

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. Caciagli, M. Errico, D. Famiani, A. Govoni e G. Zerbinato

Redazione: M. Errico



Robert Gassman/Anny Black Photo

15 July 2016

Earth & Space Science News

Eos.org // 21

2022/1



In copertina: Monte Amiata al tramonto. Braun, et al., (2016), EOS, 97, doi:
10.1029/2016EO053197.

1	INTRODUZIONE	5
1.1	CRONISTORIA ATTIVITÀ	5
1.2	ATTIVITÀ DI CONSULENZA	7
1.3	CONDIVISIONE DATI CONCESSIONARIO EGP	8
2	WP2: PIANIFICAZIONE E REALIZZAZIONE RETE SISMICA	10
2.1	CONDIVISIONE DATI DA STAZIONI SISMICHE A CONCESSIONARI	10
2.2	INSTALLAZIONE DI STAZIONI SISMICHE	11
2.2.1	Introduzione: Differenza rete/array sismico	11
2.2.2	Geologia	13
2.2.3	Configurazione e caratteristiche tecniche dell'array	15
2.2.4	Installazione stazione array	18
2.2.5	Trasmissione dati in tempo reale	20
2.3	SCHEDA STAZIONI	21
3	WP3: ACQUISIZIONE DATI SISMICI	28
3.1	ACQUISIZIONE IN TEMPO REALE DEI SEGNALI SISMICI PRESSO IL CMS DI BOLOGNA	28
3.2	CONTROLLO E VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DEI DATI	30
3.3	ARCHIVIAZIONE DATI SISMICI PRESSO IL CMS DI BOLOGNA	34
3.4	INTEGRAZIONI DI STAZIONI IV E TRASMISSIONE A CAD-BO	35
4	WP4: MONITORAGGIO E ANALISI DATI	37
4.1	ANALISI DATI SISMICI DI DETTAGLIO, MONITORAGGIO SECONDO ILG	38
4.2	ORGANIZZAZIONE DEI TURNI DI MONITORAGGIO/REPERIBILITÀ.	41
4.3	BOLLETTINO SISMICO	42
5	WP5: DISSEMINAZIONE/DIVULGAZIONE RISULTATI	44
6	CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI	45
	GLOSSARIO	47
	BIBLIOGRAFIA	48
	ELENCO DELLE FIGURE	50
	ELENCO DELLE TABELLE	51

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 toscane Seconda Relazione tecnica annuale (Relazione n.4)

Thomas Braun^{1,2}, Marco Caciagli^{1,3}, Maddalena Errico³, Daniela Famiani², Aladino Govoni⁴, Giampaolo Zerbinato³

¹INGV, Osservatorio Sismologico Arezzo Italia;

²INGV, Sezione di Roma 1, Italia;

³INGV, Sezione di Bologna, Italia;

⁴INGV, Osservatorio Nazionale Terremoti, Roma, Italia.

30/06/2022

1 Introduzione

1.1 Cronistoria attività

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"*, che nasce dalle attività svolte nell'ambito del precedente accordo, con il titolo: *"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 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 il 1° rapporto, chiamato *"Relazione di Inizio Attività"* che illustra in dettaglio lo stato di fatto e il cronoprogramma delle attività (CMS, 2020a).

In data 30/11/2020 l'INGV ha trasmesso alla RT il 2° rapporto, chiamato *"Relazione Tecnica Intermedia"* relativa alla verifica sia della conclusione delle attività propedeutiche sia dello stato di avanzamento inerente la messa in funzione della rete di monitoraggio sismico (CMS, 2020b)

In data 30/06/2021 l'INGV ha trasmesso alla RT il 3° rapporto chiamato "Relazione tecnica annuale" relativa alla descrizione dell'avanzamento delle attività riportate (CMS, 2021)

L'argomento principale del presente 4° rapporto, denominato "Seconda Relazione tecnica annuale", è la descrizione dell'avanzamento delle attività riportate di cui sopra (ACS: art. 2, com. 2). Dopo un riassunto sintetico dell'attività di consulenza svolta da parte del CMS per conto di RT, in particolare in merito alle concessioni ENEL, segue un capitolo che descrive l'aggiornamento di pianificazione e realizzazione della rete sismica, in particolare relativo alle installazioni di nuove stazioni nell'area di Montalcino. Il terzo capitolo descrive un aggiornamento delle procedure attive presso il Centro di Acquisizione Dati del CMS con sede a Bologna, rispetto all'acquisizione in tempo reale, al controllo qualità e all'archiviazione dei dati sismici, seguito da un report sintetico sull'analisi e il monitoraggio dell'ultimo semestre. Il quinto capitolo riassume le attività di divulgazione e disseminazione delle informazioni inerenti al monitoraggio sismico delle aree geotermiche toscane. L'ultimo paragrafo riporta le conclusioni e delle raccomandazioni.

