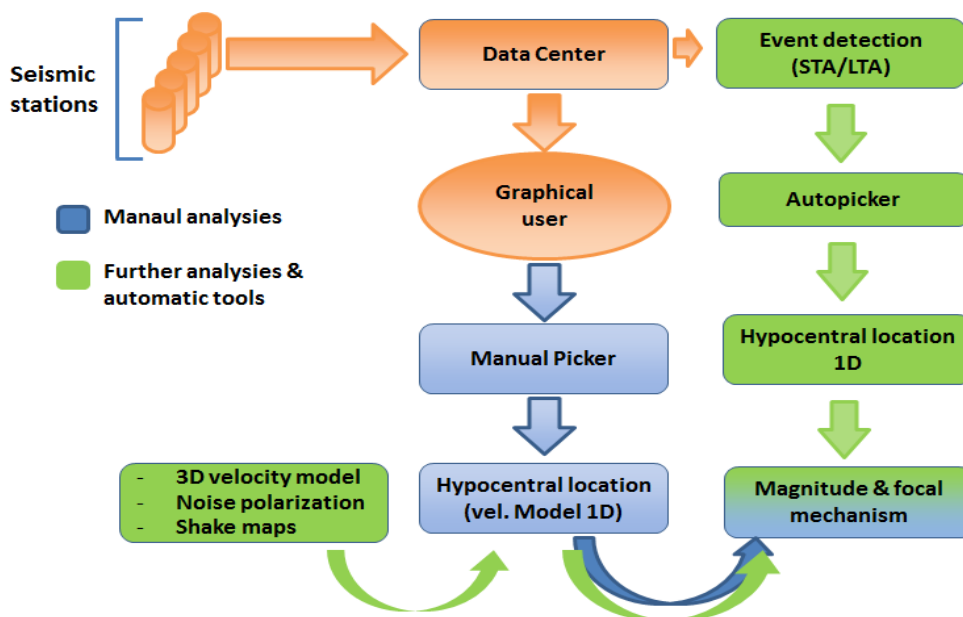


Fig. 20 – Diagramma di flusso che mostra i principali passaggi nel processing del dato

La rete di rilevamento della sismicità consisterà di quattro stazioni (Fig. 21), sia per l’acquisizione del “bianco”, sia per il monitoraggio delle attività. Inoltre quando sarà disponibile un congruo numero di eventi, si procederà anche all’analisi manuale, al fine di ottenere modelli di velocità più dettagliati delle condizioni geologiche locali. Queste informazioni saranno necessarie per aumentare il livello di precisione e accuratezza nelle localizzazioni ipocentrali e di magnitudo in conformità con le best practice del settore.

