

**Accordo di Collaborazione Scientifica
Regione Toscana, INGV**

Prosecuzione del monitoraggio sismico integrato
delle aree geotermiche toscane

Responsabili di Progetto: Thomas Braun e Daniela Famiani

Autori: T. Braun, D. Famiani,
C. Bidini, M. Caciagli, M. Errico, G. Zerbinato, A. Govoni

Coordinatore CMS: G. Saccorotti

Livello attivazione	Semaforo	Magnitudo	PGV
0	verde	$M_{\max} \leq M_{\text{verde}}$	-
1	giallo	$M_{\text{verde}} \leq M_{\max} < M_{\text{giallo}}$	$PGV_{\text{verde}} < PGV$
2	arancio	$M_{\text{giallo}} \leq M_{\max} < M_{\text{arancio}}$	$PGV_{\text{giallo}} < PGV$
3	rosso	$M_{\text{arancio}} < M_{\max}$	$PGV_{\text{arancio}} < PGV$



27 agosto 2026

Indice

Elenco delle figure	3
Elenco delle tabelle	4
1 Cronistoria attività	6
2 Presupposti e Obiettivi/Considerazioni generali	9
3 Schema di Comunicazione – sistema a semaforo	10
3.1 Definizione delle Linee Guida Geotermia	10
3.2 Commenti relativi al TLS degli ILG	11
3.3 Proposta TLS per il monitoraggio sismico GeoT	13
4 Stato del monitoraggio sismico della RSI	14
4.1 Nuove stazioni a SDRP e VAIA	14
4.2 Risultato del Monitoraggio della RSI	16
5 Attività proposte	18
5.1 Attività previste dall'ACS	18
5.2 Proposta delle analisi di dettaglio dei dati sismici	18
5.2.1 Analisi array	18
5.2.2 Modello di velocità	20
5.2.3 NonLinLoc	21
5.2.4 Meccanismo sorgente sismica	22
6 Cronoprogramma e schema dei work packages	24
7 Risultati attesi	25
Glossario	26
Bibliografia	27

Elenco delle figure

3.1	TLS degli ILG originale	11
3.2	TLS ILG modificato	12
3.3	Proposta TLS per monitoraggio GeoT	13
3.4	Proposta Schema di Comunicazione	14
4.1	PPSD SDRP (IV)	15
4.2	Mappa stazioni della RSI	16
4.3	Mappa epicentri RSI (01/02/2026 - 31/07/2026)	17
5.1	Principio analisi fk	19
5.2	Principio beamforming	19
5.3	Principio detector	20
5.4	Modello di velocità	21
5.5	Soluzioni ipocentrali calcolati con NonLinLoc	22
5.6	Principio MTI	23
6.1	Pianificazione attività	24

Elenco delle tabelle

1	PGV- <i>thresholds</i> Germania	13
---	---	----

Accordo di Collaborazione Scientifica 2026 - 2029
Regione Toscana - INGV

Prosecuzione del monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane

Relazione iniziale (Relazione n. 10)

T. Braun^{1,2}, D. Famiani²,
C. Bidini^{1,2}, M. Caciagli^{1,3}, M. Errico³, G. Zerbinato³, A. Govoni⁴
e la collaborazione del Gruppo di Lavoro CMS*

- 1) INGV, Sezione Roma 1, Osservatorio di Arezzo, Italia
2) INGV, Sezione di Roma 1, Italia
3) INGV, Sezione di Bologna, Italia
4) INGV, Osservatorio Nazionale Terremoti, Roma, Italia

*Gruppo di Lavoro del CMS		
<i>Monitoraggio sismico (turnisti)</i>	<i>Servizi informatici e pubblicazione dati</i>	<i>Comitato Direttivo</i>
Camilla Bidini	Giampaolo Zerbinato	Letizia Anderlini
Alessandra Borghi	Stefano Marino	Mario Anselmi
Marco Caciagli	Paolo Perfetti	Thomas Braun
Simona Carannante	Enrico Rocchetti	Alexander Garcia
Adriano Cavaliere	Gianpaolo Sensale	Giuseppe Pezzo
Ezio D'Alema	Simone Vecchi	Lucia Zaccarelli
Michele D'Ambrosio		<i>Coordinatore</i>
Maddalena Errico		Gilberto Saccorotti
Daniela Famiani		
Irene Molinari		
Luigi Passarelli		
Francesco Pintori		
Simone Salimbeni		
Maurizio Vassallo		

Versione originale: 24 Agosto 2026

1 Cronistoria attività

In data 01/07/2020 ha avuto inizio l'Accordo di Collaborazione Scientifica (ACS) tra la Regione Toscana (RT) e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) dal titolo "COSTITUZIONE DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO SISMICO INTEGRATO DELLE AREE GEOTERMICHE TOSCANE". Tale accordo nasce dalle attività svolte nell'ambito del precedente accordo, intitolato "Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti di Enel Green Power nelle aree geotermiche di Larderello-Travale ed Amiata" (INGV, 2018 – 2021).

L'art. 2, comma 2, del presente accordo prevede un Programma di attività, articolato nei seguenti obiettivi:

- attività propedeutiche alla costituzione della rete sismica (definizione dei domini di monitoraggio, schema di scenari di rete sismica integrata, simulazione della capacità di detezione, ricerca siti nelle aree geotermiche toscane di Larderello e del Monte Amiata - GeoT);
- definizione di protocolli omogenei di 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 dei dati sismici di dettaglio, monitoraggio secondo le ILG (calcolo Localizzazione PGV, M_L), reperibilità, compilazione report scientifico in caso di evento significativo nelle aree monitorate;
- coordinamento delle attività di installazione delle stazioni sismiche finanziate da parte dei 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 Regione Toscana la prima relazione, denominata "Relazione di Inizio Attività", nella quale sono illustrati lo stato di avanzamento del progetto ed il cronoprogramma delle attività ([13]).

In data 30/11/2020 l'INGV ha trasmesso la seconda relazione, denominata "Relazione Tecnica Intermedia", relativa alla verifica della conclusione delle attività propedeutiche ed allo stato di avanzamento della rete di monitoraggio sismico ([8]).

In data 30/06/2021 è stata trasmessa la terza relazione, denominata "Prima Relazione Tecnica Annuale", dedicata alla descrizione dell'avanzamento delle attività previste dal programma ([7]).

In data 30/06/2022 è stata trasmessa la quarta relazione, denominata "Seconda Relazione Tecnica Annuale" ([6]).

In data 28/06/2023 è stata trasmessa la quinta relazione, denominata “Relazione Tecnica Finale” ([4]), che riassume tutte le attività previste e svolte nell’ambito dell’ACS ai sensi dell’art. 2, comma 2.

In data 03/07/2023 è stata avviata la proroga dell’Accordo di Collaborazione Scientifica tra la Regione Toscana e l’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia dal titolo "PROSECUZIONE DEL MONITORAGGIO SISMICO INTEGRATO DELLE AREE GEOTERMICHE TOSCANE". Tale accordo rappresenta la naturale prosecuzione delle attività sviluppate nell’ambito del precedente progetto "Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti di Enel Green Power nelle aree geotermiche di Larderello-Travale e Amiata" (INGV, 2018 – 2021)

L’art. 2, comma 2, della proroga prevede il seguente programma di attività:

- 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 significativi;
- monitoraggio e analisi dati: analisi dati sismici di dettaglio, monitoraggio secondo le ILG (calcolo Localizzazione PGV, M_L), 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;
- installazione di due nuove postazioni di monitoraggio sismico a larga banda per il miglioramento prestazionale della rete sismica integrata;
- supporto tecnico-scientifico alla Regione Toscana, nella definizione di un regolamento sul monitoraggio sismico delle aree geotermiche toscane.

In data 28/07/2023 l’INGV ha trasmesso la sesta relazione, denominata “Relazione Iniziale” ([5]), che introduce la proroga dell’ACS (2023 – 2026) e garantisce la prosecuzione senza soluzione di continuità delle attività previste nel programma di lavoro del triennio 2020 – 2023.

Con riferimento alla richiesta dell’INGV del 31/05/2024, relativa alla definizione dei domini di monitoraggio delle aree geotermiche toscane, in data 18/06/2024 la Regione Toscana ha espresso parere favorevole alla proposta presentata.

In data 30/06/2024 l’INGV ha trasmesso la settima relazione, denominata “Prima Relazione Tecnica Annuale” ([10]), che riassume le attività svolte durante il primo anno della proroga.

In data 07/07/2025 l’INGV ha trasmesso l’ottava relazione denominata “Relazione Tecnica Annuale” ([11]), nella quale sono riepilogate le attività svolte durante il secondo anno della proroga. Tra le principali attività si segnalano la trasmissione, da parte di EGP, dei file `station.xml` e dei modelli di velocità in

formato NonLinLoc, nonché il ripristino dei tunnel VPN necessari alla trasmissione in tempo reale dei dati sismici verso il Centro di Acquisizione Dati, sede INGV di Bologna (CAD-BO).