Pianificazione progetto: "Rete Integrata di Monitoraggio Sismico della Toscana"

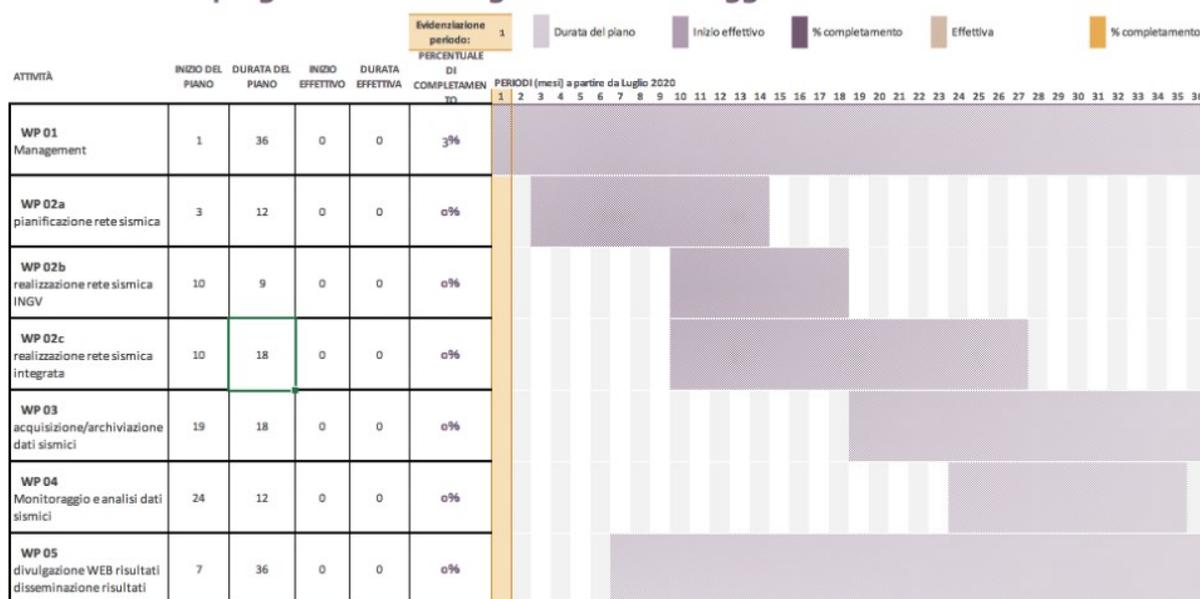


Figura 1.1. Pianificazione temporale delle attività previste nei singoli WP.

1.2 Attività di consulenza

Con l'oggetto "attività di consulenze" si intendono richieste di RT a CMS di redigere (i) pareri di carattere tecnico-scientifico relativi alla presentazione da parte di nuovi operatori non-EGP (ENEL Green Power), (ii) pratiche di VIA per delle concessioni di coltivazione geotermica adiacenti alle concessioni di EGP e (iii) dare consulenza per la redazione di accordi di protocolli d'intesa con i concessionari di coltivazione di energia geotermica.

Concessione "Poggio Montone (Sorgenia)":

La data del VIA per la concessione in oggetto è stata posticipata a settembre 2022.

Concessione "Le Cascinelle (Sorgenia)":

In data 01/09/2021 la RT condivide con INGV tutti i documenti relativi alle integrazioni presentate da Sorgenia, Comuni e comitati per la concessione "Le Cascinelle", tra cui:

- relazione sulle caratteristiche tecniche del monitoraggio sismico, come da richiesta RT, risposta di Sorgenia relativa alla richiesta di informazioni su stress termico e chimico nell'induzione di eventi sismici;
- parere negativo da parte del Comune di Radicofani al progetto, indicando la necessità di uno studio dettagliato della sismicità pregressa ed attuale, indotta e naturale, di tutte le concessioni dell'area.

