

Accordo di Collaborazione Scientifica

Regione Toscana, INGV

Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane

Responsabile di Progetto: Thomas Braun

Autori: T. Braun, M. Errico, D. Famiani,

A. Morelli

Redazione: M. Errico

2020/2



In copertina: Foto aerea della dell'eruzione del geyser "Steamboat" (vaporetto) nel Norris Geyser Basin; 6 Luglio 1984 (Robert B. Smith), da "Smith, R.B. & L.J. Siegel (2000): Windows into the Earth. Oxford University Press. 242 pp.

1. INTRODUZIONE	5
2. NOTE GENERALI SULLA GEOTERMIA	6
2.1. SISTEMI IDROTERMALI - <i>HYDROTHERMAL SYSTEM (HS)</i>	6
2.1.1. <i>Vapor dominated: The Geysers (California/US)</i> , Larderello (Toscana/IT)	7
2.1.2. <i>Water dominated: Mt. Amiata (Toscana/IT)</i>	8
2.2. SISTEMI PETROTERMALI - <i>PETROTHERMAL SYSTEM – Hot Dry Rock (HDR)</i>	10
3. COMMENTI SULLA DEFINIZIONE DEI DOMINI DI MONITORAGGIO	12
3.1. LINEE GUIDA MONITORAGGIO E AUTORITÀ COMPETENTE	12
3.2. DEFINIZIONE DEI DOMINI DI MONITORAGGIO SECONDO GLI ILG	13
4. SCENARI DI DOMINI INTERNI DI RILEVAZIONE	15
4.1. SCENARIO 1: CONCESSIONI ATTIVE	15
4.2. SCENARIO 2: CONCESSIONI ATTIVE + ISTANZE CONCESSIONI	16
4.3. SCENARIO 3: SCENARIO 2 + PERMESSI DI RICERCA	17
5. COMMENTI RELATIVI ALLA RETE SISMICA INTEGRATA	18
5.1. RETE SISMICA ESISTENTE	18
5.2. RICERCA DEI SITI PER INSTALLAZIONE DI STAZIONI INTEGRATIVE	19
6. SIMULAZIONE DI CAPACITÀ DI DETEZIONE	20
7. COMMENTI RELATIVI ALLA DEFINIZIONE DI UN SISTEMA DI SEMAFORO	25
8. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI	27
BIBLIOGRAFIA	29
ELENCO DELLE FIGURE	31
ELENCO DELLE TABELLE	31

**Accordo di Collaborazione Scientifica tra
Regione Toscana e Istituto Nazionale di Geofisica e
Vulcanologia**

**Costituzione di un sistema di monitoraggio
sismico integrato delle aree geotermiche
toschane
Relazione tecnica intermedia (Relazione n.2)**

Thomas Braun ^{1,2}, Maddalena Errico ³, Daniela Famiani ², Andrea Morelli ³

¹ INGV, Osservatorio Sismologico Arezzo, Italia; ² INGV, Sezione di Roma 1, Italia;

³ INGV, Sezione di Bologna, Italia.

30/11/2020

1. Introduzione

In data 01/07/2020 ha avuto inizio un Accordo di Collaborazione Scientifica (ACS) tra la Regione Toscana (RT) e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) con il titolo "Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane". Tale accordo prevede un Programma delle attività, suddiviso nei seguenti obiettivi:

- Attività propedeutiche alla costituzione della rete sismica (definizione dei domini di monitoraggio, schema di scenari di rete sismica integrata, simulazione di capacità di detezione, ricerca siti nelle aree geotermiche toscane di Larderello e del Monte Amiata);
- Definizione di protocolli omogenei di definizione e condivisione dei dati sismici provenienti dai differenti concessionari e relativa valutazione della qualità del dato;
- Acquisizione in tempo reale dei segnali sismici presso i laboratori del Centro di Monitoraggio Sismico dell'INGV di Bologna e condivisione con la Regione Toscana dei dati sismici;
- Monitoraggio e analisi dati: analisi dati sismici di dettaglio, monitoraggio secondo le ILG (calcolo Localizzazione PGV, ML), reperibilità, compilazione report scientifico in caso di evento significativo nelle aree monitorate;
- Coordinamento delle attività di installazione delle stazioni sismiche finanziate dai Concessionari ed eventuale installazione di postazioni sismiche integrative;
- Supporto tecnico-scientifico alla Regione Toscana, nell'ambito dei processi decisionali connessi con le attività di monitoraggio sismico.

In data 24/07/2020 l'INGV ha trasmesso alla RT la relazione di inizio attività (Relazione n°1) che illustra in dettaglio lo stato di fatto e il cronoprogramma delle attività.

L'argomento principale della presente relazione tecnica intermedia (Relazione n°2) è la verifica sia della conclusione delle attività propedeutiche che dello stato di avanzamento inerente la messa in funzione della rete di monitoraggio sismico.

Dopo alcuni cenni generali sui campi geotermici (§2), sulle metodologie di coltivazione e l'elenco di possibili cause connesse ad un innesco della sismicità, nel §3 vengono riassunte le indicazioni ministeriali relative alla definizione dei Domini di Monitoraggio. Per la definizione del Dominio Interno di Monitoraggio (DI) nelle aree geotermiche toscane nel §4 vengono proposti tre scenari inerenti ai livelli di attivazione delle concessioni. Il §5 illustra l'inventario delle stazioni attualmente operative nell'area da monitorare e sulla base dei confini degli scenari DI (§4) viene proposta un'area per l'installazione di stazioni aggiuntive. Il §6 presenta una prima valutazione della capacità di detezione, considerando le stazioni sismiche esistenti e una rete virtuale

che comprende delle stazioni fittizie all'interno del secondo scenario di DI (§4). I due capitoli finali sono dedicati a dei commenti relativi alla definizione di un sistema a semaforo (§7), seguito da un riassunto dei risultati e un elenco dei dati da richiedere ai vari operatori per poter definire meglio in futuro i DI, la rete sismica integrata e la sua capacità di detezione.

2. Note generali sulla geotermia

Per la produzione di energia elettrica nelle aree geotermiche toscane è prevista l'applicazione di due metodologie di coltivazione della risorsa geotermica: (i) la geotermia "classica", praticata dagli anni 1950 da ENEL *Green Power* (EGP) e (ii) la geotermia a "ciclo binario", annunciata da vari operatori interconnessi in un'associazione chiamata Rete Geotermica (RGT). Segue una breve introduzione generale alla tematica, con accenni sulla coltivazione di geotermia in Toscana e sulla sismicità.

2.1. Sistemi idrotermali - *Hydrothermal system (HS)*

I sistemi idrotermali sono caratterizzati dalla presenza di una formazione geologica con rocce fratturate e/o di alta porosità che garantisce una sufficiente produzione di fluidi (vapore e/o acqua) per la produzione redditizia di elettricità.

Le centrali geotermoelettriche classiche, operate per esempio da EGP nelle aree di Larderello a Monte Amiata, vengono alimentate dal fluido geotermico, composto rispettivamente da una miscela di vapore d'acqua e di gas incondensabili in rapporto variabile nelle diverse aree geotermiche territoriali. Il fluido geotermico è estratto dal serbatoio geotermico insieme all'acqua geotermica da cui viene separato tramite un separatore. L'acqua, una volta separata, viene inviata ai pozzi di re-iniezione e reimpressa nel serbatoio geotermico. Il fluido (vapore e gas), che ha una temperatura compresa fra 180 - 210 °C, arriva alla centrale attraverso una rete di tubazioni (vaporodotti) che confluiscono in un collettore prima di andare in turbina. Il fluido viene quindi inviato alla turbina dove si espande cedendo energia; l'espansione consente di trasformare il calore del fluido prima in energia meccanica poi, mediante un alternatore, in energia elettrica che viene immessa in rete per l'utenza attraverso l'utilizzo di un trasformatore.

Lo sviluppo geotermico tenta di tenere un bilancio equilibrato tra i fluidi prodotti e quelli rimpiazzati tramite re-iniezione per garantire la longevità della risorsa energetica. Tale bilanciamento dei fluidi aiuta a mantenere la pressione all'interno del *reservoir* (possibilmente simile a quella iniziale di pre-produzione), contribuendo alla

riduzione del potenziale per la generazione di sismicità indotta. Si distinguono due tipi di HS: (2.1.1.) *vapor dominated* e (2.1.2.) *water dominated*:

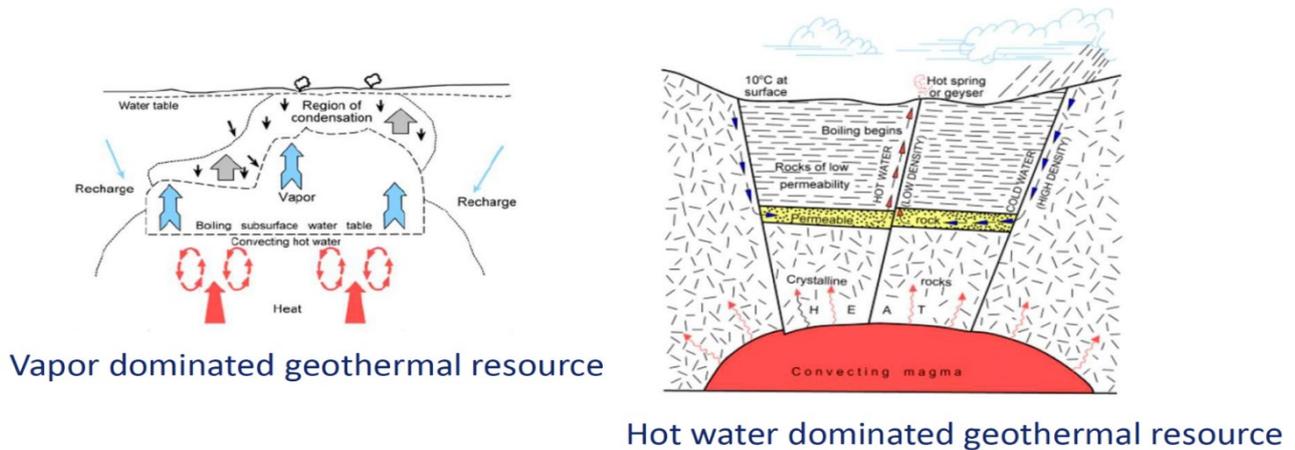


Figura 1. Risorsa geotermica a vapore o ad acqua dominante (<https://geothermalcommunities.eu/assets/presentation/2.CourseGT.pdf>).

2.1.1. *Vapor dominated: The Geysers* (California/US), Larderello (Toscana/IT)

Con 420 pozzi di produzione attivi all'interno di un'area di 30 km² *The Geysers* in California è il campo geotermico più grande a scala globale. L'acqua condensata nelle torri di raffreddamento (fino al 1988 circa 26% della produzione) veniva reintrodotta nel sottosuolo attraverso 20 pozzi di re-iniezione. Dopo un significativo calo di pressione del serbatoio a un terzo della pressione iniziale - dovuto al prosciugamento del *reservoir* - il volume di re-iniezione veniva incrementato fino all' 86%. Considerando che le pressioni all'interno del serbatoio del campo geotermico *The Geysers* sono estremamente basse, non si necessita di applicare delle sovrappressioni per iniettare l'acqua in profondità: l'acqua scende nel pozzo di re-iniezione per gravità, in quanto le pressioni presenti nel *reservoir* non sono in grado di supportare il livello del liquido fino in superficie. Il campo geotermico *The Geysers* è caratterizzato da una sismicità ($M_{max}=4.6$) che si manifesta nelle vicinanze dei pozzi di re-iniezione. Considerando che la re-iniezione di acqua nel *reservoir* non aumenta la pressione a fondo-pozzo, ma contribuisce a mantenere la pressione all'interno del serbatoio, la causa primaria della sismicità indotta è la grande differenza tra la temperatura del fluido re-iniettato e quella del *reservoir* geotermico. L'acqua iniettata genera un raffreddamento significativo della superficie dello stesso *reservoir* e provoca una contrazione delle rocce, che porta al rilascio di stress locali manifestandosi poi in sismicità indotta.