In data 01/02/2026 ha avuto inizio il monitoraggio sismico in tempo quasi reale presso il CAD-BO, con trasmissione giornaliera al Settore Sismico della Regione Toscana del bollettino sismico relativo al giorno precedente.

In data 07/07/2026 è stata trasmessa la nona relazione, denominata “Relazione Tecnica Finale” ([9]), che riassume tutte le attività previste e svolte nell’ambito dell’ACS ai sensi dell’art. 2, comma 2.

In data 28/07/2026 è stata avviata la proroga dell’Accordo di Collaborazione Scientifica tra la Regione Toscana e l’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia dal titolo "PROSECUZIONE DEL MONITORAGGIO SISMICO INTEGRATO DELLE AREE GEOTERMICHE TOSCANE". Tale accordo rappresenta la naturale prosecuzione delle attività sviluppate nell’ambito del precedente triennio (2023 - 2026) con lo stesso titolo e garantisce la prosecuzione senza interruzione delle attività previste dal programma

L’art. 2, comma 2, della proroga prevede il seguente programma di attività:

- Eventuale aggiornamento 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 per il Sottosuolo dell’INGV di Bologna e condivisione con la Regione Toscana dei dati sismici significativi;
- Monitoraggio e analisi dati: analisi dati sismici di dettaglio, monitoraggio secondo gli 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;
- Supporto tecnico-scientifico alla Regione Toscana nella definizione di un regolamento sul monitoraggio sismico delle aree geotermiche toscane.

Il presente rapporto viene quindi denominato “Relazione Iniziale, n°10”, proseguendo cronologicamente la numerazione, ai fini di sottolineare la continuità delle attività di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane. Tale “Relazione iniziale” è da trasmettere all’avvio dell’Accordo, inerente lo stato di fatto e il cronoprogramma delle attività.

2 Presupposti e Obiettivi/Considerazioni generali

Le concessioni, le istanze di concessioni e i permessi di ricerca in Toscana sono localizzate nelle aree di Larderello - Travale (LT) e del Monte Amiata (MA) e sono attribuiti a molteplici operatori (vedi fig. 23 in [4]). Nel 2020 la Regione Toscana ha deciso di centralizzare il monitoraggio e di designare un'unica SPM per tutte le concessioni della Geotermia Toscana, assegnando il compito all'INGV-CMS di creare una Rete Sismica Integrata (RSI), composta sia da stazioni INGV che da stazioni sismiche messe a disposizione dai singoli concessionari. La scelta della RT di indicare un'unica SPM per tutte le aree geotermiche in Toscana rappresenta alcuni vantaggi gestionali:

- Gestione centralizzata di: acquisizione, archiviazione, elaborazione dati;
- Database unico;
- Valutazione dei parametri di monitoraggio (in caso di superamento di una delle soglie del sistema a semaforo).
- Interlocutore unico per le comunicazioni

Per quanto riguarda le normative generali per la realizzazione del monitoraggio, attualmente non esistono linee guida specifiche da applicare alle concessioni di competenza regionale. Gli ILG [16] e le LGEO ([21]) vengono applicati per monitoraggi di competenza nazionale e definiscono come "comitato" un gruppo di rappresentanti costituito da quattro componenti, in particolare UNMIG, Regione e Concessionario, definiti come "comitato decisionale", che si avvale di INGV in qualità di Struttura Preposta al Monitoraggio – SPM (3.1).

Ad eccezione di alcuni siti pilota il monitoraggio di concessioni di coltivazione Geotermica sono di competenza regionale. Questo richiede una ridefinizione delle modalità di monitoraggio, come per esempio:

1. Definizione dei domini di monitoraggio;
2. Scelta delle discipline soggette al monitoraggio (sismicità, pressione dei pori, deformazione);
3. Definizione dei parametri di monitoraggio;
4. Definizione dei livelli di superamento (*threshold*) per i singoli livelli di allerta;
5. Designazione i membri del comitato;
6. Definizione di uno "Schema di Comunicazione" e di "Schema di Reazione".

3 Schema di Comunicazione – sistema a semaforo

3.1 Definizione delle Linee Guida Geotermia

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), pubblicati nel 2014 [16], rappresentano la prima iniziativa per la definizione dei parametri di monitoraggio geofisico per la coltivazione di idrocarburi, re-iniezione delle acque di strato e stoccaggio di anidride carbonica nel sottosuolo. Di seguito, Terlizzone [21] ha pubblicato una edizione esclusivamente dedicata alla geotermia (LGEO). Entrambe le versioni dei documenti descrivono le raccomandazioni e gli standard per il monitoraggio delle pressioni di poro, della microsismicità e delle deformazioni del suolo dove, per il solo caso di reiniezione, viene proposta l’applicazione di un sistema a semaforo automatico (*Traffic Light System* - TLS) a quattro livelli che definisce le azioni da intraprendere in caso di superamento delle varie soglie di allerta.

Il TLS è definito sulla base di alcuni parametri sismici: la magnitudo, i valori massimi di velocità (PGV) ed accelerazione (PGA) del suolo registrati. Lo schema di monitoraggio viene principalmente applicato all’interno del “Dominio”, un’area limitata intorno al volume di produzione da definire appositamente per ogni concessione, secondo le raccomandazioni degli ILG.

Il problema della gestione operativa del monitoraggio di una concessione geotermica non è solamente la definizione dei valori di soglia, utili alla definizione di uno “Schema di Comunicazione”, ma anche la definizione di uno “Schema di Intervento” da applicare in caso venisse superato uno dei livelli di attivazione del TLS. Per processi controllati dalla pressione (stimolazione), possibili interventi relativi all’iniezione del fluido potrebbero essere una diminuzione della pressione/portata o la sospensione dell’iniezione. L’interruzione di processi di iniezione, che dipendono dalla pressione, può avere un effetto immediato sulla sismicità. Al contrario, nel caso di sistemi idrotermali con pressioni operative basse, è la differenza termica del fluido iniettato nel serbatoio geotermico a causare eventuali tensioni. In tal caso, la riduzione o sospensione dell’iniezione di acqua non comporta nessun effetto immediato sulla sismicità [4, 14].

Mentre la parte tecnica del monitoraggio da realizzare dalla SPM è definita, la Regione Toscana dovrebbe avviare le procedure per valutare le proposte della SPM inerenti alle seguenti questioni:

- Composizione del comitato per le concessioni di competenza regionale (vedi §6.3.1 in [4]);
- Definizione dei confini dei domini di monitoraggio delle concessioni attive, considerando eventuali concessioni aggiuntive (vedi §6.3.2 in [4]);
- Definizione di uno "Schema di Comunicazione" (soglie di magnitudo, PGV, PGA) (vedi §7.3 in [4]);
- Eventuale definizione di uno "Schema di Reazione" sulla base dei parametri forniti dalla SPM.

L'emanazione di una disposizione relativa alle questioni di cui sopra, sia in forma di approvazione delle proposte della SPM ([4]), sia in forma alternativa è necessaria e imprescindibile per avviare il monitoraggio operativo - sebbene sperimentale - delle aree geotermiche toscane. Per completezza si ripropone quanto già riportato nel §7 della Relazione Finale n°9/2026 [9].

3.2 Commenti relativi al TLS degli ILG

La definizione di un sistema per il monitoraggio della sismicità potenzialmente indotta da attività industriali richiede l'individuazione dei seguenti elementi:

- i domini di monitoraggio;
- i parametri di monitoraggio;
- i valori di soglia (*threshold*).

Gli ILG ([16]) propongono:

I **domini di monitoraggio**, definiti come volumi crostali delimitati sulla base della distanza dai pozzi operativi, o in alternativa come zone *buffer* intorno all'estensione laterale dei giacimenti a determinate profondità.

I **parametri di monitoraggio**:

- la magnitudo (senza specificarne la tipologia);
- la PGV (*Peak Ground Velocity*), che tuttavia viene espressa in unità di accelerazione anziché di velocità;
- la PGA (*Peak Ground Acceleration*)

Gli ILG definiscono inoltre le seguenti **soglie di monitoraggio** (*threshold*):

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

Figura 3.1: Il sistema a semaforo (TLS) degli ILG, tab.4 §9.4 [16].

Per il monitoraggio sismico delle concessioni idrocarburi in Basilicata (ENI e TotalEnergies EP Italia), la SPM ha adottato le seguenti convenzioni:

- per descrivere il parametro rappresentativo della sorgente sismica è stata scelta la magnitudo locale di [3](MLbj);
- come primo intervento correttivo rispetto all'errata unità fisica attribuita alla PGV, è stato, dopo opportuna valutazione, eliminato il termine quadratico senza modificare i valori numerici, ottenendo così la seguente tabella modificata:

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

Figura 3.2: Il sistema a semaforo (TLS) degli ILG, tab.4 §9.4, modifica preliminare da SPM ([17]).