Indagini geognostiche e geofisiche di esplorazione:

A Febbraio 2022 la RT ha chiesto alla SPM di dare un contributo sull'eventuale impatto di "rilievi sismici a riflessione 3D e pozzi esplorativi sulla pericolosità sismica del sito", previste dai concessionari relativa all'esplorazione di nuove riserve geotermiche. Anche se le competenze della SPM non riguardano il monitoraggio sismico di attività diverse da produzione e reiniezione è stato dichiarato come segue:

Per lo sfruttamento di nuove risorse geotermiche è prassi che i concessionari di geotermia conducano degli studi di pre-fattibilità. A tale scopo vengono realizzati rilievi a riflessione 3D e/o perforazioni di pozzi esplorativi per ottenere conoscenze sulle formazioni geologiche interessate e informazioni dirette sulle caratteristiche del serbatoio (temperatura, profondità, permeabilità, produttività, ecc.). Con queste informazioni si rende possibile una prima valutazione quantitativa, ancorché provvisoria, sulla quantità di energia potenzialmente recuperabile dal sistema geotermico nella zona esplorata dai pozzi e nelle sue immediate vicinanze. Le linee guida per l'utilizzazione della risorsa geotermica a media e alta entalpia (Terlizzate, 2016) dedicano un capitolo ad-hoc (§4) per riassumere le normative vigenti per la realizzazione, il disegno, la posizione e la profondità dei pozzi da perforare. Tali

perforazioni esplorative sono spesso caratterizzate da un diametro ridotto (slim holes), una bassa velocità di avanzamento, una limitata profondità raggiungibile e non prevedono l'iniezione di grandi volumi di fluidi a pressioni elevate, generalmente considerati responsabili nell'indurre o innescare microsismicità.

Protocollo d'Intesa tra EGP e RT:

Tra Gennaio e Maggio 2022 la SPM ha dato supporto alla RT per la redazione del nuovo Protocollo d'Intesa tra RT e EGP, che ha come obiettivo:

- la definizione di una procedura di monitoraggio, acquisizione e analisi dei dati;
- la condivisione dei dati EGP (sismici, volumi di produzione e di reiniezione) con RT;
- aggiornamento periodico su *upgrading* e manutenzione della rete sismica;
- redazione bollettino sismico annuale.

1.3 Condivisione dati concessionario EGP

Per realizzare un monitoraggio sismico nelle aree geotermiche toscane con concessioni adiacenti gestite da operatori di concorrenza, è quindi auspicabile incentivare i singoli concessionari alla condivisione con la SPM del maggior numero possibile di dati. Come ente terzo, la SPM (INGV) garantisce l'uso di dati esclusivamente ai fini del monitoraggio sismico senza condividerli pubblicamente o con altri soggetti.

Nelle date 20/07/2021 e 17/11/2021 si sono tenute delle riunioni tra EGP, RT e INGV e in data 12/01/2022 solo tra RT e INGV per definire il futuro contributo da parte del concessionario EGP ai fini del monitoraggio secondo gli ILG in relazione ai seguenti punti:

- caratteristiche dei dati grezzi da condividere (sismici, di produzione/reiniezione)
- modalità di trasmissione (in tempo reale, periodicamente)
- definizione dell'elenco delle stazioni sismiche EGP da condividere con CMS (vedi anche § 2.1)

Le recenti esperienze della SPM raccolte in Basilicata (concessioni Val d'Agri e Gorgoglione) indicano che il monitoraggio sismico in tempo reale basato sull'acquisizione di dati sismici provenienti da differenti concessionari, porti ad un miglioramento della qualità delle localizzazioni ipocentrali e ad un abbassamento della magnitudo minima di detezione e della magnitudo di completezza. Ai fini dell'applicazione del sistema a semaforo gli ILG del MiSE (2014 e 2016) specificano che la SPM ha il compito di confrontare le pressioni di poro con i parametri della sismicità registrata.

Specifiche caratteristiche dei dati richiesti.

- Volumi e pressioni (testa pozzo e fondo pozzo) e dei valori di produzione e reiniezione per ogni singolo pozzo attivo.