In Italia, l'unico campo geotermico del tipo a vapore dominante si trova nell'area di Larderello-Travale dove la produzione di energia elettrica da geotermia è iniziata nel 1904. Il rateo di sismicità osservata nelle aree geotermiche toscane è relativamente

basso. A Larderello-Travale sono stati registrati circa 5000 eventi sismici in 25 anni, che corrisponde all'incirca al numero di eventi registrato solamente sulla faglia Altotiberina in un anno. La magnitudo massima registrata non supera $M=4$. L'episodio più recente di un evento $M_w=3.7$ che si è verificato in data 01 Maggio 2018 a Castelnuovo di Val di Cecina (PI).

2.1.2. *Water dominated*: Mt. Amiata (Toscana/IT)

Nel caso della coltivazione delle risorse geotermiche ad acqua dominante l'acqua termale viene pompata in superficie attraverso dei pozzi di produzione, mentre l'acqua raffreddata viene re-iniettata nei pozzi di re-iniezione. Per la produzione di energia elettrica vengono utilizzate tecniche differenti, in funzione della temperatura dei liquidi estratti:

- (i) *flash steam power cycle process*
- (ii) *binary cycle process.*

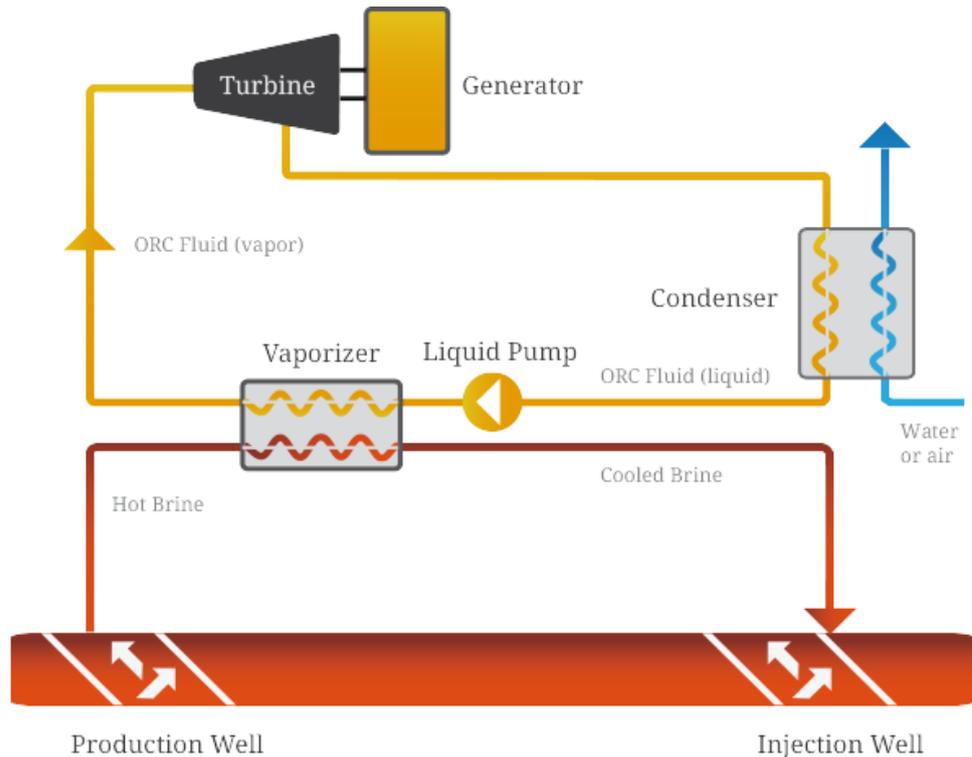
Nel primo caso, l'acqua termale passa in un separatore che manda la parte vaporizzata nel generatore per poi confluire nell'unità di raffreddamento, dove una parte evapora, mentre la parte condensata viene re-iniettata nel *reservoir*, insieme alle acque di scarto provenienti dal separatore. In Italia, il campo geotermico più importante del tipo ad acqua dominante si trova nell'area del Monte Amiata (gradiente geotermico fino a $15^\circ/100\text{ m}$) dove la produzione di energia è iniziata nel 1959 e ad oggi è attiva nelle centrali di Piancastagnaio e Bagnore.

Nel secondo caso le acque termali pompate in superficie passano in uno scambiatore di calore dove riscaldano un liquido secondario con una temperatura di ebollizione inferiore (e.g. *isopentane*). Grazie al circuito chiuso, il volume del fluido estratto è identico al volume re-iniettato.

Il progetto di RGT prevede la re-immissione al 100% del fluido prodotto. *L'assenza di emissioni in atmosfera è ottenibile attraverso la realizzazione di cicli binari chiusi (vedi schema) in cui il fluido geotermico, dopo essere stato prelevato dal sottosuolo e dopo aver ceduto il proprio calore ad un secondo fluido di lavoro passando attraverso uno scambiatore di calore, viene re-iniettato completamente nelle formazioni geologiche di provenienza.*

La tecnologia più appropriata per la valorizzazione del fluido geotermico è la tecnologia ORC (Organic Rankine Cycle), che risulta particolarmente adatta per fonti di calore a temperature medio basse, comprese tra 90 e 200° C . Applicando questa tecnologia, l'energia geotermica primaria è trasferita ad un fluido secondario a basso punto di ebollizione, il quale, compiendo il ciclo Rankine ed espandendosi in turbina, permette la

Figura 2. Schema della produzione geotermica a ciclo binario.
<http://www.retegeotermica.it/en-gb/tecnology>.



produzione di energia elettrica. Dopo l'espansione il fluido organico viene raffreddato, tramite un condensatore ad aria, e dopo essere tornato liquido, è pompato alla pressione massima per re-iniziare il ciclo. (<http://www.retegeotermica.it/en-gb/tecnology>).

Nei campi geotermici ad acqua dominante, la frequenza e l'estensione della sismicità indotta sono spesso ridotte, per vari motivi:

- La minore differenza di temperatura tra il fluido estratto e re-iniettato riduce la variazione di *stress* dovuto a effetti di raffreddamento delle rocce;
- le pressioni di re-iniezione sono generalmente minori di quelle necessarie per la fratturazione;
- la quasi totale re-iniezione dei fluidi estratti tende a mantenere la pressione originale nel *reservoir*.

La microsismicità osservata nell'area del Monte Amiata risulta molto bassa. Nei 25 anni precedenti al 2019, la rete sismica dell'INGV ha registrato 140 eventi con $M > 1.5$ in un raggio di 15 km intorno a Piancastagnaio. ENEL riporta per lo stesso periodo altri 2400 eventi al di sotto di $M = 1.5$, grazie a un *dataset* proveniente dalla loro rete sismica locale, composta da 14 stazioni. L'evento recente più forte, di $M = 4$, si è verificato il 1 Aprile 2000 a Piancastagnaio ad una profondità di 3.9 km (Braun et al., 2018b). È importante notare che le aree geotermiche in Italia Centrale manifestano tettonica attiva, con eventi sismici storici fino a $M_{max} = 5.2$ (Rovida et al., 2011) e recenti, come l'evento $M = 4.1$ del 30 Maggio 2016 a Torre Alfina (Braun et al., 2018a).

2.2. Sistemi petrotermali - *Petrothermal system* – *Hot Dry Rock (HDR)*

Aree con temperatura media-alta a bassa profondità senza di fluidi in circolazione (*Hot Dry Rock*), possono essere rese produttive applicando metodologie del tipo *EGS* – *Enhanced Geothermal System*. Tale tecnica utilizza la fratturazione idraulica (*fracking*) per aumentare la permeabilità all'interno di un volume roccioso fino al collegamento idraulico di entrambi i fondi pozzo. La metodologia *EGS* consiste quindi nella perforazione di due (o più) pozzi fino alla profondità di produzione. Tali pozzi vengono realizzati tramite iniezione di acqua fredda ad alta pressione, tale da superare la pressione di confinamento in profondità.

Una volta costituito un circuito chiuso, l'acqua fredda viene iniettata nel "pozzo iniettore", si riscalda lungo il percorso verso il fondo pozzo del "pozzo produttivo", lungo il quale risale per finire nello scambiatore termico installato in superficie. La connessione idraulica tra i fondi pozzo rimane sconosciuta, ma avviene comunque lungo il percorso di massima permeabilità (minima resistenza idraulica) e può consistere anche in multipli percorsi di flusso.

La trivellazione e la stimolazione vengono realizzate con l'obiettivo di (Figura 3):

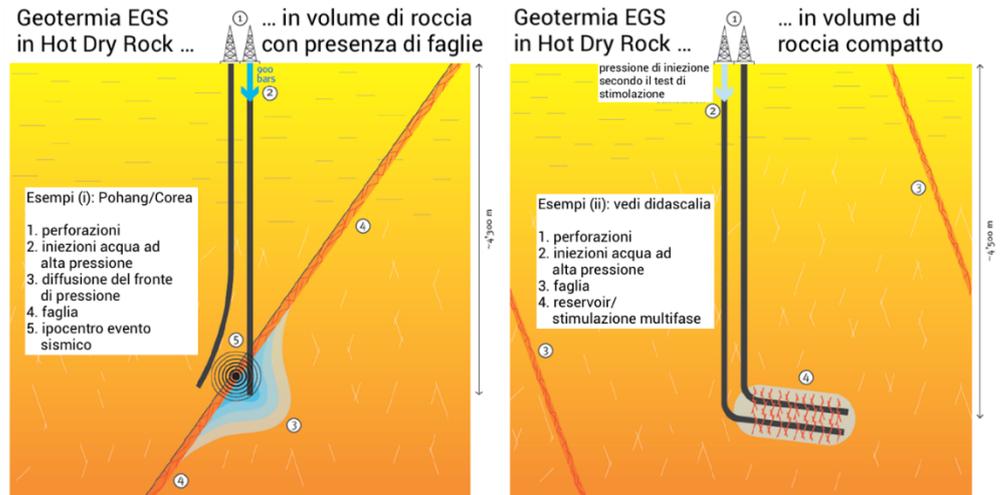
- a) riscontrare delle faglie preesistenti caratterizzate da una elevata permeabilità ("**Geotermia su faglia**"), oppure
- b) aprire delle microfratture, aumentandone la porosità tra i due fondi pozzo ("**Geotermia in HDR (compatto)**").

La pressione idraulica applicata raggiunge valori in grado di fratturare la roccia, che può innescare eventi (micro-)sismici. Recenti esempi di episodi di sismicità dovuti a Geotermia di tipo EGS sono di seguito riportati:

- a) Progetti di geotermia su faglia, che hanno provocato sismicità indotta, sono per esempio [Magnitudo massima riscontrata]: St. Gallen (CH) (2013) [M=3.6]; Pohang (KR) (2017) [M=5.5].

Esempio Pohang (2017): Il concetto principale del progetto "Pohang" era la trivellazione dei pozzi di iniezione/produzione fino al raggiungimento della faglia (Figura 3, sinistra), con l'obiettivo di realizzare una connessione idraulica tra i due fondo pozzo attraverso una stimolazione (fino a 900 bar in superficie). Il fatto che: (i) 'a priori' non era stato elaborato nessun concetto per la realizzazione della stimolazione, (ii) non era operativo un sistema di monitoraggio sismico in tempo reale, (iii) non era definito un sistema a semaforo, basato su valori di soglia predefiniti, non ha consentito di osservare la microsismicità in tempo reale, utile a calibrare le pressioni di iniezione in fase di stimolazione.