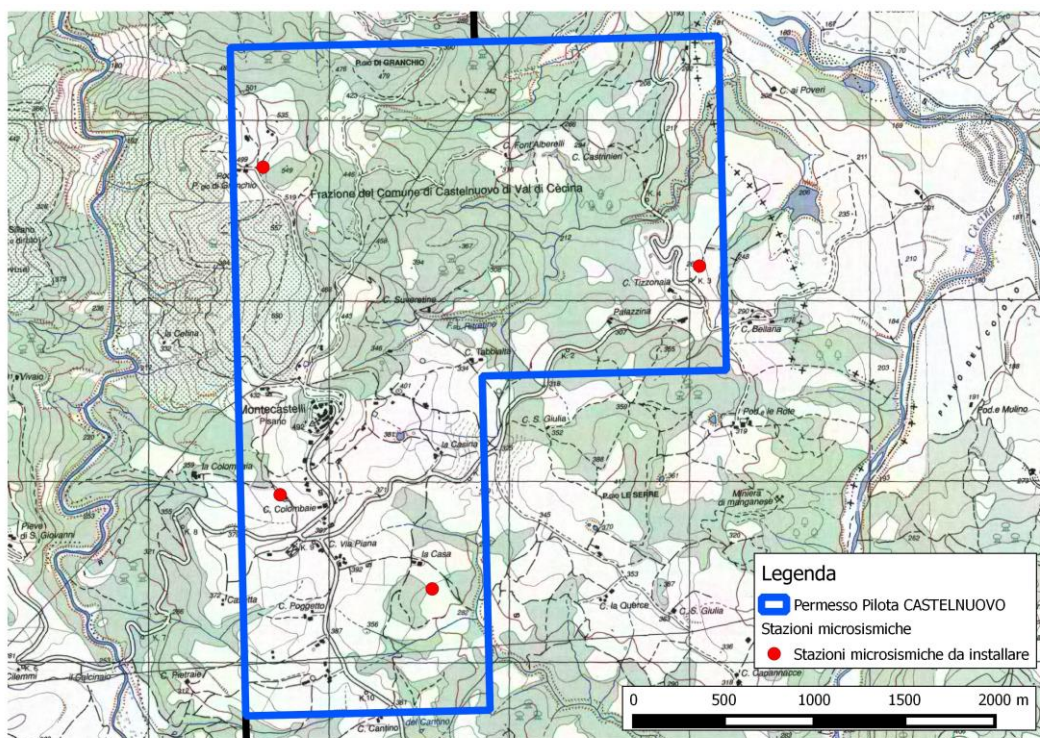


Fig. 21 – Localizzazione prevista delle stazioni microsismiche nell’area del Progetto Pilota.

Le stazioni di monitoraggio della sismicità naturale prevedono l’installazione di sismometri collegati ad una centralina di acquisizione (digitalizzatore), alimentata o con pannelli fotovoltaici o tramite l’allaccio alla rete. La sincronizzazione temporale tra le stazioni viene assicurata tramite rete GPS. I dati registrati in continuo vengono immagazzinati all’interno del digitalizzatore e trasmessi via rete UMTS ad un centro di calcolo presso la sede Magma Energy. L’installazione richiederà la creazione di piccoli manufatti (come in Fig. 22), per l’alloggiamento della strumentazione e per il supporto dei pannelli fotovoltaici necessari all’alimentazione. Accortezza particolare sarà tenuta per l’alloggiamento del sismometro, il quale verrà posizionato a circa 2 metri di profondità in pozzetti di HDPE con apertura dell’oblò di dimensione tali da permettere l’entrata e uscita di un operatore in tutta sicurezza.