Il confronto tra il TLS degli ILG e la normativa tedesca DIN 4150-3 [1] evidenzia che la prima soglia (verde/giallo) del TLS degli ILG, corrispondente a $PGV = 4\text{ mm/s}$, risulta dello stesso ordine di grandezza delle soglie previste dalla DIN 4150-3 [1] per edifici sensibili (3 mm/s) e abitazioni (5 mm/s).

Un esempio di confronto tra le soglie definite negli ILG e i valori di M_L e PGV registrati in Basilicata è stato recentemente pubblicato in [12] (fig. 5). Nei diversi domini DR, DI e DE, il passaggio di livello (colore) del sistema a semaforo viene esclusivamente determinato dalla magnitudo e mai dalla PGV. Ciò suggerisce che i valori soglia assegnati alla PGV siano eccessivamente elevati [12].

La magnitudo locale rappresenta un parametro comparativo dell'energia sismica rilasciata alla sorgente. Poiché la M_L dipende dalla distanza ipocentrale (legata alla profondità) e dagli effetti locali, il relativo grado di incertezza può variare significativamente.

Nel caso di eventi microsismici, la PGA assume spesso valori estremamente ridotti, tanto da essere ricavata tramite derivazione della traccia velocimetrica piuttosto che mediante misurazione diretta dei sensori accelerometrici. In situazioni storiche, caratterizzate da reti di monitoraggio sismico con capacità di detezione insufficienti, si è ricorso inoltre ad osservazioni macrosismiche (percezione e danni), successivamente convertite in valori di accelerazione.

La PGV rappresenta l'unico parametro fisico con una diretta rilevanza ingegneristica ed è alla base della normativa tedesca DIN 4150-3 [1]. Tale normativa costituisce anche il riferimento per le raccomandazioni contenute nel documento programmatico elaborato dal Gruppo di Lavoro per lo studio della sismicità indotta e successivamente approvato dal Collegio di Ricerca della Fisica della Terra (FKPE – *Research College Physics of the Earth*) ([2]).

Per un intervallo di frequenza compreso tra 5 e 40 Hz, la normativa tedesca definisce le seguenti soglie:

Tabella 1: criteri dei valori threshold e PGV associati secondo la norma tedesca ([2])

criterio threshold	PGV threshold.
livello massimo di rumore ambientale (95%):	$v = 0,001\text{mm/s} = 1\mu\text{m/s}$;
ampiezza sismica verticale min. di rilevamento (V):	$v = 0,006\text{mm/s} = 6\mu\text{m/s}$;
ampiezza sism. orizzontale min. di rilev. (H=V×5):	$v = 0,030\text{mm/s} = 30\mu\text{m/s}$;
soglia di percezione:	$PGV \geq 0.3\text{mm/s}$;
DIN 4150-3 evento rilevante per edifici sensibili:	$PGV \geq 3\text{mm/s}$;
DIN 4150-3 evento rilevante per abitazioni:	$PGV \geq 5\text{mm/s}$;
area di influenza: intensità $I \geq V$ (EMS-98):	$PGV \geq 5\text{mm/s}$;
sisma con obbligo di segnalazione $I \geq IV$:	$M_L \geq 2oPGV \geq 1\text{mm/s}$.

In Germania i sistemi TLS non si avvalgono del parametro della PGA e si basano principalmente sulla PGV (DIN 4150-3 [1]), integrato dal calcolo della magnitudo locale. Su questa base sono stati definiti dei TLS particolarmente restrittivi; ad esempio, in Renania-Palatinato il superamento della soglia di percezione pari a $PGV = 0,3\text{mm/s}$ comporta già il passaggio al livello giallo.

Il confronto con gli ILG suggerisce pertanto che le soglie adottate risultano superiori di circa un ordine di grandezza rispetto agli standard tedeschi. Una soglia verde/giallo fissata a $PGV = 4\text{mm/s}$ appare pertanto arbitraria e potrebbe essere più coerentemente associata alla soglia successiva (giallo/arancione), portando allo schema illustrato nel §3.2.

3.3 Proposta TLS per il monitoraggio sismico GeoT

Il presente paragrafo riprende la proposta TLS per il monitoraggio della Geotermia Toscana pubblicata nel §8 degli "Esempi nel mondo di sismicità indotta dalla produzione geotermica: considerazioni e proposte di monitoraggio sismico" ([14]). Il sistema a semaforo proposto nella fig. 25 del lavoro originale associa all'intensità macrosismica valori di PGA errati. In seguito, la necessaria correzione è stata trasmessa all'Editor sotto forma di "errata corrige". Di seguito sono riportate la versione revisionata del TLS (3.3) e l'associato "Schema di Comunicazione" (3.4). Per approfondimento si consiglia la consultazione del recente articolo ([12]).

competenza	Livello	Magnitudo ML	PGV [mm/s]	Intensità EMS-98
concessionario	0 - ordinario	< 1.0	< 0.1	I
	1 - ordinario	1.0 < 2.0	0.1 < 1	I
	2 - attenzione	1.0 < 2.0	0.1 < 1	II - III
Ufficio Miniere Comitato	3 - attenzione	≥ 2.0	1.0 ≤ 4.9	≥ IV
	4 - allerta	≥ 2.0	≥ 5.0	> V
	5 - allerta	≥ 2.0	≥ 5.0	≥ VII

Figura 3.3: Proposta di un sistema a semaforo da applicare al monitoraggio GeoT, modificato dal [14], fig. 25 §8.

Lo Schema di Comunicazione è suddiviso in diversi livelli:

i livelli 0, 1 e 2 (verde e giallo) comprendono gli eventi sismici rilevati strumentalmente con magnitudo $M_L < 2.2$ che devono essere comunicati al concessionario. I livelli superiori includono tutti gli eventi sismici di maggiore entità, identificati sulla base della magnitudo, della PGV o del risentimento macrosismico, che devono essere notificati all'ufficio miniere della Regione. Oltre allo schema "bavarese" viene proposto (come colore arancione) l'introduzione del criterio previsto dalla DIN4150-3 [1], che segnala il possibile verificarsi di eventuali danneggiamenti a strutture.

La SPM avrebbe il compito di effettuare le comunicazioni secondo il seguente schema:

0/1- Ordinario: segnalazione al Concessionario, eventi non percepiti con $M < 2.0$; $I_{EMS98} = I$; $PGV < 1. \text{mm/s}$
2 - Attenzione: segnalazione al Concessionario, eventi percepiti con $M < 2.0$; $I_{EMS98} = II - III$; $PGV < 1. \text{mm/s}$
3 - Attenzione: segnalazione al Comitato/UC, eventi percepiti con $M \geq 2.0$; $I_{EMS98} \geq IV$; $1 \leq PGV \leq 4.9 \text{ mm/s}$
4 - DIN 4150-3 con segnalazione al UM/Comitato, eventi percepiti $M \geq 2.0$; $I_{EMS98} > V$; $PGV \geq 5.0 \text{ mm/s}$
5 - Allerta Rossa con segnalazione al UM/Comitato eventi percepiti $M \geq 2.0$; $I_{EMS98} \geq VII$; $PGV \geq 5.0 \text{ mm/s}$

Figura 3.4: Proposta di "Schema di Comunicazione" da applicare al monitoraggio Geotermia Toscana, modificato da [14], §8.

Tale schema può costituire la base per lo sviluppo di uno Schema di Reazione e potrà risultare utile per la definizione delle future linee guida regionali per il monitoraggio delle attività geotermiche.

4 Stato del monitoraggio sismico della RSI

Come descritto nella "Relazione Tecnica Finale n° 9" [9], la costituzione della Rete Sismica Integrata, può essere considerata terminata e funzionante. La fig. 4.2 mostra oltre alle 14 (+4) stazioni della Rete Sismica Nazionale dell'INGV (RSN) cerchi gialli) e alle nuove stazioni installate nell'ambito della precedente convenzione (MALArray, SDRP, VAIA, AROB; cerchio azzurro), il Centro di Monitoraggio per le attività di sottosuolo (CMS) riceve presso il CAD-BO anche i flussi dati di tutte le (13+4) stazione sismiche a 3 componenti (triangoli viola), come previsto dagli ILG [16].

4.1 Nuove stazioni a SDRP e VAIA

Periodicamente vengono calcolati i diagrammi di densità spettrale di potenza (PPSD - *Probability Power Spectral Density*) per le stazioni della Rete Sismica Integrata, ai fini di verificare il corretto funzionamento della strumentazione e di valutare il livello assoluto dell'energia sismica, garantendo che le ampiezze delle registrazioni siano corrette, requisito indispensabile per il calcolo della PGV e della magnitudo.