Figura 3. Geotermia EGS in HDR in volume di roccia (i) con presenza di faglie, (ii) compatto (Zingg & Meier, 2019).



b) Progetti di Geotermia in HDR (compatto) che hanno provocato sismicità indotta, sono per esempio: Basilea (CH) (2006) [M3.4], Finlandia (2018) [<2.0].

Esempio Finlandia (2018): Nei dintorni di Helsinki, nell'arco temporale di 49 giorni, fu iniettato un volume di circa 18000 m³ di acqua in un pozzo geotermico trivellato nel basamento cristallino fino ad una profondità di 6.1 km. Questa stimolazione è stata monitorata in quasi-tempo reale da una rete di 24 sismometri installati in pozzo. Sulla base delle informazioni in quasi-tempo reale sul rateo di sismicità indotta, localizzazioni, magnitudo, evoluzione dell'energia sismica e idraulica, sono stati fatti variare il volume (60-90 MPa) e la pressione (400-800 litri/minuto) del fluido, evitando in questa maniera il verificarsi di un evento di M=2.0 che avrebbe fermato le operazioni di stimolazione (Kwiatek et al., 2019).

In conclusione, la realizzazione di un sistema di monitoraggio sismico in tempo reale è uno strumento necessario e indispensabile sia durante la perforazione dei pozzi, che in fase di esercizio continuo.

3. Commenti sulla definizione dei Domini di Monitoraggio

Obiettivo della presente convenzione è la definizione dei domini del monitoraggio. Recentemente sono state pubblicate due edizioni di Linee guida ministeriali Gli ILG generali (Dialuce et al., 2014) e gli ILG specifici per la geotermia (Terlizzese, 2016), che di seguito vengono brevemente riassunte:

3.1. Linee Guida Monitoraggio e autorità competente

- A seguito degli eventi sismici a Reggio-Emilia a Maggio del 2012 sono stati definiti gli Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della Sismicità, delle Deformazioni del Suolo e delle Pressioni di Poro nell'ambito delle Attività Antropiche (ILG, Dialuce, 2014). Le Linee Guida presentano gli indirizzi e i criteri generali per la formulazione delle successive prescrizioni o specificazioni da parte delle Amministrazioni competenti coinvolte, da applicare alle singole concessioni in funzione delle caratteristiche del sito e del progetto di re-iniezione, estrazione o stoccaggio.
- Nel §2 - Motivazioni e Finalità - degli ILG (Dialuce 2014) viene nominata anche la geotermia: Più in generale, le Linee Guida, opportunamente adeguate potrebbero essere adottate anche nel caso di: Geotermia tradizionale, Geotermia a ciclo chiuso, Geotermia stimolata (attività attualmente non realizzata in Italia).
- Nel 2016 sono state pubblicate "Le linee Guida per l'utilizzazione della risorsa geotermica a media e alta entalpia" (Terlizzese 2016). Nel §8 - Monitoraggio e controllo del campo geotermico, della microsismicità, della subsidenza e delle pressioni di poro - vengono proposti i criteri per la realizzazione del monitoraggio.
- Negli ILG viene precisato che "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 ... attività minerarie ...]; [il MATTM per ... la valutazione di impatto ambientale]; le Regioni per le autorizzazioni alla re-iniezione ..., nonché per la competenza esclusiva nel settore delle attività geotermiche; [... le Province ...]."
- Eccezione fanno le istanze di progetto pilota (PP): Per promuovere lo sviluppo della produzione di energia geotermica in Italia il governo ha recentemente avviato un'iniziativa per la ricerca di risorse geotermiche finalizzata alla sperimentazione di Impianti Pilota. Ad oggi, le seguenti istanze di progetto pilota (PP) con procedimento avviato sono di competenza nazionale e devono soddisfare le raccomandazioni riportate negli ILG: Castel Giorgio - Torre Alfina, Lucignano, Cortolla, Casa del Corto, Forio, Montenero, Scarfoglio, Castelnuovo di Val di Cecina.

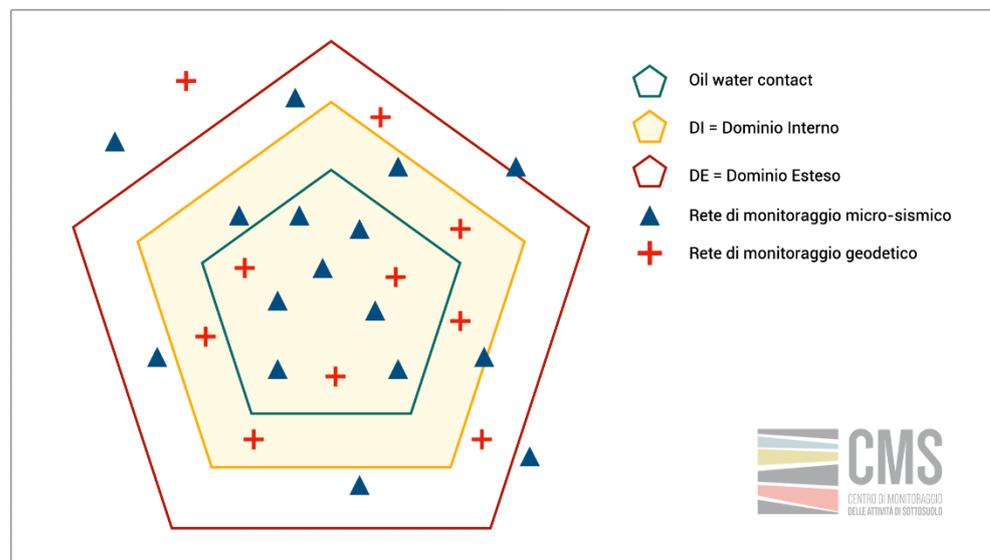
- Entrambe le edizioni di linee guida, Dialuce (2014) e Terlizzone (2016) raccomandano il monitoraggio (i) della sismicità, (ii) delle deformazioni del suolo (subsidenza) e (iii) delle pressioni di poro (pressione statica a fondo pozzo nella zona permeabile del serbatoio). L'ACS prevede esclusivamente il punto (i) di cui sopra. Nelle aree in cui venga effettuata la re-iniezione di fluidi incomprimibili, è previsto in via sperimentale un sistema decisionale a semaforo (TLS). Il sistema a semaforo prevede azioni associate a diversi livelli di attivazione, sulla base di valori di soglia di parametri monitorati, legati prevalentemente ai pattern di sismicità registrata nei domini di attenzione circostanti alle aree di concessione (vedi §7 Commenti relativi al TLS).

3.2. Definizione dei domini di monitoraggio secondo gli ILG

Gli ILG generali (Dialuce 2014) costituiscono un riferimento per tutte le attività minerarie di stoccaggio di gas naturale in sottosuolo e di coltivazione di idrocarburi, con particolare riferimento alle attività antropiche *on-shore* e definiscono i volumi sottoposti al monitoraggio detti (Figura 4):

- Dominio interno di Rilevazione (DI) = Volume prossimo al giacimento e al pozzo di re-iniezione, all'interno del quale saranno identificati, monitorati e analizzati i fenomeni di sismicità, deformazione del suolo e le pressioni di poro (giacimento più fascia volumetrica di 2-5 km);
- Dominio Esteso di Rilevazione (DE) = Volume più ampio, il cui studio è finalizzato a definire l'eventuale evoluzione nello spazio degli eventi sismici (ulteriore fascia 5-10 km). Tali volumi sono definiti diversamente in funzione del tipo di attività che si intende monitorare.

Figura 4. Schema sulla definizione dei domini di rilevazione:
<http://cms.ingv.it/direttivoordinamenti/linee-guida-ilg-2014>

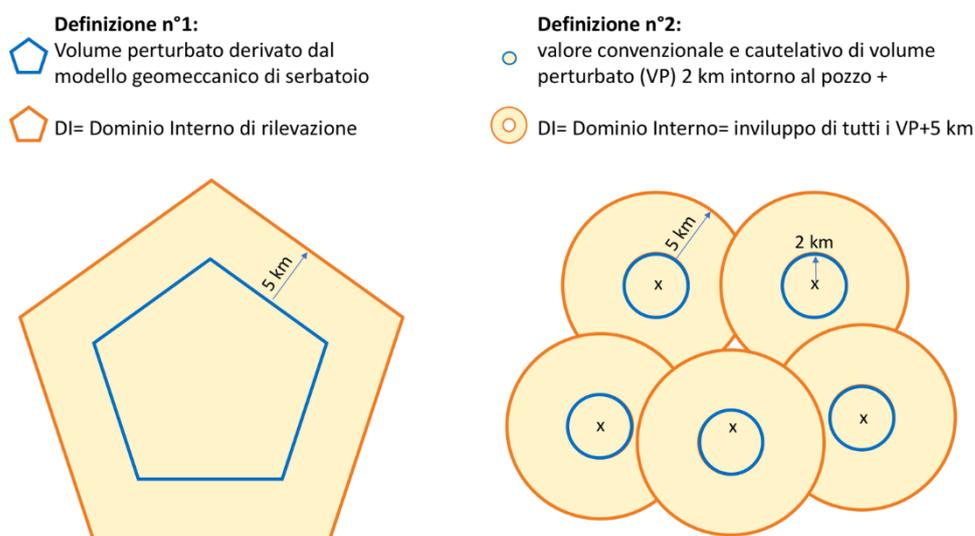


Gli ILG geotermia (Terlizzese 2016) definiscono invece i criteri per le attività di re-iniezione di fluidi geotermici, come Dominio di rilevazione, il volume all'interno del quale si ritiene che possano potenzialmente verificarsi fenomeni di sismicità indotta o di deformazione del suolo associati all'attività svolta. Per volume perturbato si intende il volume del serbatoio geotermico su cui si riflettono le attività di coltivazione in termini di volumi prodotti/re-iniettati, delle pressioni e temperature in gioco, delle caratteristiche di permeabilità e fratturazione del serbatoio.

Per la definizione del Dominio di rilevazione si individuano due diversi casi:

- 1) qualora siano disponibili i dettagli del volume perturbato ottenibili dal modello geomeccanico di serbatoio realizzato per ciascun sito, considerata anche l'estrema variabilità delle caratteristiche geologiche dello stesso, si ritiene come Dominio Interno di rilevazione per gli impianti pilota un volume che si estende fino alla superficie, coincidente con il volume perturbato (come definito dallo studio geologico preliminare) ampliato di un'ulteriore fascia che si estende ai lati e sotto fino ad una distanza di 5 km dal bordo dello stesso (fino a un massimo di 8 km di profondità);
- 2) nel caso in cui il titolare non abbia fornito informazioni per la definizione dell'estensione del volume perturbato, si ritiene come Dominio Interno di rilevazione un volume che si estende per 2 km intorno al pozzo stesso (valore convenzionale e cautelativo), ampliato di un'ulteriore fascia di 5 km da tale volume, sia lateralmente che in profondità, che tenga conto dell'incertezza generale sul volume perturbato. Entrambi i valori dovranno essere calcolati da fondo pozzo. Il Dominio Interno di rilevazione, in quest'ultimo caso, sarà costituito dall'involuppo di tutti i volumi dei pozzi del campo e si intende esteso fino alla superficie.

Figura 5. schema sulla definizione del dominio di rilevazione per la geotermia.



4. Scenari di Domini Interni di rilevazione

Al fini della definizione dei domini di monitoraggio della produzione di energia geotermica in Toscana attualmente non sono disponibili i dettagli dei volumi perturbati del modello geomeccanico di serbatoio realizzato per ciascun sito bensì soltanto le aree delle singole concessioni, istanze di concessione e permessi di ricerca. In virtù di ciò, le indicazioni degli ILG per le risorse geotermiche (Terlizzese 2016) raccomandano di prendere come base la posizione dei fondo-pozzi, complessivamente ampliato di una fascia omnidirezionale di 7 km, e di costituire il volume del Dominio Interno di rilevazione dall'involuppo di tutti i volumi dei pozzi del campo (DIP) e si intende esteso fino alla superficie.