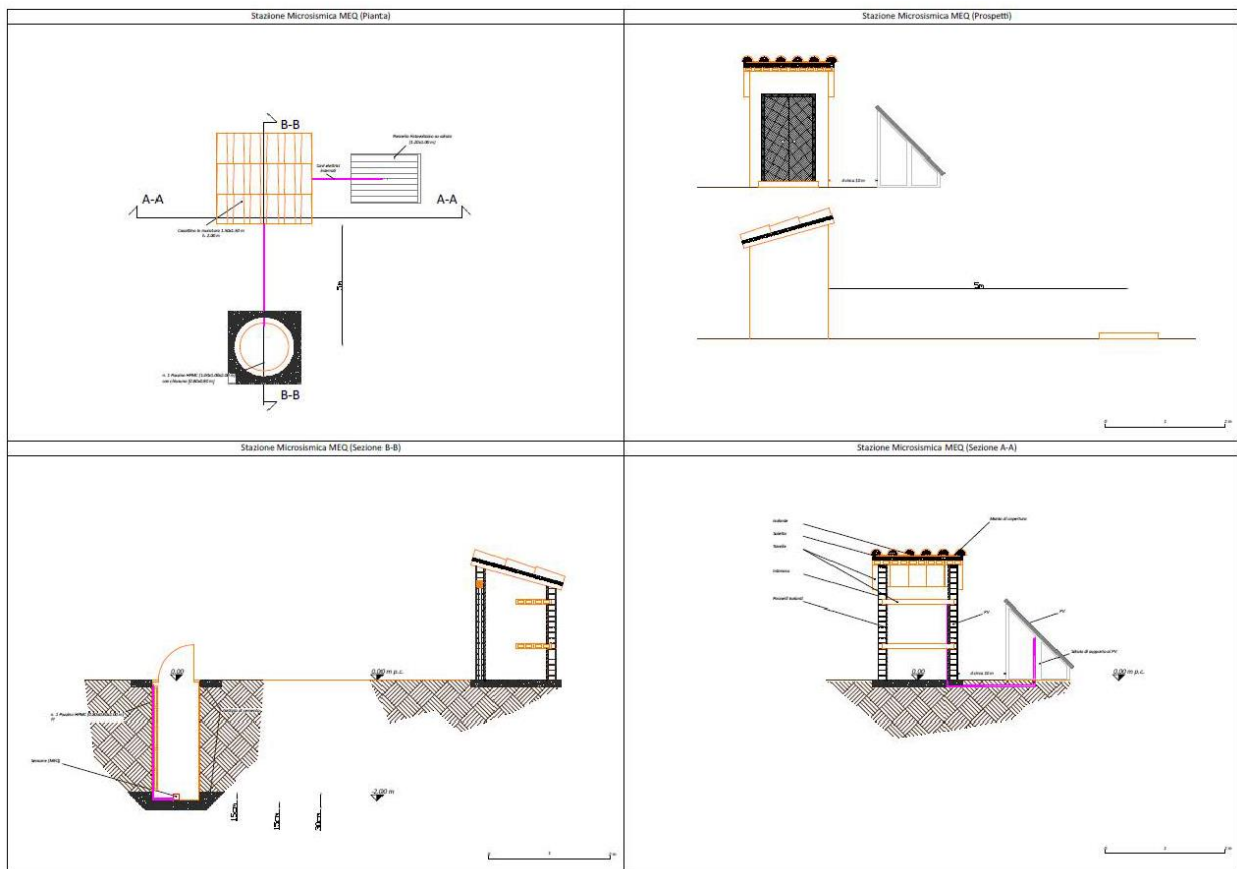


Fig. 22- Possibile schema di installazione che sarà eseguito nel P.R. Castelnuovo

#### 4.2. Sistema di gestione ed allerta

Nel sistema di acquisizione ed elaborazione dati “in real-time” per il continuo monitoraggio della sismicità, verrà implementata una procedura di allerta, che consentirà di intervenire tempestivamente sulla gestione operativa degli impianti nel caso in cui si verificassero eventi sismici correlati alla reiniezione dei fluidi geotermici in pozzo.

La procedura d’allerta verrà attuata, al verificarsi di eventi sismici con distanza dell’ipocentro < 1km dal fondo pozzo di reiniezione, applicando i criteri indicati nella sottostante tabella.



Tab. 5 – Intervalli indicativi dei valori di monitoraggio rilevati nel dominio interno di rilevazione (DI) da utilizzare come riferimento per la definizione delle soglie. (da: Linee guida MISE, 2014).  $M_{max}$  = Magnitudo massima; PGA = peak ground acceleration; PGV = peak ground velocity.

Livello di Attivazione	Codice Semaforico	$M_{Max}$	Status	PGA (%g)	PGV (cm/s)
1	Verde	$\leq 1.5$	Ordinario	-	-
2	Giallo	1.5-2.2	Attenzione	0.5	0.4
3	Arancio	2.2-3.0	Riduzione delle attività	2.4	1.9
4	Rosso	$> 3.0$	Sospensione delle Attività	6.7	5.8
Per confronto: PGA con probabilità di superamento $> 10\%$ in 50 anni, riferita a suolo rigido (cat .A) nel sito in esame (cfr. Fig. 4)				12.5÷15.0	11÷13

La rete sismica installata nel Permesso Castelnuovo sarà integrata con la rete sismica nazionale di INGV, che in quest’area non presenta una densa copertura ed i dati rilevati saranno resi fruibili in modo tale che anche le comunità locali possano disporre di informazioni oggettive con le quali documentarsi e valutare l’evoluzione della sismicità ed eventuali correlazioni con le operazioni condotte sugli impianti.

## 5. Conclusioni

Al fine comprendere i possibili effetti delle attività di perforazione e di reiniezione sulla sismicità correlata è stato opportuno inserire tali effetti nel contesto della sismicità naturale e della pericolosità sismica dell'area di interesse. Si precisa che comunque tutta l'analisi sismica ha riguardato aree dove le operazioni di coltivazione sono attive da lungo tempo per cui l'attività microsismica risulta essere eventualmente correlata alle fasi di coltivazione ma non a quelle di perforazione (che pure portano ad applicare pressioni in pozzo ben più alte anche per settimane). A questo scopo è stata condotta un'analisi della sismicità che si è sviluppata in due fasi. Nella prima è stata valutata la pericolosità di riferimento (tempo di esposizione di 50 anni) a partire da due approcci di tipo statistico; nella seconda fase si è proceduto a un'analisi della sismicità negli ultimi secoli. Scopo di queste analisi è stato quello di localizzare le possibili sorgenti responsabili della pericolosità sismica locale (analisi di disaggregazione), valutando la possibile presenza di strutture sismogeniche potenzialmente pericolose all'interno o nelle vicinanze delle due aree di studio.

Le due procedure di stima della pericolosità hanno confermato concordemente un livello di pericolosità sismica bassa per l'area di interesse, con intensità di riferimento (ovvero le massima intensità caratterizzate da una probabilità di eccedenza non superiore al 10% in 50 anni), del VII grado MCS cui corrispondono valori di accelerazione orizzontale di picco che conservativamente possono essere considerati nell'intervallo 0.13-0.18g.