La figura 4.1 riporta gli spettri di potenza calcolati su 15 giorni di rumore sismico registrato per le tre componenti (E-W, N-S, Z-verticale). Le curve in grigio rappresentano rispettivamente il massimo (NHNM - *New High Noise Model*) e minimo (NLNM - *New Low Noise Model*) livello di ampiezza di riferimento proposto da Peterson ([19]). Le PPSD sono espresse nell'unità fisica $[accelerazione^2 / frequenza = (m^2/s^4)/Hz]$. Un livello di energia sismica più basso corrisponde ad una migliore qualità del sito; in tal caso le curve colorate risulteranno più vicine alla curva grigia inferiore (NLNM). Variazioni significative, soprattutto nella parte dei periodi bassi (alte frequenze), sono spesso causate da fluttuazioni del rumore sismico antropico nel corso della giornata.

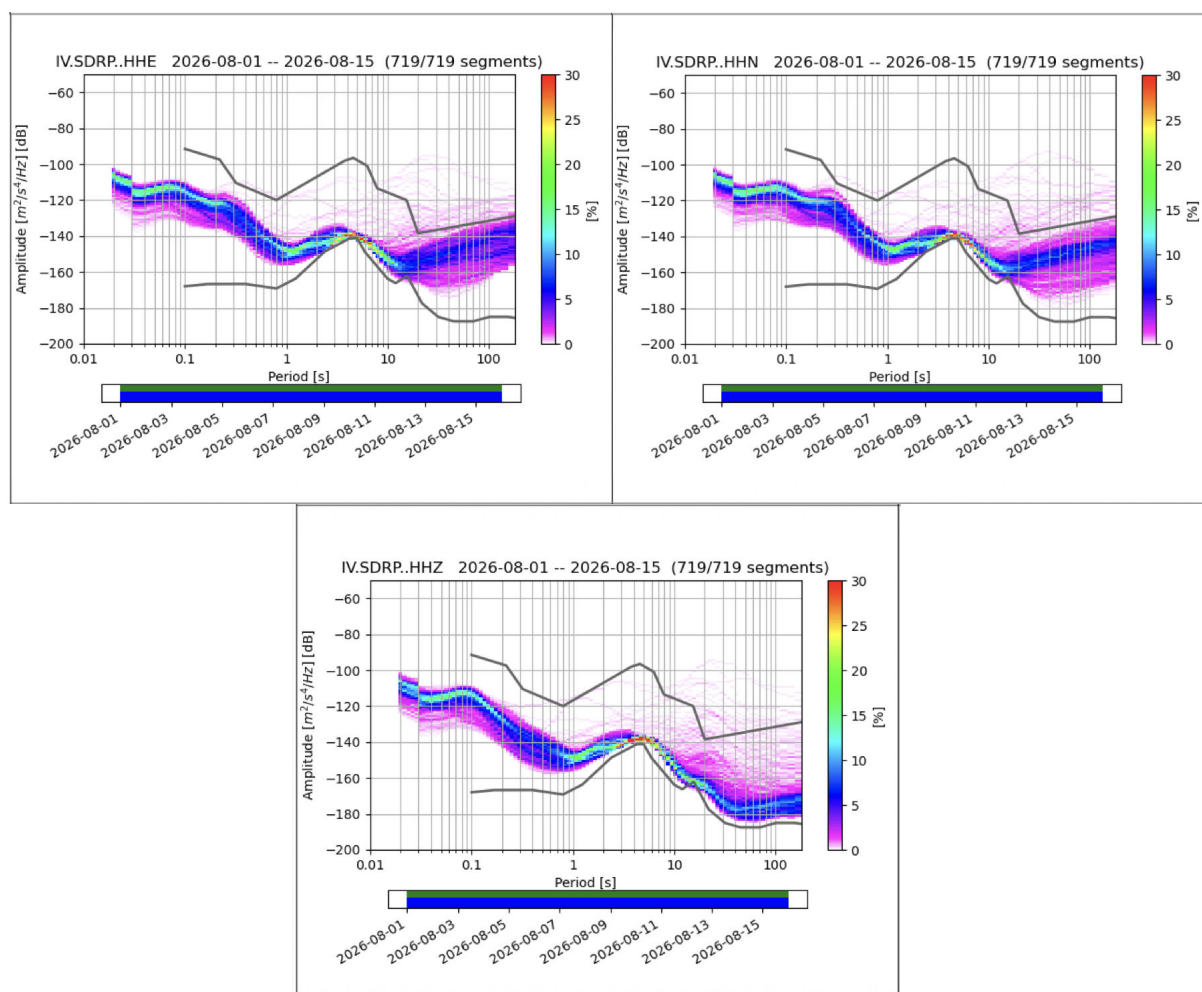


Figura 4.1: Esempi di PPSP delle componenti E [sx], N, [dx] e Z [in basso] per monitorare la qualità dei dati registrati dalla stazione SDRP.

La fig. 4.1 mostra il grafico PPSP aggiornato per la nuova stazione SDRP a 6 canali, installata a Serre di Rapolano (vedi §2.3.2 e 4.4.2 in [9]) e conferma la straordinaria qualità del sito,

La conclusione dei lavori di monumentazione del sito VAIA (vedi §2.3.3 e 4.4.3 in [9]) sono previsti entro l'autunno 2026.

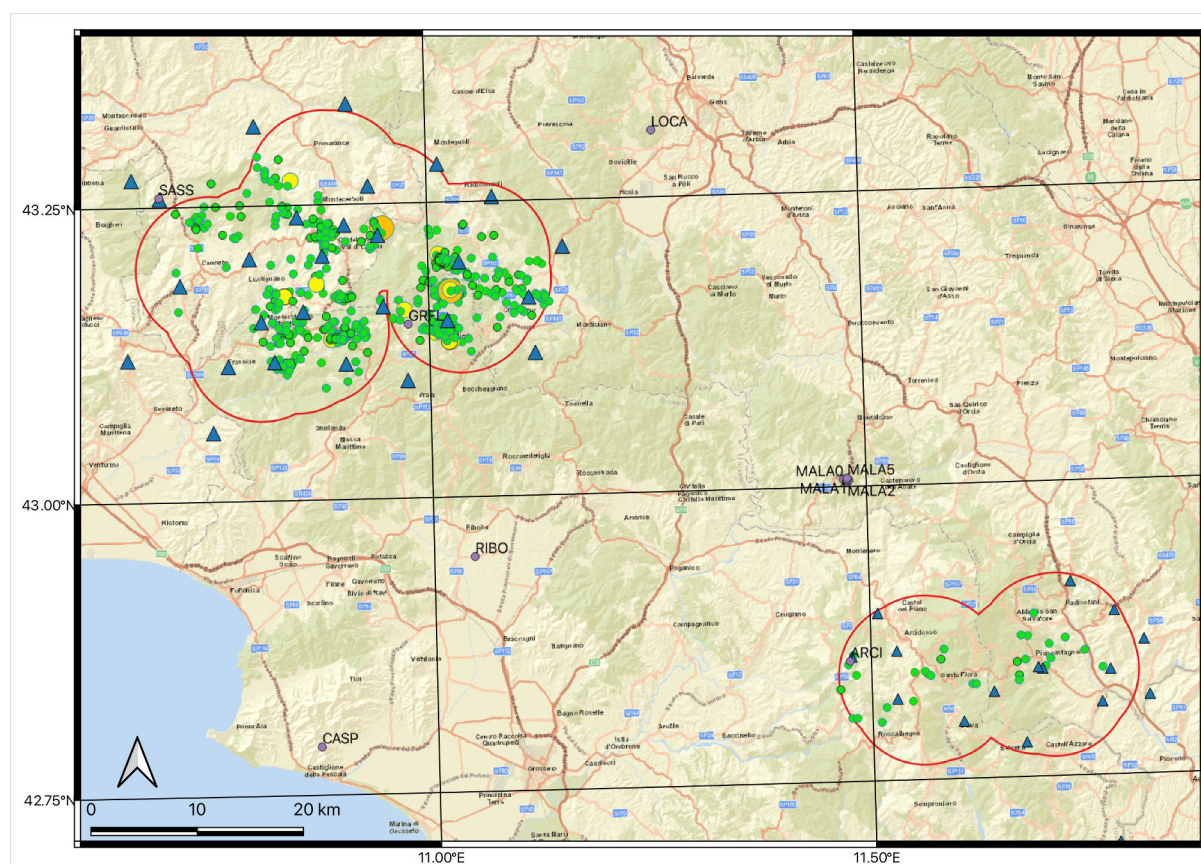


Figura 4.3: Eventi sismici (01/02/2026 - 31/07/2026) localizzati dalla RSI all'interno dei domini di rilevamento DR_LARD e DR_AMIA.

Concludendo, si può constatare

- che il sistema di monitoraggio è pienamente operativo;
- che è opportuno proseguire le attività di monitoraggio e il potenziamento della rete;
- che viene proposta l'adozione di uno "Sistema a semaforo" per supportare la gestione operativa della sismicità nelle aree geotermiche e migliorare la comunicazione con gli enti competenti.

La presente relazione evidenzia il successo del progetto di integrazione delle reti sismiche, il significativo miglioramento della qualità del monitoraggio e la disponibilità di un sistema affidabile per il controllo della sismicità nelle aree geotermiche toscane, ponendo le basi per un monitoraggio stabile e continuativo negli anni futuri.