4.1. Scenario 1: Concessioni Attive

Attualmente le informazioni sui pozzi nelle aree di Larderello e Amiata sono rese disponibili soltanto per le Concessioni Attive di ENEL (linee bianche in Figura 6). La mancanza di ulteriori dati necessita di proporre in alternativa come punto di partenza per la definizione del dominio i confini esterni delle singole concessioni (DICA) estesi di una fascia con "buffer" di 5 km (linea rossa in Figura 6).

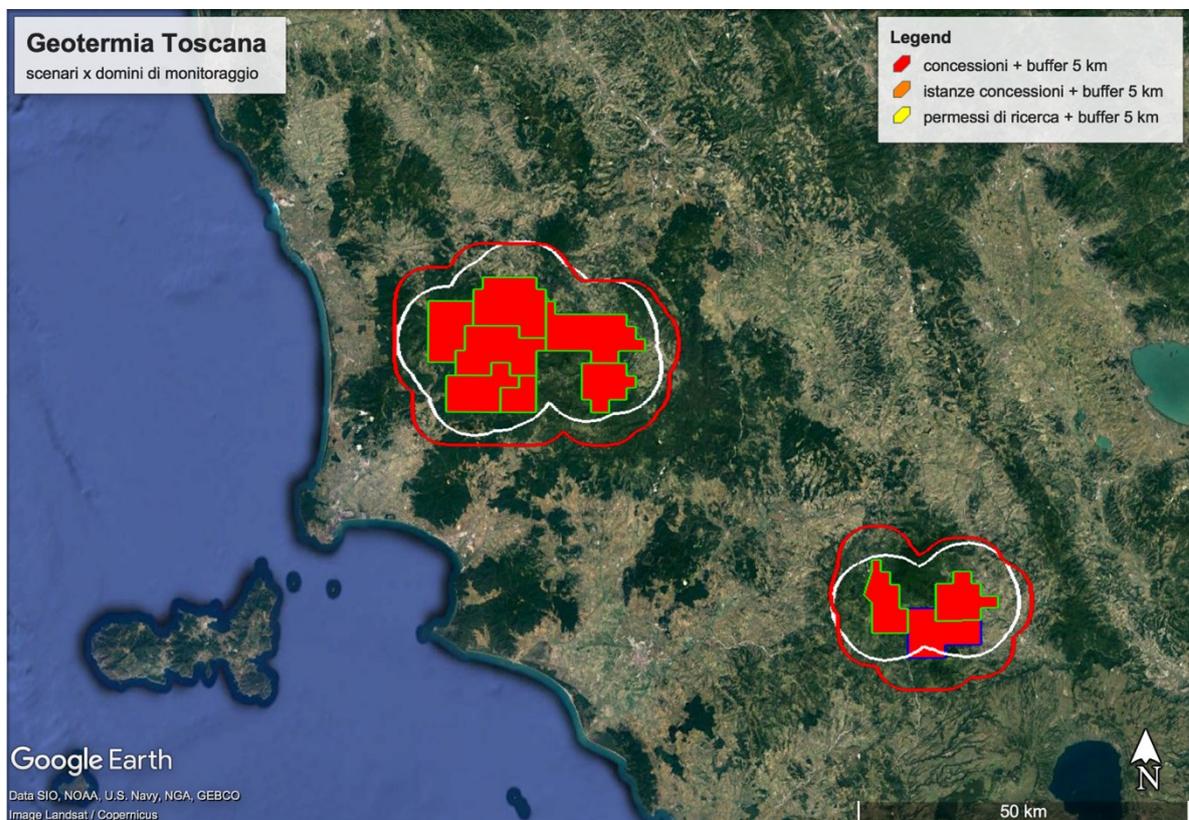


Figura 6. Proposte di Dominio Interno di rilevazione per le Concessioni Attive, basato sulla posizione dei pozzi DIP (+7 km, linea bianca) e sui confini delle concessioni DICA (+ 5 km, linea rossa).

Comparando le due proposte di DI si può notare che l'area DICA, basata sui confini esterni delle Concessioni Attive (linea rossa in Figura 6) è maggiore (soluzione più conservativa) rispetto all'area DIP che si basa sull'inviluppo di tutti i volumi dei pozzi del campo.

4.2 Scenario 2: Concessioni Attive + Istanze Concessioni

Per le aree di Larderello e Amiata, i Domini Interni di rilevazione sono composti dalle Istanze di Concessioni più le Concessioni Attive (DI_ICA), rispettivamente estesi da un'area "buffer" di 5 km, come viene rappresentato in Figura 7 (linea arancione).

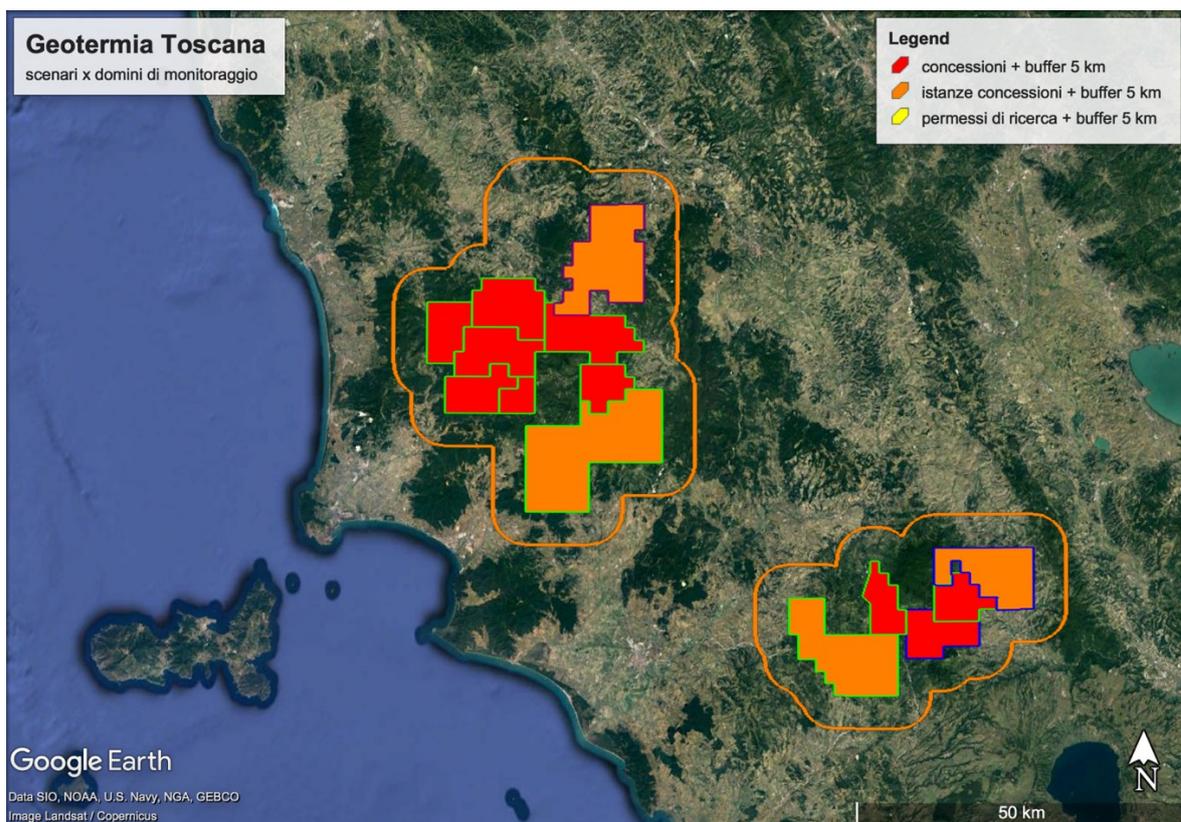


Figura 7. Dominio Interno di rilevazione per le Concessioni Attive e le Istanze di Concessione, basato sui confini delle concessioni DICA (+ 5 km, linea arancione)

Considerando che le Istanze di Concessioni potrebbero diventare operative in tempi prevedibili - ai fini di una realistica definizione dei DI - sarebbe auspicabile richiedere ai vari concessionari i dettagli sul volume perturbato del modello geomeccanico del serbatoio – oppure in alternativa – la posizione geografica dei pozzi. Tali informazioni porteranno alla ridefinizione di un DI che sarà probabilmente caratterizzato da una significativa riduzione areale rispetto al DI_ICA

4.3. Scenario 3: Scenario 2 + Permessi di ricerca

Se si considerano nella definizione del DI anche gli attuali Permessi di Ricerca, includendo quindi anche le aree occupate da questi ultimi nello scenario 2 precedentemente mostrato, si ottiene una soluzione che tende quasi a unire i Domini Interni di Larderello e Amiata (linee gialle in Figura 8). Come per lo Scenario 2, mancano le informazioni di dettaglio sul modello geomeccanico, e/o la posizione geografica dei pozzi.

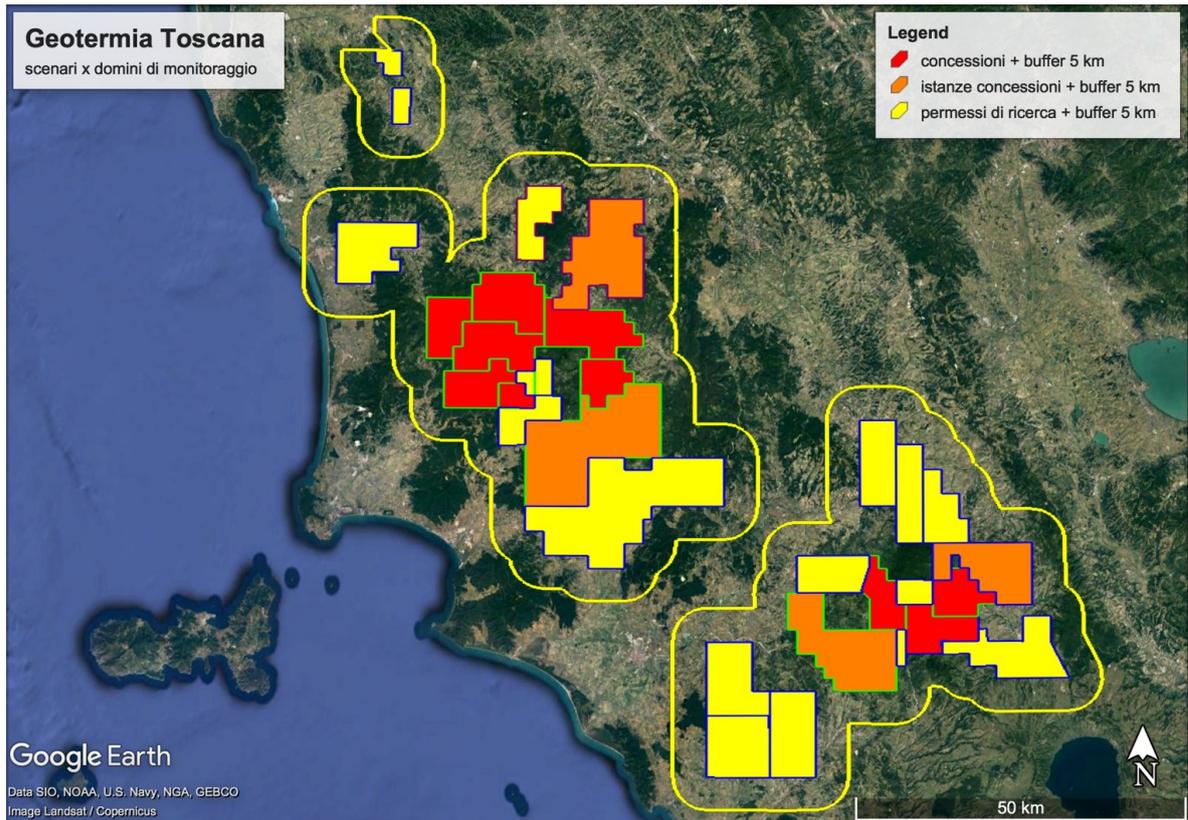


Figura 8. Concessioni, Permessi di Ricerca e Istanze di Concessioni per le aree geotermiche toscane.