Passo di campionamento: almeno orario.

Formato dati: ASCII

- Dati sismici *raw* delle stazioni condivise. Come primo passo si propone la condivisione di circa un terzo delle stazioni operative, che in futuro potrebbe essere seguito da ulteriori richieste (vedi § 2.1):

Formato dati: MSEED (protocollo *seedlink*) in tempo reale

EGP risponde che nelle 8 concessioni operative nelle aree geotermiche toscane (Canneto, Chiusdino, Larderello, Lustignano, Milio, Riosecco, Travale Bagnore, Castagnaio) esistono tre tipi di pozzi, con

- 60 pozzi di reiniezione a caldo
- Pozzi di produzione, attrezzati per lavaggio con cloro
- 220 pozzi di produzione “non lavati”

EGP non ha installato un sistema per la rilevazione delle pressioni in ogni pozzo, i volumi di produzione e reiniezione non vengono rilevati singolarmente, ma presso un unico collettore installato ad ogni centrale geotermica. Attualmente EGP non prevede di allestire i singoli pozzi di produzione/reiniezione con dei sensori di pressione/portata individuale.

2 WP2: pianificazione e realizzazione rete sismica

Nel 2017 l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha istituito il "Centro di Monitoraggio delle attività di Sottosuolo" (CMS) con le mansioni di raccolta, analisi, interpretazione e modellazione di dati relativi alle aree del territorio nazionale interessate da attività antropiche di sfruttamento di Georisorse. Nell'ambito di un "Accordo di Collaborazione" con la Regione Toscana, nel 2020, il CMS è stato incaricato di monitorare gli impianti di produzione di energia geotermica in Toscana. L'attuale accordo (2020 - 2023) ha come obiettivo la realizzazione di una rete sismica integrata, composta da stazioni sismiche esistenti e nuove, in grado di monitorare la sismicità nelle aree di Larderello- Travale e Monte Amiata. Tale progetto prevede l'installazione di strumentazione prevalentemente nelle aree scoperte dalle reti sismiche esistenti, come per esempio nei dintorni di Montalcino (SI).

2.1 Condivisione dati da stazioni sismiche a Concessionari

Attualmente, l'unico concessionario produttivo in ambito geotermico è EGP. Come accennato precedentemente, la RT e EGP sono in fase di preparazione di un protocollo d'intesa (PI) che tra l'altro prevede la definizione delle modalità di trasmissione dati.