5 Attività proposte

5.1 Attività previste dall'ACS

Come menzionato nelle relazioni n°1/2020 [13] e n°6/2023 [5], la coltivazione multi-concessione delle aree geotermiche toscane di Lardello - Travale e Monte Amiata richiede la realizzazione di un monitoraggio in tempo reale integrando le varie reti sismiche attive nell'area.

Obiettivo principale del secondo triennio dell'ACS tra RT e INGV (2023 - 2026) era la realizzazione del monitoraggio integrato in tempo quasi reale, come previsto dagli ILG [16]. Tale monitoraggio è operativo a partire dal 1 Febbraio 2026.

Le attività previste dall'attuale ACS sono elencate di seguito:

- Acquisizione in tempo reale dei dati della RSI presso CAD-BO;
- Analisi di dettaglio dei dati sismici
- Monitoraggio secondo ILG (calcolo ipocentro, PGV, ML), reperibilità
- Redazione di un bollettino sismico mensile
- Redazione di una relazione tecnico-scientifica in caso di evento significativo nei DR
- Divulgazione dei risultati

Il seguente paragrafo specifica in dettaglio gli obiettivi proposti nell'ambito delle "analisi di dettaglio"

5.2 Proposta delle analisi di dettaglio dei dati sismici

5.2.1 Analisi array

Avere a disposizione un array consente, in caso di evento sismico, di poter calcolare il *backazimuth* e la velocità apparente (*slowness*) del fronte d'onda da esso generato, oltre ai tempi di arrivo delle fasi P e S della traccia del *beam*. Queste capacità possono tornare molto utili in caso dell'analisi della microsismicità per eventi locali di magnitudo molto bassa (vedi fig. 5.1). Un ulteriore vantaggio consiste nel processamento dei dati in modalità *detector* (rivelatore), attraverso l'uso di *beamforming*, *filtering* (filtraggio) e l'applicazione di un trigger STA/LTA, che entra in funzione una volta identificate fasi sismiche coerenti che si propagano lungo le diverse stazioni che costituiscono l'array.

Nel ***beamforming*** i segnali registrati da vari sensori vengono ritardati e sovrapposti (*delay & sum*, vedi fig. 5.2) L'obiettivo è di trovare i "migliori" tempi di ritardo (*delay times*) che, se applicati alle singole tracce registrate, consentono di massimizzare le ampiezze del beam (raggio risultante), grazie all'interferenza coerente dei segnali ([20]).

Il ***filtering*** da applicare dipende dal contenuto spettrale del segnale sismico.

Il principio di funzionamento di un **detector** sismologico consta nella stima della potenza del segnale all'interno di un intervallo temporale lungo (LTA - *Long Term Average*) e di un intervallo breve (STA - *Short Term Average*).

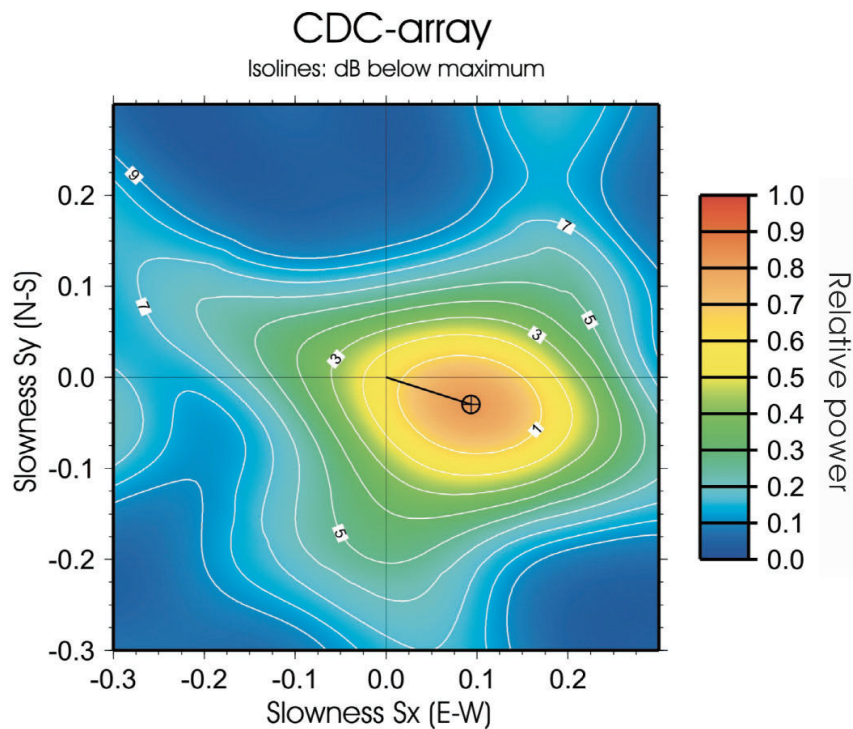


Figura 5.1: Analisi f - k sulla base di nove tracce verticali filtrate con filtro passa banda (2.0-4.0 Hz) di un evento locale verificatosi ad una distanza di 27 km e una profondità di 24 km rispetto all'array (relative power= 0.86; apparent velocity = 10.0 km/s; backazimuth = 107.4°; from [15]).

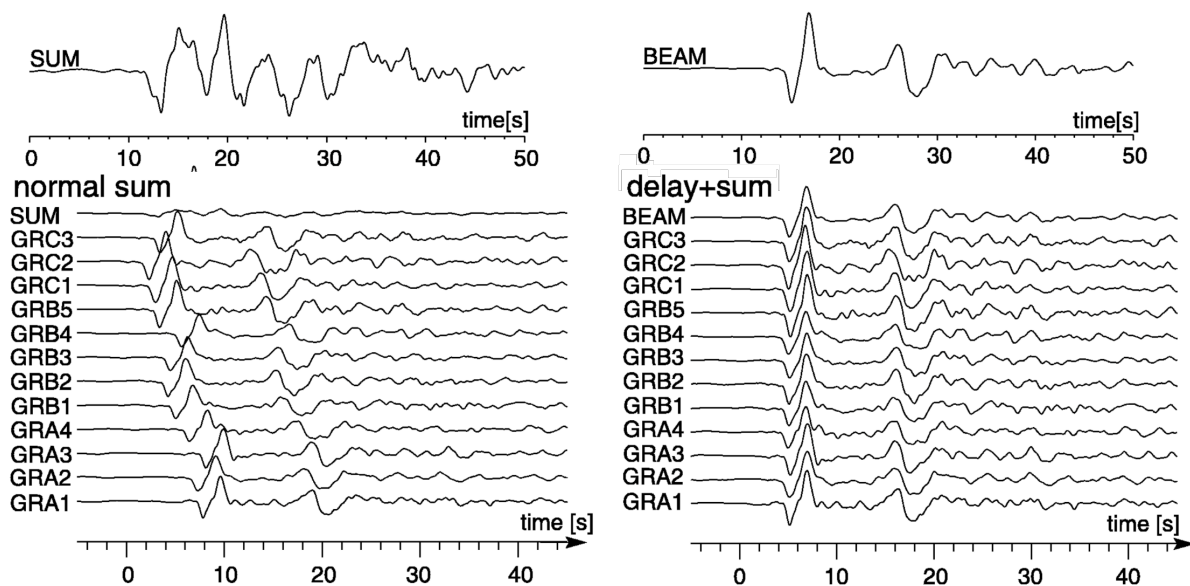


Figura 5.2: Beamforming, applicando lo stacking delle singole tracce dell'array a seguito di shift temporale (esempio GRF/DE, da [20]).