5. Commenti relativi alla rete sismica integrata

5.1 Rete sismica esistente

L'ACS prevede l'installazione di stazioni sismiche integrative con l'obiettivo di infittire la rete sismica nelle aree scoperte dalle reti dei singoli operatori. Come illustrato in Figura 9 attualmente sono disponibili solamente le informazioni relative alle stazioni sismiche delle reti INGV (simboli rossi e verdi) e ENEL *Green Power* (Amiata e Larderello, simboli gialli). Ai fini di una realistica definizione di una rete sismica integrata composta da stazioni di tutti gli operatori presenti sul territorio, sarebbe auspicabile richiedere ai vari operatori con Concessioni Attive e/o Istanze di Concessioni le informazioni (station.xml: completo di coordinate geografiche, altitudine, tipo e caratteristiche tecniche di strumentazione, parametri di acquisizione) relative alle loro reti.

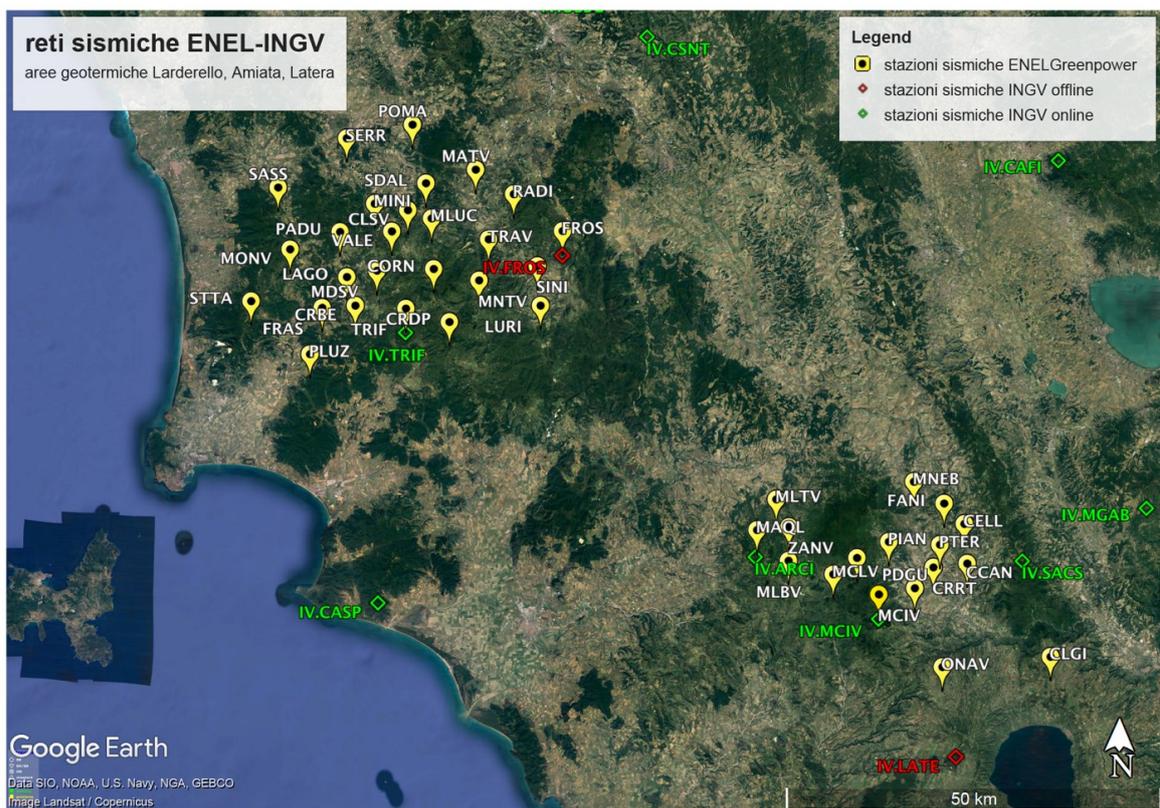


Figura 9. Mappa delle stazioni sismiche delle reti ENEL Green Power (drop-pin giallo) e dell'INGV (rombi rossi e verdi), attualmente operative nelle aree geotermiche di Larderello, Monte Amiata e Latera.

5.2. Ricerca dei siti per installazione di stazioni integrative

Sulla base dei vari scenari di domini di rilevazione (vedi §4) e delle attuali conoscenze relative allo stato delle reti sismiche operative nelle aree geotermiche toscane (Figura 10) si osserva che la zona cerchiata in azzurro non è dotata di stazioni sismiche. Quest'area divide, sia i campi geotermici di Larderello e Amiata, che la Val d'Orcia dalla pianura di Castiglion della Pescaia. Da un'ampia campagna di ricerca siti effettuata tra il 2002-2003 è stato rilevato un elevato livello di rumore e un basso rapporto segnale/rumore per entrambe le pianure, concludendo che non sono aree idonee all'installazione di stazioni sismiche (Piccinini, 2003).

Condizionati dall'attuale emergenza sanitaria dovuta al COVID-19, nella breve finestra estiva in cui era concesso effettuare missioni, è stata effettuata una prima campagna di ricognizione nell'area tra Montalcino e Castiglion d'Orcia per una prima valutazione di eventuali siti idonei all'installazione di nuove stazioni sismiche.

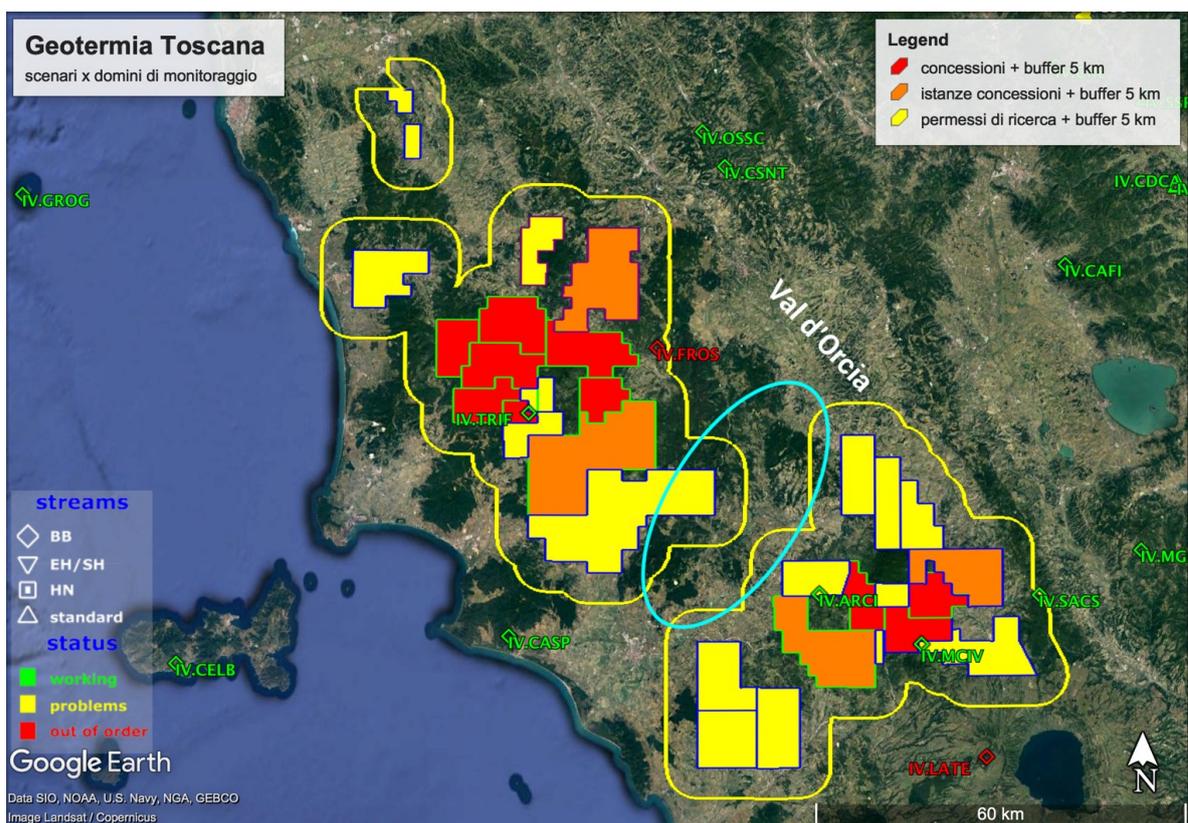


Figura 10. Proposta di un'area (linea azzurra), collocata tra i DI di Larderello-Travale e del Monte Amiata (vedi Figura 8), per l'installazione delle stazioni sismiche aggiuntive.

6. Simulazione di capacità di detezione

Il compito principale di una rete sismica locale è quello di identificare terremoti di bassa magnitudo che le reti sismiche a scala nazionale, a causa della loro scarsa sensibilità dovuta alla più larga maglia della rete, non sono in grado di localizzare. I parametri che contribuiscono alla capacità di detezione di una rete sono vari e riguardano sia le caratteristiche proprie della rete che fattori esterni alla rete stessa. Del primo gruppo di fattori fa parte sicuramente la tipologia di strumentazione utilizzata: sono preferibili sensori velocimetrici piuttosto che accelerometrici per la loro più alta sensibilità nel *range* di frequenze dei microsismi. Un altro elemento che influenza la capacità di detezione di una rete è la sua geometria ossia la distribuzione spaziale di ogni stazione sismica installata. Questi sono i due fattori più importanti da tenere in considerazione in fase di progettazione di una rete microsismica per ottimizzare le sue capacità di detezione in funzione anche dei fattori ambientali e antropici che ne peggiorano la performance. Tra questi, rientra il livello di rumore sismico ambientale (vento, pioggia, maree ecc.) e quello indotto dall'uomo (traffico veicolare, attività industriali o agricole ecc.).