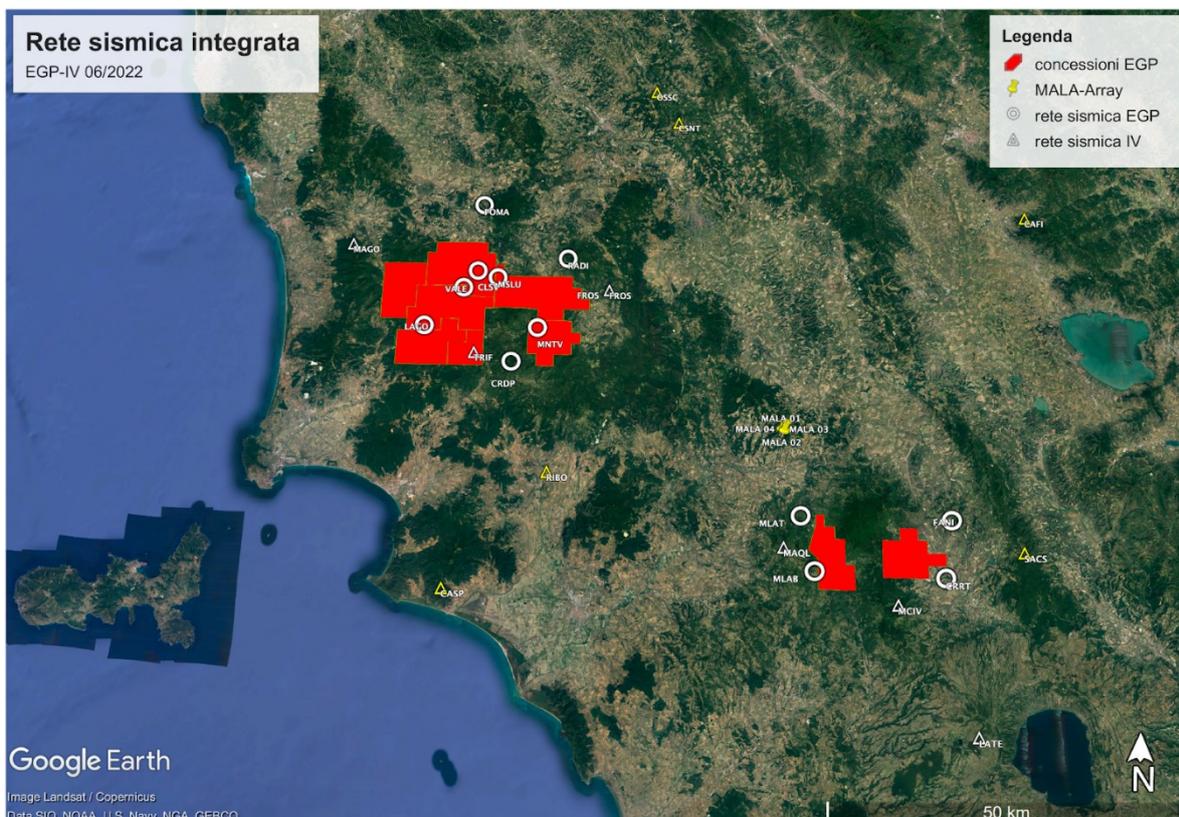


Figura 2.1. Stazioni sismiche della prima configurazione della rete sismica integrata.

Su richiesta di RT, il CMS ha compilato l'elenco delle stazioni sismiche EGP da trasmettere in tempo reale a CMS. Come primo passo si propone la condivisione delle stazioni equipaggiate con sismometri a tre componenti; si tratta di circa un terzo delle stazioni operative, che in futuro potrebbe essere seguito da ulteriori richieste:

- LARDERELLO (8/26 stazioni): CLSV, CRDP, LAGO, VALE, MNTV, MSLU, POMA, RADI;
- MT. AMIATA (5/16 stazioni): FANI, CRRT, MAQL, MLAB, MLAT;
- Formato dati: MSEED (protocollo *seedlink*) in tempo reale.

La Figura 2.1 mostra le stazioni che costituiscono la prima configurazione della futura rete sismica integrata nell'area tra Larderello-Travale e Monte Amiata:

- cerchi: stazioni EGP a 3 componenti (disponibili a seguito del Prot. d'intesa RT-EGP)
- triangoli: stazioni IV e ENEL trasmesse in tempo reale alla sala sismica a Roma (integrate nella RSN)
- simbolo "pin": MALA (Montalcino Amiata Larderello Array), stazioni installate nell'ambito dell'attuale ACS (vedi §2.2).

2.2 Installazione di stazioni sismiche

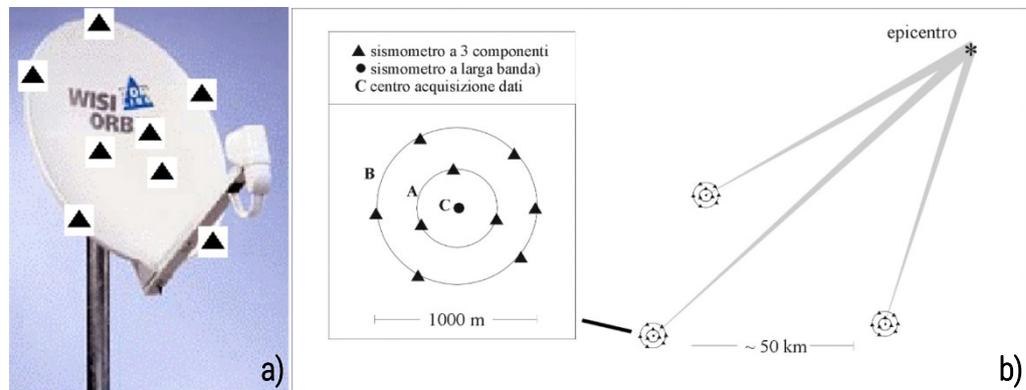
2.2.1 Introduzione: Differenza rete/array sismico