Il rapporto tra le due grandezze (STA/LTA) che corrisponde al rapporto segnale rumore (SNR - *signal-to-noise ratio*), viene poi comparato con un livello pre-settato (*trigger threshold*). Il risultato viene chiamato TRUE in caso di superamento di tale livello, FALSE in caso contrario (dettagli da consultare a [20])

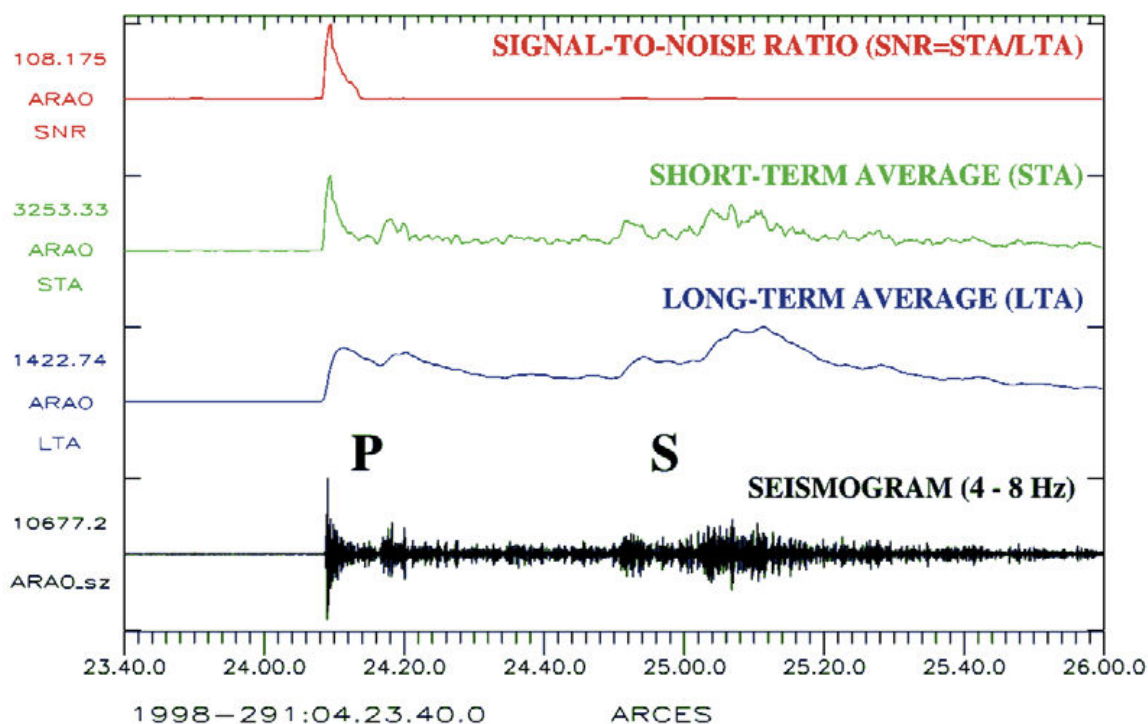


Figura 5.3: Tracce STA LTA (SNR), STA ed LTA di un sismogramma regionale registrato dalla stazione ARAO dell'array ARCES (NO). Il sismogramma è stato filtrato con un passabanda tra le frequenze 4 e 8 Hz. La fase P del primo arrivo ha un SNR di oltre 100 (da [20]).

5.2.2 Modello di velocità

Per il calcolo ipocentrale il pacchetto di software SeisComP, utilizzato dal CMS per il monitoraggio sismico, si avvale dei codici Hypo71 e LocSat, che si basano su modelli di velocità 1D. L'implementazione di un codice più recente, come per esempio NonLinLoc, offre l'opzione di implementare modelli di velocità multidimensionali (5.2.3).

Come primo approccio sono stati definiti due modelli di velocità 1D, a sette strati ciascuno, predisposti per il monitoraggio delle concessioni Larderello e Monte Amiata (vedi Fig. 4.7 del report n° 7 ([10])). Tali modelli monodimensionali sono essenziali per implementare un localizzatore automatico con il compito di fornire parametri ipocentrali preliminari. Per il calcolo di una soluzione ipocentrale definitiva è necessario avvalersi di un modello di velocità più accurato possibile.

Codici per il calcolo ipocentrale, come per esempio Hypoellipse, offrono la possibilità di utilizzare modelli di velocità 1D differenti per ogni singola stazione. In tal caso l'intero volume crostale interessato viene rappresentato da

una combinazione di molteplici modelli 1D (pseudo-2D). EGP, che per il calcolo ipocentrale si avvale storicamente di Hypoellipse, ha suddiviso le aree di Larderello/Travale e Monte Amiata in 10 differenti modelli di velocità (Figura 4.3 del report n°8, [11]). Considerando che attualmente non esistono plugin che consentano l'implementazioni di Hypoellipse in SeisComp, si propongono i seguenti approcci:

- Creazione di un modello pseudo-2D, basato sulla combinazione dei singoli modelli di velocità 1D
- Creazione di un modello di velocità 3D ex-novo basato su dati geologici, linee sismiche e dati di pozzo

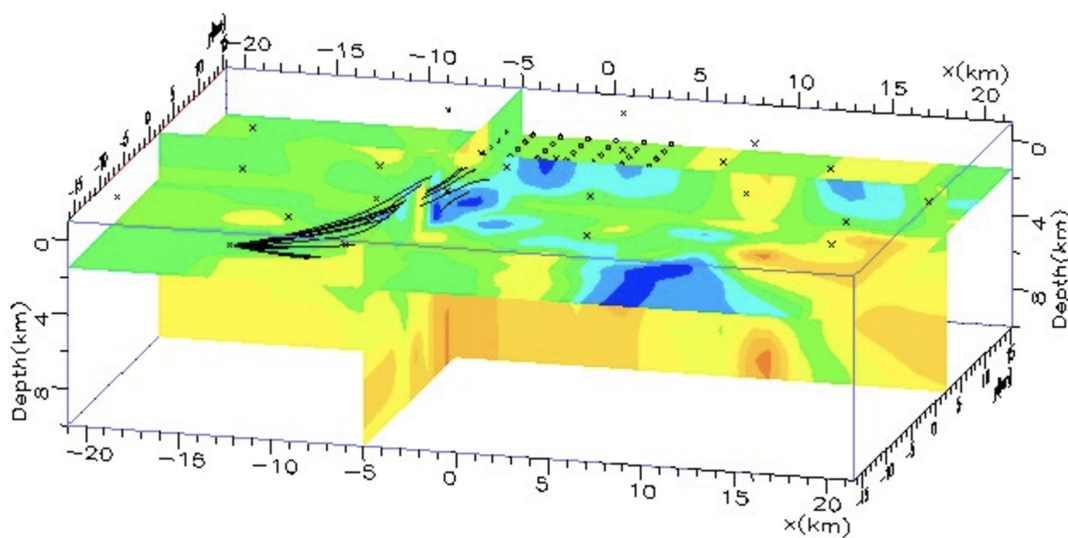


Figura 5.4: Esempio di percorso dei raggi sismici all'interno di un modello di velocità 3D

Il contributo principale per l'analisi dei dati sismici di dettaglio è la definizione di entrambi i modelli di velocità e la loro implementazione in NonLinLoc (vedi § 5.2.3).

5.2.3 NonLinLoc

Di seguito un esempio di localizzazione con il codice NonLinLoc di un evento sismico registrato in Basilicata.

In un caso idealistico, la procedura di localizzazione ipocentrale determina la funzione di densità di probabilità (location-PDF) di tutte le possibili soluzioni non linearizzate. Tale location-PDF quantifica l'omologia tra i tempi d'arrivo teorici e osservati, in relazione alle incertezze, e formula una soluzione completa e probabilistica. L'implementazione di NonLinLoc (NLL) in SC4 prevede:

- La definizione dell'area del modello di velocità per la configurazione di una griglia 3D (grid) del volume crostale (fig. 5.4).

- Vel2Grid: assegnazione delle velocità ai vari elementi del grid 1D o 3D
- Grid2Time: calcolo delle *traveltime* per ogni coppia “stazione-gridpoint”.
- Inversione NLL: vedi esempio (fig. 5.5).

La fig. 5.5) mostra il risultato dell'inversione con NonLinLoc di un evento localizzato in Basilicata. Mentre la soluzione Hypo71, calcola una profondità di 10 km +/- 1 km e un RMS di 0.27 s, il massimo della location-PDF calcolato con NLL risulta ad una profondità ipocentrale di 7.2 km +/- 1 km. La visione 3D (fig. 5.5) della location-PDF mostra l'insieme di tutte le soluzioni calcolate.