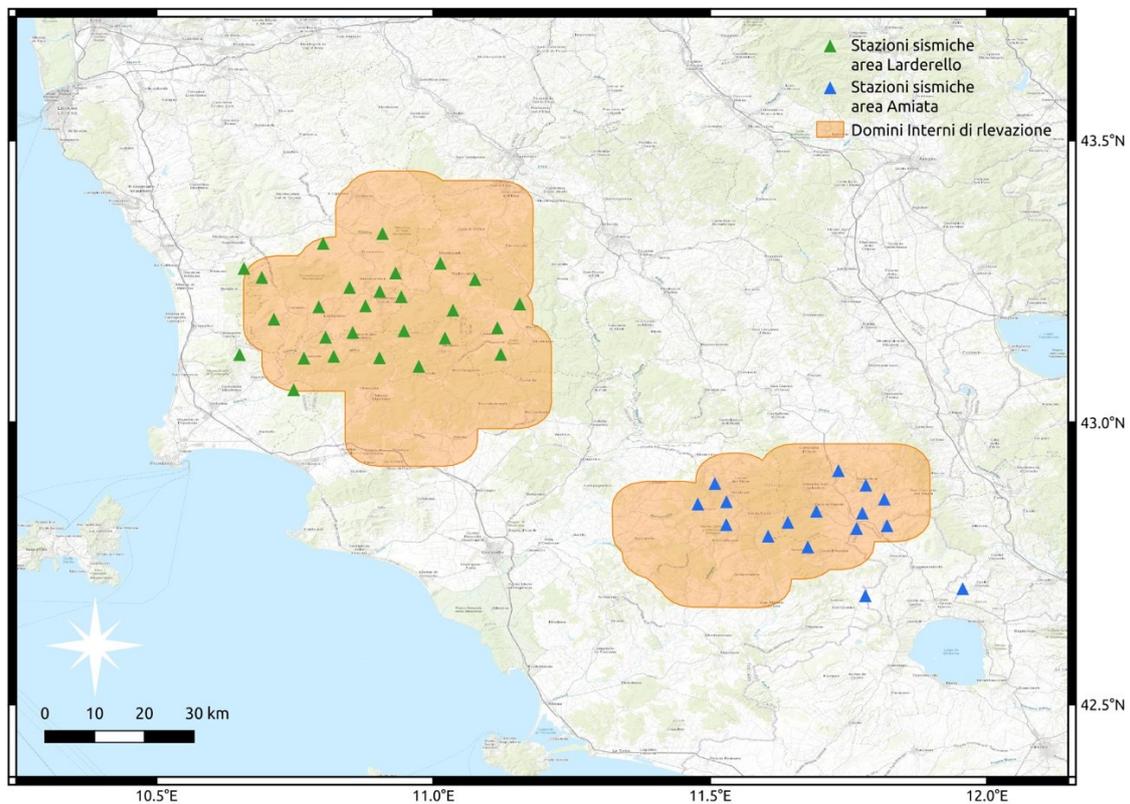


Figura 11. Mappa delle stazioni sismiche attualmente operative (Figura 9) proiettate sullo scenario DI2 (Figura 7).

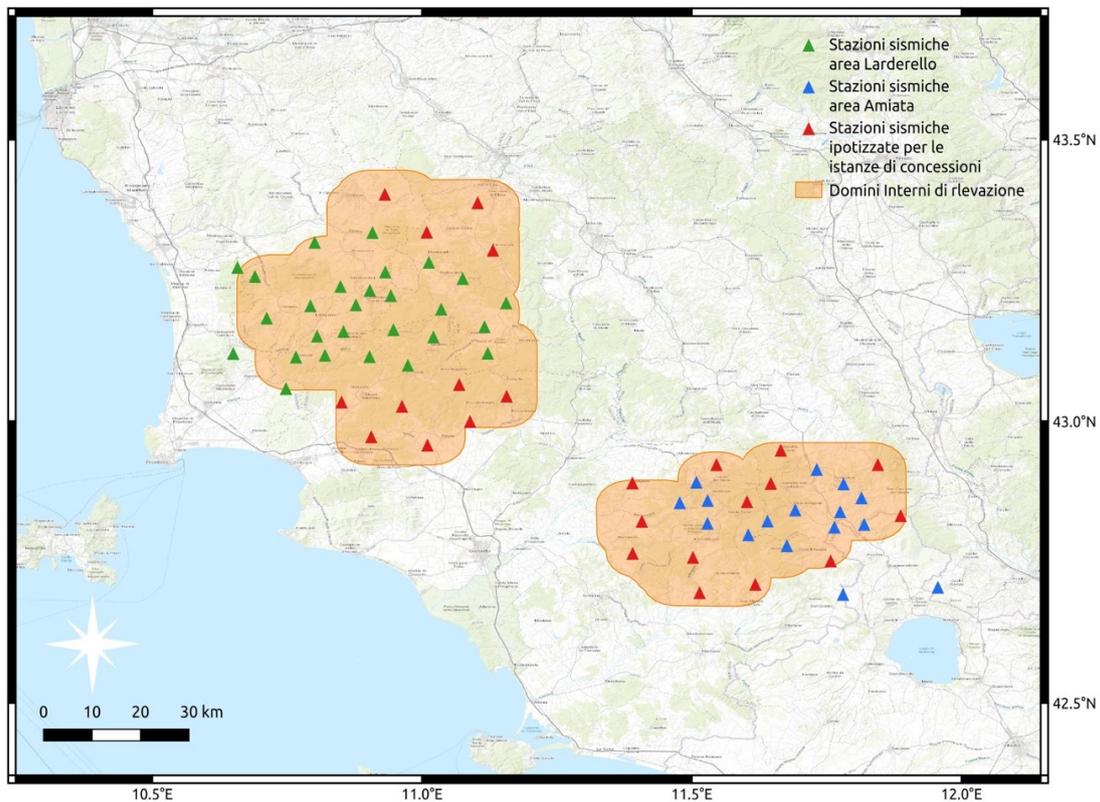


Figura 12. Proiezione sullo scenario DI2 (Figura 7) la mappa delle reti virtuali che comprende – oltre le stazioni sismiche attualmente operative - delle stazioni fittizie all'interno dello scenario di DI2 (Figura 7).

Nel caso in cui la rete sismica è già esistente, si può valutare a posteriori la sua capacità di detezione attraverso delle simulazioni numeriche e, in funzione dei risultati ottenuti, valutare l'eventualità di installare delle stazioni aggiuntive in determinati siti per migliorare le prestazioni dell'intera rete. Le simulazioni numeriche tengono conto di tutti i parametri finora elencati, assumendo una ipotetica sorgente sismica, secondo il più comunemente utilizzato modello di Brune (Brune 1970, 1971), situata ad una certa profondità all'interno del nostro dominio di interesse che genera terremoti entro un certo *range* di Magnitudo. Nel modello vengono anche inseriti parametri caratteristici della propagazione delle onde P ed S e le caratteristiche delle rocce che tali onde attraversano per determinare l'attenuazione delle onde durante il percorso. Attualmente è stato possibile solo ipotizzare delle mappe di distribuzione della capacità di detezione per la rete integrata, vista la mancata conoscenza delle caratteristiche della strumentazione delle stazioni sismiche installate e l'attuale impossibilità di utilizzare il dato prodotto da esse per definire il livello di rumore presente in ciascun sito. Quindi al momento, in mancanza di tali informazioni, le valutazioni prodotte da tali simulazioni numeriche sono molto approssimative e non sono in grado di definire esattamente la soglia minima di detezione della rete.

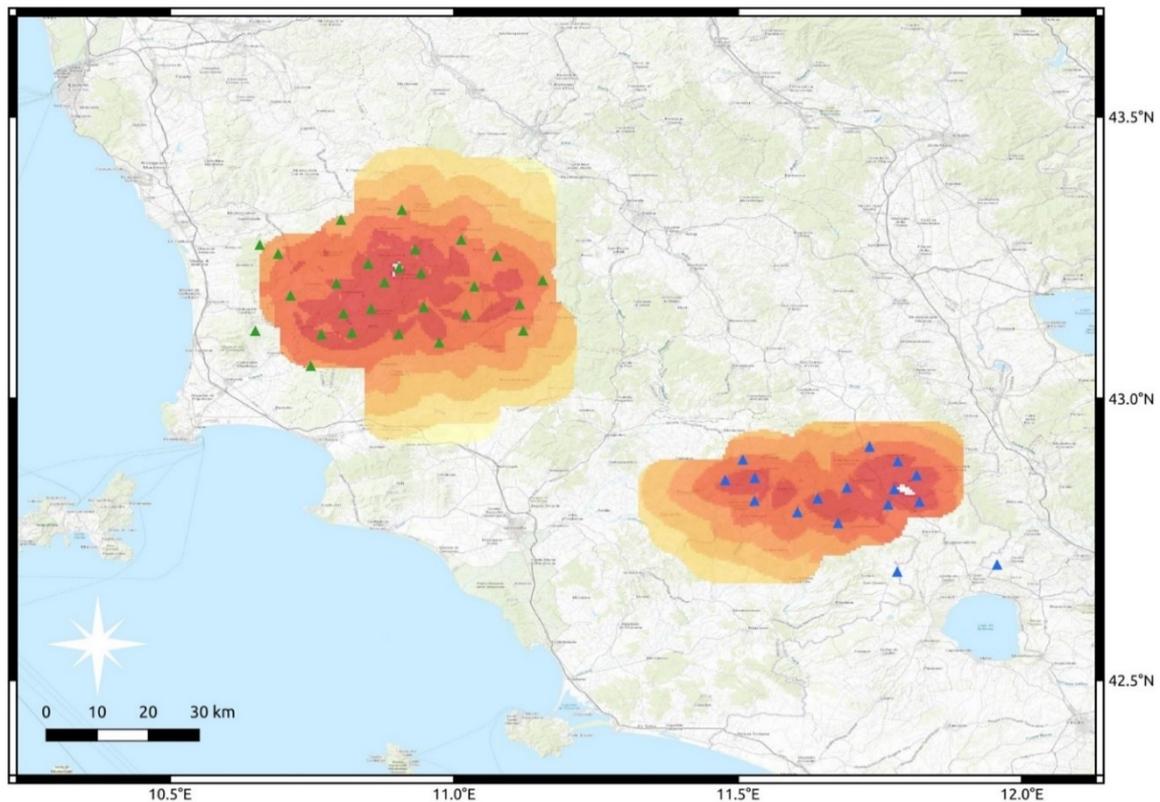


Figura 13. Risultato della simulazione di detezione sulla base della rete definita in Figura 11.

Per valutare la performance della rete sismica in termini di capacità di detezione è stato scelto di utilizzare il programma *NPEVAL* (*Network Performance EVALuation*) - un modulo del pacchetto *software SeisComp4*, programma di acquisizione e analisi dati installato presso il CAD-BO. Come accennato sono stati assunti dei parametri standard (livello di rumore sismico, caratteristiche tecniche delle stazioni ecc. vedi sopra), uguali per tutte le stazioni, sia per la rete attuale (Figura 11), come per la rete virtuale (Figura 12).

La Figura 13 e la Figura 14 mostrano rispettivamente il risultato dell'applicazione del metodo *NPEVAL* alle due configurazioni di rete sismica illustrate nella Figura 11 e nella Figura 12. Come risultato si ottengono delle mappe colorate in 7 tonalità (giallo, arancione chiaro, arancione scuro, rosso chiaro, rosso scuro). Le fasce dello stesso colore rappresentano lo stesso *range* di magnitudo di detezione ($M_{det}=0.2$). Le isolinee delimitano le fasce colorate a partire dal giallo (meno sensibile) al rosso scuro (molto sensibile) e indicano la magnitudo di detezione relativa in funzione della geometria della rete. Per facilitare l'interpretazione di tali mappe, nonostante la non-conoscenza dei parametri iniziali, possiamo assumere dei valori di base assoluti, che necessiteranno comunque di una futura calibrazione:

Assumendo per la fascia gialla una capacità di detezione di $2.2 < M_{det} < 2.4$, (i) per una rete standard e (ii) $1.2 < M_{det} < 1.4$ per una rete di alta qualità, nelle corrispondenti fasce

Tabella 1. Risultato della simulazione di detezione sulla base della rete definita in Figura 11 e in Figura 12.

Rete sensibilità standard	Rete sensibilità alta
$2.2 < M_{det} < 2.4$	$1.2 < M_{det} < 1.4$
$2.0 < M_{det} < 2.2$	$1.0 < M_{det} < 1.2$
$1.8 < M_{det} < 2.0$	$0.8 < M_{det} < 1.0$
$1.6 < M_{det} < 1.8$	$0.6 < M_{det} < 0.8$
$1.4 < M_{det} < 1.6$	$0.4 < M_{det} < 0.6$
$1.2 < M_{det} < 1.4$	$0.2 < M_{det} < 0.4$
$1.0 < M_{det} < 1.2$	$0.0 < M_{det} < 0.2$

rosse si raggiungono delle rispettive capacità di detezione di (i) $M_{det}=1.0$ e (ii) $M_{det}=0.0$. La Tabella 1 mostra quindi due possibili legende per le due reti, Figura 13 e Figura 14 in funzione dell'assunzione dei valori di base assoluti. Comparando le due figure si nota il netto miglioramento della capacità di detezione a seguito dell'inserimento di stazioni fittizie delle aree delle istanze di concessioni.