Un array sismico consiste di un insieme di sismometri installati in maniera tale che, sulla base dell'analisi delle forme d'onda alle singole componenti, possono essere dedotte le caratteristiche del campo d'onda ad ogni punto di riferimento specifico, all'interno o vicino all'array. Generalmente, un array sismico si distingue da una rete sismica locale in base alle tecniche applicate per l'analisi dei dati. Quindi, in principio una rete sismica può essere utilizzata come array, come anche i dati di un array possono essere analizzati come dati di una rete sismica. La dimensione di un array è definita dalla sua apertura, definita come la maggiore distanza possibile tra due sensori dell'array. In pratica, la geometria e il numero delle stazioni installate sono funzione dell'obiettivo scientifico e dei limiti economici.

La maggior parte delle tecniche di processamento dati richiede un'alta coerenza del segnale attraverso l'array, e questo fatto impone vincoli sulla geometria dell'array (estensione spaziale) e sulla strumentazione (breve/medio periodo o larga banda). Una geologia omogenea nel volume sottostante l'array (§2.2.2) è preferibile, per garantire la massima similitudine del segnale registrato alle singole componenti dello stesso. Dato che il calcolo dei parametri (*backazimuth*, *slowness*, ecc.) si basa su differenze

temporali del segnale molto piccole tra le singole componenti (*shift* di fase), la sincronizzazione dei dati sismici registrati da tutti gli elementi dell'array deve essere realizzata con altissima precisione.

Figura 2.2. (a) Paragone tra un array sismico (triangoli) e un'antenna satellitare. (b) Combinazione di array sismici multipli per la localizzazione epicentrale.



Il principio di funzionamento di un array sismico è identico a quello di un'antenna satellitare (Figura 2.2a); la dimensione della parabola, come anche l'apertura dell'array sismico, definisce il massimo della lunghezza d'onda orizzontale risolvibile. Sia l'apertura dell'array, sia il distanziamento tra le stazioni vengono scelti in maniera tale che la somma delle singole tracce riduca il rumore incoerente e amplifichi il segnale coerente. L'aumento del rapporto segnale/rumore (SNR - *signal to noise ratio*) incrementa con il quadrato del numero delle stazioni impiegate.

Una volta identificato il segnale sismico che si propaga attraverso l'array, un risultato dell'analisi dei dati consiste nel ricavare la coppia direzione (*backazimuth*) - angolo di incidenza relativa al fronte d'onda in esame. L'antenna (l'array) determina infatti la direzione di provenienza del massimo dell'energia coerente. La maggior parte delle tecniche di detezione sono quindi comparabili alle tecniche radar. La combinazione di array sismici multipli può essere utilizzata per la localizzazione della sismicità (Figura 2.2b).

Negli ultimi decenni, il monitoraggio sismico ha sperimentato importanti progressi, introducendo alcuni "array sismici a piccola apertura" e reti sismiche dense, equipaggiate con strumentazione ad alta dinamica. Questa nuova realtà di registrazione ha consentito di abbassare la soglia di magnitudo di detezione, di identificare in quasi-tempo reale le strutture sismo-tettoniche attive e di fornire informazioni sulla sorgente sismica e la dinamica della rottura. Recentemente "array sismici a piccola apertura" sono stati installati in Italia, come per esempio a:

- 2000 a Città di Castello (Braun et al., 2004; Braun and Schweitzer, 2008);
- 2005 in Casentino (AR) in collaborazione con Uni Hamburg, Potsdam (Braun et al., 2006);
- 2010 in Valtiberina, vicino Gubbio (Saccorotti et al., 2011);

- 2012 nel Pollino (Calabria) in collaborazione con GFZ-Potsdam (Govoni et al., 2013);
- 2015 sul Mt. Amiata in collaborazione con Uni e GFZ-Potsdam (Braun et al., 2016);
- 2017 a Deruta (Umbria) nell’ambito del progetto FISR.