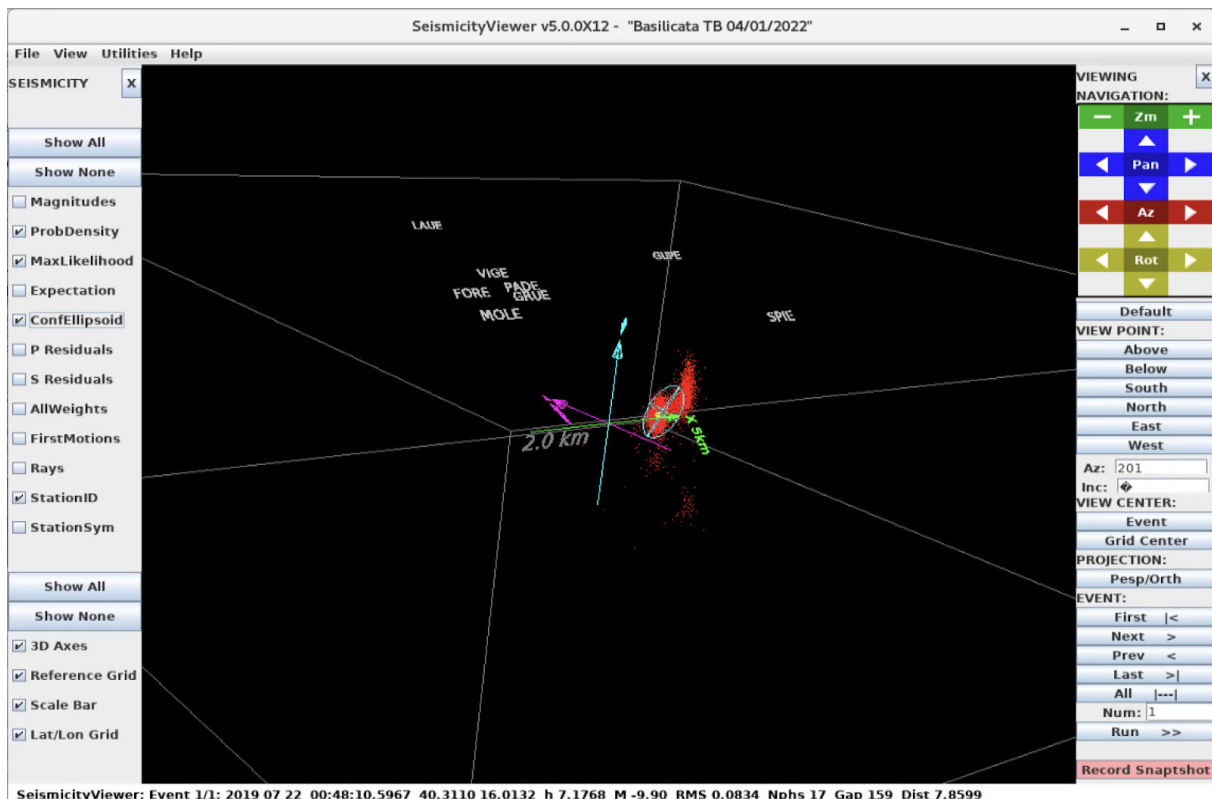


Figura 5.5: Rappresentazione 3D della location-PDF (Seismicity viewer). L'elissoide di tutte le possibili soluzioni (location-PDF pdf) in proiezione pseudo-3D).

5.2.4 Meccanismo sorgente sismica

In caso di evento sismico significativo all'interno del Dominio di Riferimento DR delle aree geotermiche Toscane, è importante calcolare il meccanismo della sorgente sismica (vedi per esempio §5.3 in [9]).

Il momento tensore descrive la sorgente sismica completa ed è composto da tre contributi: (i) la parte isotropica (ISO; esplosione/implosione), (ii) la doppia coppia (DC - double couple) e (iii) il cosiddetto *compensated linear vector dipole* (CLVD)

La fig. 5.6 mostra nelle tre colonne (da sinistra a destra) rispettivamente i contributi di ISO, DC e CLVD (dettagli vedere didascalia).

Per eventi con magnitudo $M_L \geq 3.0$ è quasi sempre possibile calcolare il momento tensore; per eventi con magnitudo minore si può calcolare la soluzione "doppia coppia" sulla base delle polarità dei primi arrivi (fase P).

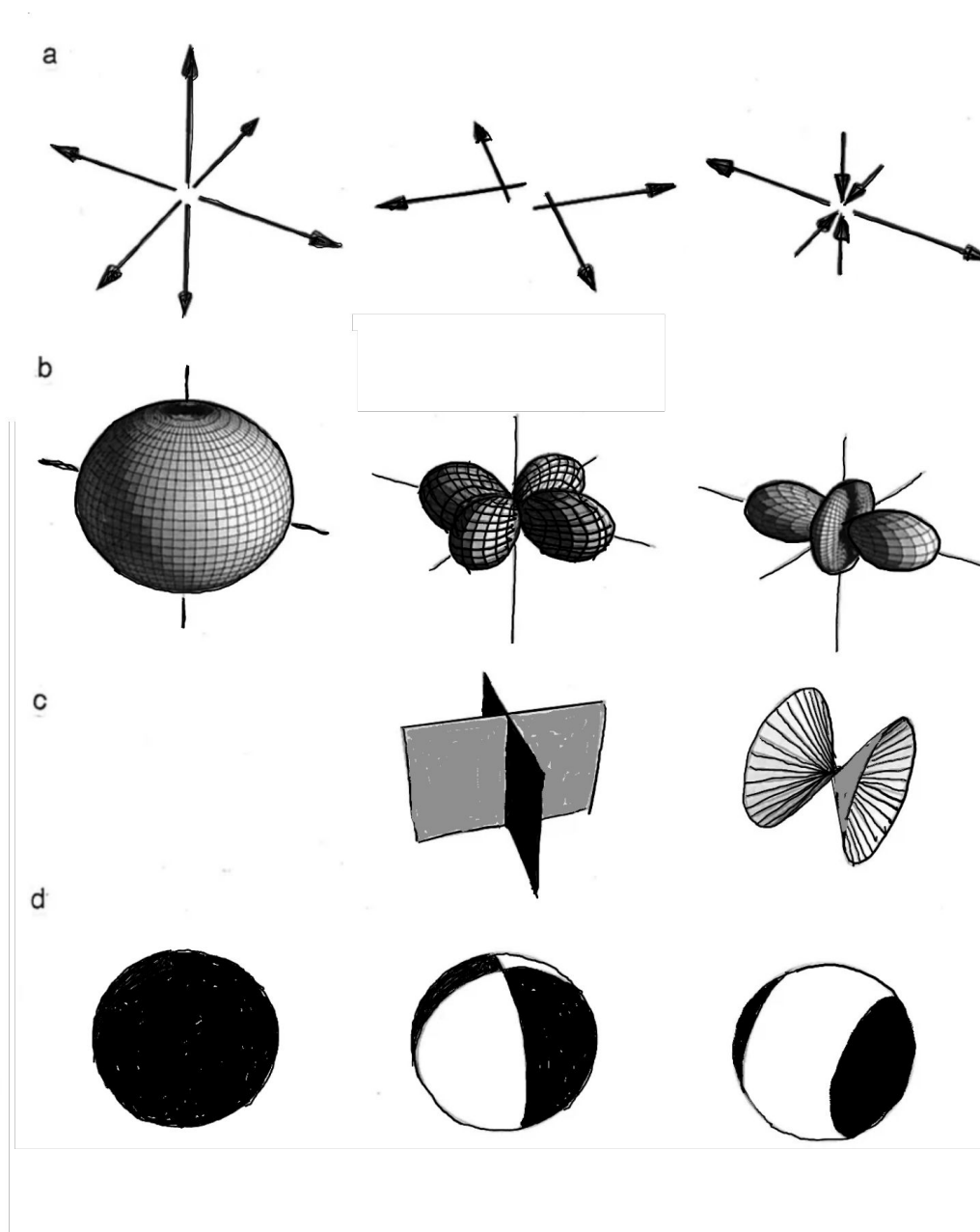


Figura 5.6: ISO, DC e CLVD (da sx a dx): (a) sistema di forza equivalente; (b) diagramma di radiazione; (c) piani nodali delle onde compressionali; (d) curve di intersezione con la sfera focale (beachball)(modificato da [18]).

6 Cronoprogramma e schema dei work packages

I singoli *workpackages* previsti nell'allegato dell'ACS 2026 – 2029 sono:

WP1 – Management:

- Pianificazione attività, dirigenza, segreteria;
- Redazione report scientifico con scadenza annuale.

WP2 – Acquisizione dati sismici:

- Acquisizione in tempo reale dei segnali sismici provenienti dalle sottoreti dei singoli operatori
- Archiviazione dati sismici presso il CMS a Bologna.

WP3 – Monitoraggio e analisi dati:

- Analisi dati sismici di dettaglio: *array analysis*, definizione di modelli di velocità, NLL, meccanismo sorgente
- Monitoraggio secondo le ILG (calcolo Localizzazione PGV, ML),
- Reperibilità;
- Compilazione report scientifico in caso di evento significativo nelle aree monitorate.

WP4 – Disseminazione/Divulgazione risultati:

- WEB-hosting
- Pubblicazione dei prodotti elaborati sul sito WEB.

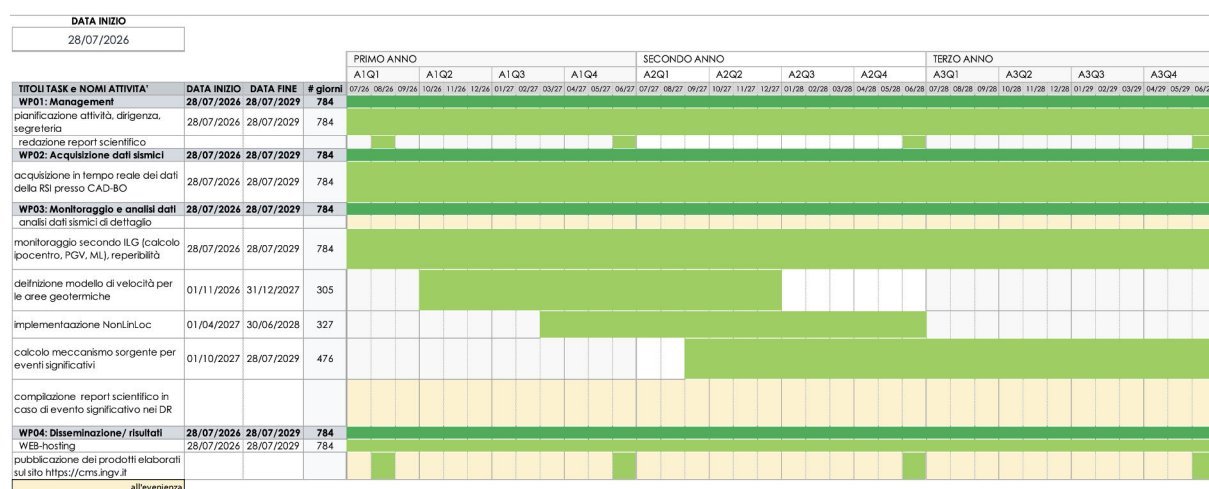


Figura 6.1: Pianificazione temporale delle attività previste nei singoli WP.