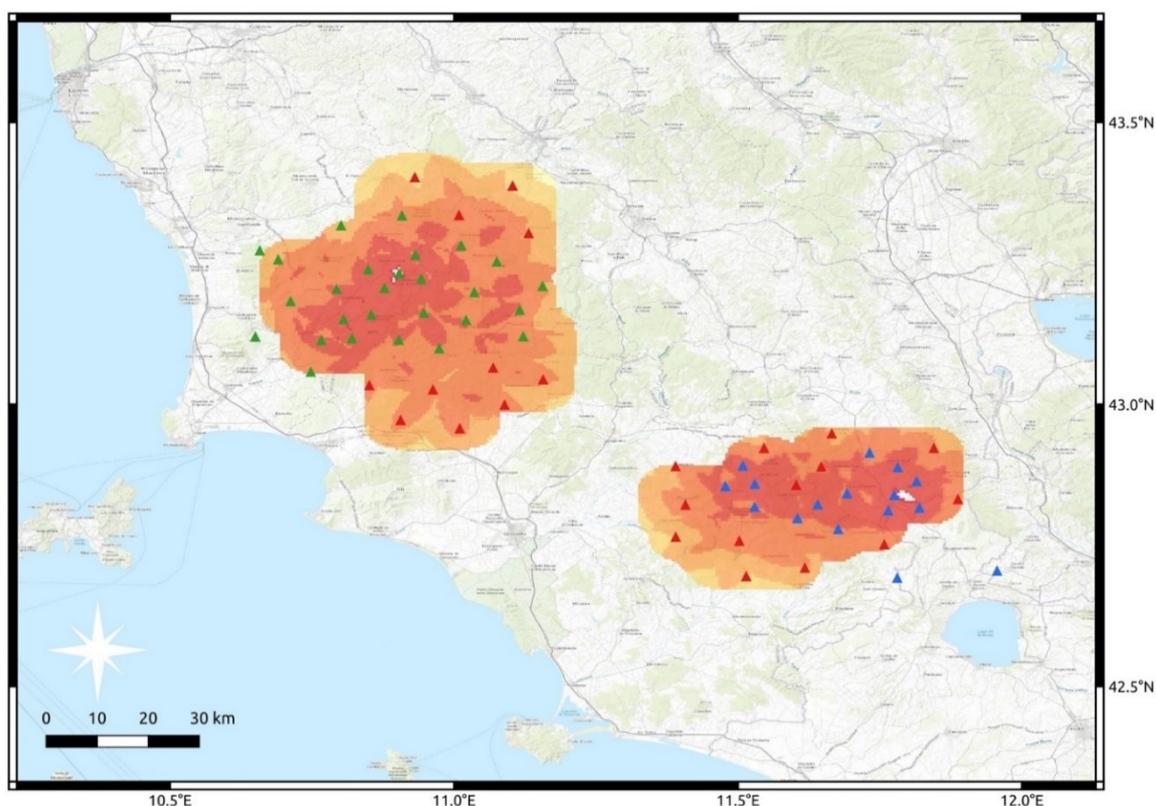


Figura 14. Risultato della simulazione di detezione sulla base della rete definita in Figura 12.

Data la relativa vicinanza delle due aree geotermiche di Larderello-Travale (NW) e del Monte Amiata (SE), può essere di interesse non limitare le mappe di capacità di detezone solamente alle aree definite nei vari Scenari di Domini di Monitoraggio, ma considerare l'intera area geotermica toscana come unica. Per farsi un'idea della distribuzione della magnitudo di detezone a livello regionale è stato calcolato uno scenario complessivo, basandosi sulla rete sismica dello scenario 2 (Figura 7), includendo anche tre stazioni virtuali come proposto nell'area cerchiata azzurro in Figura 10.

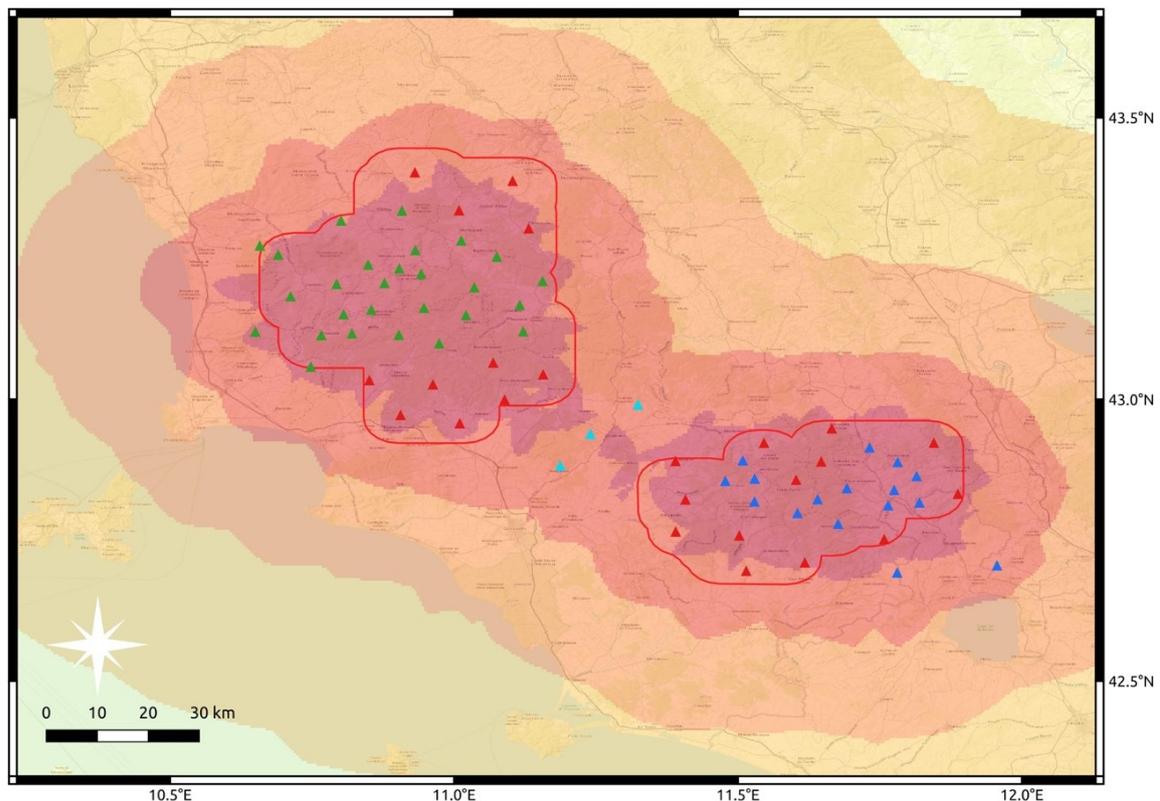


Figura 15. Risultato della simulazione della Magnitudo di detezone sulla base dello scenario 2, più tre stazioni virtuali (triangoli azzurri) posizionati tra i due domini di monitoraggio di Larderello-Travale e del Monte Amiata.

Le zone colorate in Figura 15 rappresentano le aree con lo stesso *range* di magnitudo di detezone. Mentre nella Figura 13 e nella Figura 14 ogni cambio di colore da giallo a rosso significa un abbassamento della Magnitudo di detezone di $\Delta M=0.2$, in Figura 15 la gradazione è meno definita e corrisponde all'incirca a $\Delta M=0.5$. E' importante notare che l'aggiunta di tre stazioni sismiche nell'area localizzata a metà strada tra i Domini di Monitoraggio di Larderello-Travale e Monte Amiata (triangoli azzurri in Figura 15) migliora in maniera significativa la capacità di detezone, necessaria per l'integrazione di entrambi le reti in un'unica rete sismica di monitoraggio.

7. Commenti relativi alla definizione di un sistema di semaforo

In riferimento al monitoraggio della coltivazione delle risorse geotermiche, nel §8.8 degli ILG-Geotermia viene sottolineato che in Italia attualmente *“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 individuati successivamente dal MISE”*... e continua ... *“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...”,* concludendo che ... *“Per il dominio 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.”*

La RT ha nominato il CMS-INGV come unico soggetto per il monitoraggio di tutte le concessioni di geotermia in Toscana, sulla base della sua esperienza come Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) per le concessioni di Minerbio, Cavone, Val d'Agri e Gorgoglione. Il Centro di Acquisizione Dati del CMS - creato presso la sede INGV di Bologna (CAD-BO) - gestisce attualmente i dati industriali sensibili provenienti da diversi concessionari e soddisfa il requisito *“di una profonda maturazione delle conoscenze e delle metodologie scientifiche su alcuni impianti pilota”*, come suggerito negli ILG-Geotermia (Terlizzese, 2016). IL CAD-BO è predisposto anche all’acquisizione e all’analisi dei dati che verranno forniti dai vari operatori di geotermia (Braun et al., 2020).

Per quanto riguarda la definizione di un sistema a semaforo (*TLS - Traffic Light System*), gli ILG (Dialuce et al., 2014) statuiscono che: *“Il sistema decisionale del tipo a semaforo (Figura 16) 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. [...] 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.”*

Come parametri monitorati si intendono le coordinate ipocentrali, la magnitudo, PGV, PGA, che – in caso di superamento - comportano delle decisioni operative inerenti alla gestione dei parametri di produzione da adottare in funzione dei risultati del monitoraggio. In attesa di *“un’opportuna procedura di gestione e controllo delle attività di coltivazione sulla base di adeguati livelli di attivazione (eventuale applicazione di sistemi sperimentali a semaforo),”* gli ILG-Geotermia suggeriscono intanto di far riferimento a quanto preliminarmente proposto negli ILG generali (Dialuce et al., 2014).

Figura 16. Livelli di allerta del sistema a semaforo, definiti su base dei parametri M_{max} , PGA, PGV.

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

In conclusione è importante ribadire che sia le coordinate ipocentrali che la Magnitudo non rappresentano parametri misurati, ma sono valori calcolati con procedure di calcolo affette da errori epistemici, quindi non forniscono una soluzione univoca. Nell'applicazione del sistema a semaforo, gli ILG richiedono il calcolo di tali parametri al fine di classificare il livello di allerta. Considerando che tale classificazione influisce sulla gestione della concessione e le azioni da intraprendere, è indispensabile considerare le incertezze delle soluzioni ottenute (Garcia et al., 2020).

8. Conclusioni e raccomandazioni

La coltivazione delle differenti risorse geotermiche (sistemi idrotermali, HDR) viene realizzata con metodologie differenti che hanno delle specifiche implicazioni sul sottosuolo, di cui nell'ambito dell'ACS, viene esaminata esclusivamente la parte della sismicità locale. Specie le operazioni di re-iniezione di fluidi all'interno del *reservoir* geotermico, implicano delle variazioni di pressione e/o temperature capaci di indurre eventi sismici. Nel caso dello sfruttamento di geotermia ad alta-entalpia, come praticato da decenni a Larderello e Monte Amiata, la re-iniezione non necessita di alcuna sovrappressione, mentre esperienze dal campo geotermico *The Geysers* (California/US) indicano che la causa primaria della sismicità indotta sembra essere la differenza di temperatura tra il fluido re-iniettato e quella del *reservoir* geotermico, provocando una contrazione delle rocce, che porta al rilascio di stress locali manifestandosi poi in sismicità indotta.