Il risultato più importante di queste indagini, proviene dall'analisi di disaggregazione che ha evidenziato come la pericolosità sismica sia condizionata da eventi di magnitudo media (5.0-6.0), originati entro 15-20 km dall'area di studio. In particolare sono stati identificati come rappresentativi di questa pericolosità due eventi storici: il terremoto della Toscana Centrale del 7 Agosto del 1414 con magnitudo stimata pari a 6.0 e quello di Travale dell'11 Dicembre del 1724 con magnitudo stimata pari a 5.0. Per entrambi questi eventi si ipotizza una localizzazione epicentrale, seppur incerta a causa della scarsità di fonti documentarie, prossima al settore meridionale del permesso Castelnuovo.

Per validare l'ipotesi relativa alla possibile esistenza di una zona sismogenica a sud dell'area di Castelnuovo e potenzialmente estesa all'interno di questa, è stata analizzata la sismicità strumentale così come riportata da tutte le fonti disponibili per le due aree di studio. Questo tipo di indagine presenta notevoli difficoltà soprattutto per la bassa densità di stazioni sismiche della rete nazionale disponibili fino al 2004. Visto che la sismicità dell'area è caratterizzata da magnitudo che non hanno superato il valore di 3.8 la scarsità di stazioni sismiche pubbliche distribuite nell'area condiziona pesantemente la completezza dei cataloghi disponibili e il livello di qualità delle determinazioni ipocentrali per molta parte della storia sismica dell'area. Pur con queste limitazioni, il quadro della sismicità strumentale sembra confermare le deduzioni effettuate sulla base della sismicità storica. In particolare, risulta confermata la presenza di una zona sismogenicamente attiva a sud (Zona Travale) e a sud-ovest dell'area di Castelnuovo (Zona Larderello), con possibili estensioni al suo interno (nella parte più meridionale). Quest'area copre di fatto le zone di sfruttamento geotermico di Larderello e Travale oggetto di un lungo monitoraggio da parte di Enel Green Power.

Nelle banche dati analizzate non è possibile identificare l'eventuale contenuto informativo prodotto dalle reti locali dislocate dall'ENEL in quanto il dato non risulta di dominio pubblico e quindi non è possibile valutare quanto la densità di informazioni (e quindi di terremoti

localizzati), sia associabile alla naturale attività sismica dell'area oppure ascrivibile all'effetto combinato della sismicità naturale e della coltivazione geotermica in corso in particolare per quanto riguarda le operazioni di reiniezione di fluido in serbatoio. Tuttavia, la presenza di terremoti storici in questa stessa zona (almeno quelli del 1414 e del 1724), depone a favore di una zona attiva in questa parte dell'area di studio.

Per quanto riguarda in dettaglio gli effetti dell'attività produttiva nei campi geotermici in genere, non si può escludere la possibilità che vi sia una correlazione tra sismicità e reiniezione di fluidi durante le fasi di coltivazione. Tuttavia in questi casi la sismicità correlata mostra le seguenti caratteristiche:

- gli eventi sismici generati sono generalmente classificabili come microsismi ( $M < 3$ );
- All'aumento della frequenza degli eventi sismici è associata una diminuzione della loro magnitudo;
- Gli eventi sismici generati dalla reiniezione sulla base dei dati di letteratura possono essere generalmente localizzati in un intorno di alcune centinaia di metri dal punto di reiniezione;
- Nell'area di Larderello-Travale gli ipocentri sono localizzati a profondità minori di 10 km;
- la macrosismicità attuale mostra valori di magnitudo del tutto confrontabili con i gradi di intensità risentiti nel passato e nettamente al di sotto dell'intensità massima dei terremoti più forti avvenuti nell'area.

Le operazioni si svolgeranno ai margini di un sistema geotermico idrotermale, ossia in una zona sismicamente attiva, quindi l'occorrenza di terremoti è attesa indipendentemente dall'esecuzione o meno di attività di produzione e reiniezione in serbatoio.

Al fine di garantire un adeguato controllo delle attività di coltivazione pianificate, è previsto un sistema di monitoraggio continuo della sismicità attraverso l'installazione di stazioni microsismiche disseminate nel territorio del Permesso e l'implementazione di una procedura d'allerta che consenta di intervenire per modificare le condizioni operative dell'impianto nel caso si verificassero eventi sismici correlabili alla reiniezione dei fluidi.

I dati raccolti dal sistema di monitoraggio saranno resi pubblici e messi a disposizione per studi di carattere tecnico scientifico che possano anche esulare dagli aspetti geotermici ma che possano contribuire ad una migliore conoscenza del territorio anche in termini di:

- analisi di pericolosità ambientale e sismica;
- pianificazione territoriale;
- gestione delle emergenze di Protezione Civile.