7 Risultati attesi

La prosecuzione dell'ACS è un importante e necessario passo per la realizzazione del sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane proposto nel 2020. La complessità del progetto consiste nella moltitudine di realtà e di problematiche che devono essere gestite in maniera centralizzata da un'unica SPM, anche nell'ottica del fatto che nel 2025 per la parte di EGP le attuali concessioni per l'utilizzo delle risorse geotermiche sono state prorogate. Alcuni altri operatori del mercato libero, sono in attesa dei permessi di coltivazione, proponendo principalmente l'applicazione di nuove metodologie (reiniezione totale), attingendo comunque ai medesimi reservoir geotermici dei campi di Larderello-Travale e del Monte Amiata.

Le difficoltà della SPM stanno nella gestione di:

- Concessioni di competenza sia regionale, che nazionale (progetti pilota);
- Coltivazione dei campi geotermici da operatori differenti;
- Acquisizione, analisi e archiviazione dei dati sismici (sensibili) provenienti dalle reti dei singoli operatori;
- Uso differente della geotermia (produzione energia elettrica, teleriscaldamento);
- Utilizzo di metodologie differenti per la produzione di energia (ciclo aperto, ciclo chiuso, re-iniezione parziale o totale);
- Parametri differenti di re-iniezione del fluido (portata, pressione, temperatura).

La realizzazione della rete integrata di monitoraggio sismico è disegnata per monitorare in tempo quasi-reale la sismicità che si verifica nelle aree geotermiche toscane, con l'ambizione del raggiungimento della soglia di magnitudo minima $M \sim 1$. In caso di sismicità verificatasi all'interno del "Dominio di Monitoraggio" prestabilito, il sistema di monitoraggio del CMS comunicherà entro 24/48 ore agli uffici competenti i parametri sismici definiti negli ILG ([16]): coordinate ipocentrali, tempo origine, Magnitudo e in caso di evento significativo anche PGV e PGA. Uno Schema di Comunicazione basato sulle soglie di alcuni di tali parametri è stato proposto in [14] e in [4]. In conclusione, il monitoraggio sismico integrato realizzato dalla SPM fornisce tutti i parametri tecnici necessari per applicare le raccomandazioni e prescrizioni riportate negli ILG ([16]) e nelle LGEO ([21]). Per arrivare alla piena operatività del sistema di monitoraggio è necessario che venga definita quanto prima la composizione del comitato (per le concessioni di competenza regionale) e decretata la sua nomina per poi decidere, sulla base delle proposte della SPM, le questioni elencate nel §3.3.

Glossario

ACS: Accordo di Collaborazione Scientifica

CAD-BO: Centro di Acquisizione Daiti, sede INGV di Bologna

CMS: Centro di Monitoraggio per le attività di Sottosuolo

DC : Doppia Coppia (*double couple*, nell'ambito di meccanismo focale)

DR: Dominio di Riferimento

GeoT: Geotermia Toscana

GPS: Global Positioning System

ILG: Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della sismicità delle Deformazioni del Suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche

INGV: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

IV: Sigla rete (NW-Code) RSN (INGV)

MALA: Monte Amiata Larderello Array

ML: Magnitudo Locale

MLbj: Magnitudo Locale Bakun e Joyner

MTI: Inversione del Momento Tensore

MT: Momento Tensore

NRMS: Normalized Root Mean Square

NW-code: Network Code - codice di rete

PGA: Peak Ground Acceleration

PGV: Peak Ground Velocity

PPSD: Probabilistic Power Spectral Density

RSI: Rete Sismica Integrata (INGV+EGP)

RSN: Rete Sismica Nazionale (INGV)

RT: Regione Toscana

SPM: Struttura Preposta al Monitoraggio

Bibliografia

Riferimenti bibliografici

- [1] DIN 4150-3:2016-12. Vibrations in buildings - part 3: Effects on structures; Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
- [2] S. Baisch, R. Fritschen, J. Groos, T. Kraft, T. Plenefisch, K. Plenkens, J. Ritter, and J. Wassermann. Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE. *Mitt. Dt. Geophys. Ges.*, 3/2012(3):17 – 31, 2012.
- [3] W.H. Bakun and W.B. Joyner. The ML scale in Central California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5):1827–1843., 1984.
- [4] T. Braun, M. Caciagli, M. Errico, D. Famiani, A. Govoni, R. Maffucci, and G. Zerbinato. Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane: relazione tecnica finale. Technical Report 5, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2023.
- [5] T. Braun, M. Caciagli, M. Errico, D. Famiani, A. Govoni, R. Maffucci, and G. Zerbinato. Prosecuzione del monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane: relazione iniziale. Technical Report 6, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2023.
- [6] T. Braun, M. Caciagli, M. Errico, D. Famiani, A. Govoni, and G. Zerbinato. Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane: 2° relazione tecnica intermedia. Technical Report 4, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2022.
- [7] T. Braun, M. Caciagli, M. Errico, A. Morelli, and G. Zerbinato. Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane: 1° relazione tecnica annuale. Technical Report 3, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2021.
- [8] T. Braun, M. Errico, D. Famiani, and A. Morelli. Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane: relazione tecnica intermedia. Technical Report 2, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2020.
- [9] T. Braun, D. Famiani, C. Bidini, M. Caciagli, M. Errico, A. Govoni, and G. Zerbinato. Prosecuzione del monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane: Relazione tecnica finale. Technical Report 9, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2026.
- [10] T. Braun, D. Famiani, M. Errico, A. Govoni, M. Caciagli, and G. Zerbinato. Prosecuzione del monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane: Relazione tecnica annuale. Technical Report 7, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2024.

- [11] T. Braun, D. Famiani, M. Errico, A. Govoni, M. Caciagli, and G. Zerbinato. Prosecuzione del monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane: Relazione tecnica annuale. Technical Report 8, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2025.
- [12] T. Braun, D. Kuehn, N. Langet, S. Danesi, S. Keil, and J. Wassermann. Review of european examples of seismic traffic light system and their suitability for onshore carbon storage monitoring. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 155:104728, 2026.
- [13] T. Braun and A. Morelli. Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane: Relazione Inizio Attività. Technical Report 1, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2020.
- [14] T. Braun, B. Schmidt, and J. Wassermann. Esempi nel mondo di sismicità indotta dalla produzione geotermica: considerazioni e proposte di monitoraggio sismico. *Quaderni di Geofisica*, 187:42, 2023.
- [15] T. Braun, J. Schweitzer, R.M. Azzara, D. Piccinini, M. Cocco, and E. Boschi. Results from the temporary installation of a small aperture seismic array in the Central Apennines and its merits for the local event detection and location capabilities. *Annals of Geophysics*, 6:1557–1568, 2004.
- [16] G. Dialuce, C. Chiarabba, D. Di Bucci, C. Doglioni, P. Gasparini, R. Lanari, E. Priolo, and A. Zollo. Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell’ambito delle attività antropiche. Technical report, GdL MISE, Roma, 2014. (ultimo accesso Dicembre 2025).
- [17] A. Garcia, L. Anderlini, T. Braun, M. Errico, G. Zerbinato, and M. Vassallo. Relazione Semestrale 1/2024, Progetto di Monitoraggio Integrato, Concessioni Val d’Agri e Gorgoglione. Technical report, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2024.
- [18] Bruce R. Julian, Angus D. Miller, and G. R. Foulger. Non-double-couple earthquakes 1. theory. *Reviews of Geophysics*, 36(4):525–549, 1998.
- [19] J. Peterson. Observations and modeling of seismic background noise. Report, United States Geological Survey, 1993.
- [20] J. Schweitzer, J. Fyen, S. Mykkeltveit, S. J. Gibbons, M. Pirli, D. Kühn, and T. Kværna. *Seismic Arrays*, chapter 9, pages 1–80. New Manual of Seismological Observatory Practice 2, Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, nmsop-2 edition, 2012.
- [21] F. Terlizze. Linee guida per l’utilizzazione della risorsa geotermica a media e alta entalpia. Technical report, GdL MISE, Roma, Ott. 2016. (ultimo accesso Dicembre 2025).