Soggetto dell'ACS - e in particolare della prima relazione tecnica intermedia - è l'attività propedeutica alla costituzione di una rete sismica per tutte le concessioni presenti nelle aree geotermiche toscane di Larderello e del Monte Amiata, che consiste in:

- definizione dei domini di monitoraggio (§3, §4);
- scenari di rete sismica integrata (§5);
- simulazione di capacità di detezione (§6);
- ricerca siti per le stazioni aggiuntive (, condizionato da COVID19, §5).

Per i punti di cui sopra è necessario chiedere ai vari operatori con Concessioni Attive e/o Istanze di Concessioni:

- i dettagli sul volume perturbato del modello geomeccanico del serbatoio – oppure in alternativa – le coordinate geografiche dei pozzi (§4.2);
- le informazioni relative alle stazioni sismiche (station.xml: completo di coordinate geografiche, altitudine, tipo e caratteristiche tecniche di strumentazione, parametri di acquisizione, ecc. §5.1);
- informazioni sulla qualità del dato registrato (livello di rumore sismico, spettri di potenza);
- informazioni sulle metodologie di produzione di energia geotermica (EGS)
- dati di esercizio in fase di pre-produzione e produzione;
- informazioni su caratteristiche dei fluidi di re-iniezione (pressione, temperatura, volume, rate);
- messa a disposizione di dati sismici in tempo reale del maggior numero di stazioni possibili, in maniera tale da poter impostare al CAD-BO la futura acquisizione di tali dati e anche l'attività di monitoraggio.

Considerando la durata triennale del l'ACS e considerando anche l'inizio dell'operatività prevista per Istanze di Concessioni, si propone di considerare lo scenario 2 (§4.2 e Figura 7) come ipotesi iniziale di lavoro. Tale ipotesi necessita di una accurata calibrazione, considerando le informazioni sul volume perturbato e/o la posizione geografica dei pozzi, messe a disposizione da parte dei concessionari. Sulla base di tale DI (Scenario2) sono stati calcolati due sotto-scenari relativi alla capacità di detezione, assumendo (i) esclusivamente stazioni esistenti della rete EGP e (ii) includendo anche delle stazioni virtuali distribuite nelle aree delle Istanze di Concessioni. L'attendibilità di tali scenari dipende dalle caratteristiche reali e dalla qualità delle singole stazioni sismiche e necessita di successive calibrazioni, dopo aver ricevuto le rispettive informazioni tecniche da parte degli operatori.

La costituzione di una rete integrata comporta un miglioramento della capacità di detezione degli eventi sismici in termini di magnitudo di completezza. Questo significa che anche eventi deboli (sotto la soglia di percezione umana) possono essere registrati e localizzati, che rappresenta uno strumento importante di valutazione per le operazioni di produzione solamente se paragonati con i parametri tecnici delle operazioni di produzioni/re-iniezione.

Sarà l'obiettivo dell'ACS utilizzare l'insieme dei dati a disposizione del CMS per migliorare l'attuale definizione del sistema a semaforo proposto negli ILG-generalisti (Dialuce et al., 2014) e adottati dagli ILG-geotermia (Terlizzese, 2016).

Bibliografia

- Braun T., Caciagli M., Carapezza M., Famiani D., Gattuso A., Lisi A., Marchetti A., Mele G., Pagliuca N.M., Ranaldi M., Sortino F., Tarchini L., Kriegerowski M., Cesca S. (2018a). The seismic sequence of 30th May - 9th June 2016 in the geothermal site of Torre Alfina (central Italy) and related variations in soil gas emissions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 359, 21–36; doi: 10.1016/j.jvolgeores.2018.06.005.
- Braun, T., Cesca, S., Kühn, D., Martirosian-Janssen, A., Dahm, T. (2018b). Anthropogenic seismicity in Italy and its relation to tectonics: state of the art and perspectives. *Anthropocene* 21, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2018.02.001>.
- Braun, T., Dahm, T., Krüger, F., Ohrnberger, M., 2016. Does geothermal exploitation trigger earthquakes in Tuscany? *Eos* 97, <https://doi.org/10.1029/2016E0053197>.
- Braun T., Danesi, S., and Morelli, A. (2020): Application of monitoring guidelines to induced seismicity in Italy. *J. Seismology*. 10.1007/s10950-019-09901-7.
- Braun T., Pagliuca N., Gattuso A., Mele G., Caciagli M., Famiani D., Marchetti A., Badiali L., Frepoli A., Lisi A., Carapezza M.L. (2017): Installazione della rete di monitoraggio sismico ReMoTA nell'area geotermica di Torre Alfina-Castel Giorgio (Lazio settentrionale-Umbria). *Rapp. Tec. INGV*, 370: 1-44.
- Brune, J.N., 1970. Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. geophys. Res.*, 75(26), 4997–5009.
- Brune, J.N., 1971. Correction [to "Tectonic stress and the spectra, of seismic shear waves from earthquakes"], *J. geophys. Res.*, 76(20), 5002–5002, doi:10.1029/JB076i020p05002.
- Dialuce, G., Chiarabba, C., Di Bucci, D., Doglioni, C., Gasparini, P., Lanari, R., Priolo, E., Zollo, A., 2014. Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche. GdL MISE, Roma. https://unmig.mise.gov.it/images/docs/85_238.pdf.
- Garcia-Aristizabal A., S. Danesi, T. Braun, M. Anselmi, L. Zaccarelli, D. Famiani and A. Morelli (2020): Epistemic uncertainties in local earthquake locations and implications for managing induced seismicity. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 110, 2423–2440, doi: 10.1785/0120200100.
- INGV (2001): Valutazione della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle emanazioni gassose nell'area Amiata in relazione all'utilizzazione dei campi geotermici da parte dell'ERGA. INGV, Rapporto finale, Roma 7 Marzo 2001.
- INGV (2006): Implementazione del monitoraggio sismico del territorio regionale e lo studio dei fenomeni associati alla sismicità con particolare riguardo alle zone del Monte Amiata. INGV, Rapporto finale, Roma Giugno 2006.
- INGV (2018a). Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale. Primo Rapporto 7 Luglio 2018 nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018.
- INGV (2018b). Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale. Secondo Rapporto 28 Novembre 2018 nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018.

INGV (2019). Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale. Terzo Rapporto 29 Novembre 2019 nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018.

Kwiatek, H., Saarno, T., Ader, T., Bluemle, F., Bohnhoff, M., Chendorain, M., Dresen, G., Heikkinen, P., Kukkonen, I., Leary, P., Leonhardt, M., Malin, P., Martínez-Garzón, P., Passmore, K., Passmore, P., Valenzuela, P., Wollin, C. (2019): Controlling fluid-induced seismicity during a 6.1-km-deep geothermal stimulation in Finland. *Sci Adv* 5 (5). DOI: 10.1126/sciadv.aav7224.

Locati, A., M., Camassi, R., Lolli, B., Gasperini, P. (Eds.), 2016. CPTI15, the 2015 Version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Technical Report. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia doi:<http://dx.doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>. http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_place/.

Terlizzese, F., 2016, Ottobre. Linee guida per l'utilizzazione della risorsa geotermica a media e alta entalpia. GdL MISE, Roma. <https://unmig.mise.gov.it/images/docs/linee-guida-geotermia.pdf>.

Zingg, O. and P. Meyer (2019): Zusammenfassung der Untersuchungen zum Erdbeben vom November 2017 in Pohang, Südkorea, und der Auswirkungen auf das Geothermieprojekt Haute-Sorne. *Geo Energy Suisse*. 16pp.

Elenco delle figure

FIGURA 1. RISORSA GEOTERMICA A VAPORE O AD ACQUA DOMINANTE (HTTPS://GEOTHERMALCOMMUNITIES.EU/ASSETS/PRESENTATION/2.COURSEGT.PDF).	7
FIGURA 2. SCHEMA DELLA PRODUZIONE GEOTERMICA A CICLO BINARIO.	9
FIGURA 3. GEOTERMIA EGS IN HDR IN VOLUME DI ROCCIA (I) CON PRESENZA DI FAGLIE, (II) COMPATTO (ZINGG & MEIER, 2019).	11
FIGURA 4. SCHEMA SULLA DEFINIZIONE DEI DOMINI DI RILEVAZIONE: HTTP://CMS.INGV.IT/DIRETTIVEORDINAMENTI/LINEE-GUIDA-ILG-2014	13
FIGURA 5. SCHEMA SULLA DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI RILEVAZIONE PER LA GEOTERMIA.	14
FIGURA 6. PROPOSTE DI DOMINIO INTERNO DI RILEVAZIONE PER LE CONCESSIONI ATTIVE, BASATO SULLA POSIZIONE DEI POZZI DIP (+7 KM, LINEA BIANCA) E SUI CONFINI DELLE CONCESSIONI DICA (+ 5 KM, LINEA ROSSA).	15
FIGURA 7. DOMINIO INTERNO DI RILEVAZIONE PER LE CONCESSIONI ATTIVE E LE ISTANZE DI CONCESSIONE, BASATO SUI CONFINI DELLE CONCESSIONI DICA (+ 5 KM, LINEA ARANCIONE)	16
FIGURA 8. CONCESSIONI, PERMESSI DI RICERCA E ISTANZE DI CONCESSIONI PER LE AREE GEOTERMICHE TOSCANE.	17
FIGURA 9. MAPPA DELLE STAZIONI SISMICHE DELLE RETI ENEL GREEN POWER (DROP-PIN GIALLO) E DELL'INGV (ROMBI ROSSI E VERDI), ATTUALMENTE OPERATIVE NELLE AREE GEOTERMICHE DI LARDERELLO, MONTE AMIATA E LATERA.	18
FIGURA 10. PROPOSTA DI UN'AREA (LINEA AZZURRA), COLLOCATA TRA I DI DI LARDERELLO-TRAVALE E DEL MONTE AMIATA (VEDI FIGURA 8), PER L'INSTALLAZIONE DELLE STAZIONI SISMICHE AGGIUNTIVE.	19
FIGURA 11. MAPPA DELLE STAZIONI SISMICHE ATTUALMENTE OPERATIVE (FIGURA 9) PROIETTATE SULLO SCENARIO DI2 (FIGURA 7).	20
FIGURA 12. PROIEZIONE SULLO SCENARIO DI2 (FIGURA 7) LA MAPPA DELLE RETE VIRTUALE CHE COMPRENDE – OLTRE LE STAZIONI SISMICHE ATTUALMENTE OPERATIVE - DELLE STAZIONI FITTIZIE ALL'INTERNO DELLO SCENARIO DI DI2 (FIGURA 7).	21
FIGURA 13. RISULTATO DELLA SIMULAZIONE DI DETEZIONE SULLA BASE DELLA RETE DEFINITA IN FIGURA 11.	22
FIGURA 14. RISULTATO DELLA SIMULAZIONE DI DETEZIONE SULLA BASE DELLA RETE DEFINITA IN FIGURA 12.	23
FIGURA 15. RISULTATO DELLA SIMULAZIONE DELLA MAGNITUDO DI DETEZIONE SULLA BASE DELLO SCENARIO 2, PIÙ TRE STAZIONI VIRTUALI (TRIANGOLI AZZURRI) POSIZIONATI TRA I DUE DOMINI DI MONITORAGGIO DI LARDERELLO-TRAVALE E DEL MONTE AMIATA.	24
FIGURA 16. LIVELLI DI ALLERTA DEL SISTEMA A SEMAFORO, DEFINITI SU BASE DEI PARAMETRI M_{MAX} , PGA, PGV.	26

Elenco delle tabelle

TABELLA 1. RISULTATO DELLA SIMULAZIONE DI DETEZIONE SULLA BASE DELLA RETE DEFINITA IN FIGURA 11 E IN FIGURA 12.	23
---	----