2.2.2 Geologia

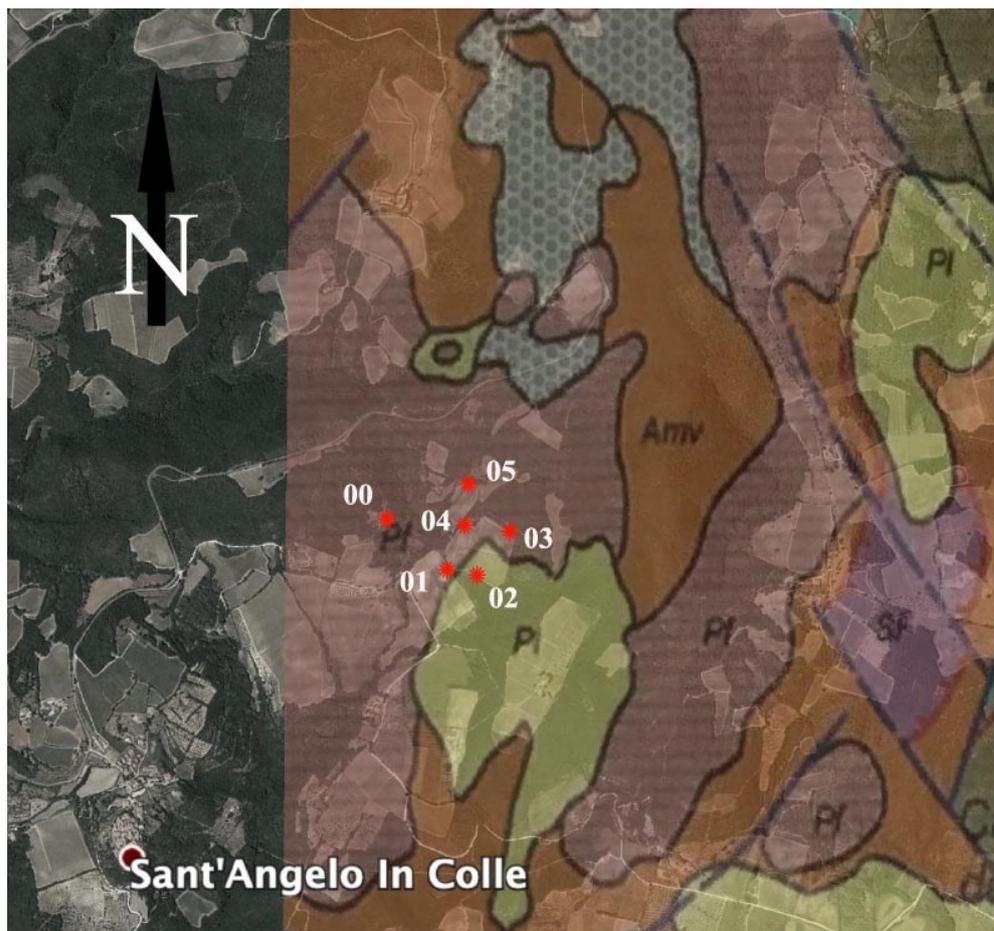
Come descritto nel precedente Report (RT 2021/1, paragrafo 5.2), è stata realizzata una campagna di rilevamento geologico atta ad individuare il sito più idoneo all’installazione di una stazione sismica a integrazione di quelle già presenti messe a disposizione dalla RSN-INGV.

Gli stessi luoghi scelti per l’array sismico, ossia l’area nei dintorni di Sant’Angelo in Colle (SI), sono risultati idonei all’installazione delle stazioni sismiche integrative.

Un inquadramento geologico e sismico generale dell’area è stato descritto nel paragrafo 3 del precedente RT 2021/1.

Per quanto riguarda l’assetto geologico dell’area scelta per l’installazione dell’array si ricorda che, oltre alle unità prevalentemente argillose plio-pleistoceniche, affiorano nelle depressioni, sabbie cementate e conglomerati del Pliocene inferiore (PI in Figura 2.3) mentre i rilievi sono modellati su litologie appartenenti (i) alla Formazione della Pietraforte (Pf in Figura 2.3), membro torbiditico silicoclastico al tetto dell’Unità Tettonica di S. Fiora, alla (ii) Formazione delle Argilliti Mangesifere (Amf in Figura 2.3), sempre appartenenti all’Unità Tettonica di S. Fiora e (iii) alla Formazione del Macigno (Mg in Figura 2.3), che chiude al tetto la falda Toscana, costituita da unità torbiditiche arenacee, per lo più gradate, con spessori medi degli strati di circa 1 m, alternate a livelli pelitici, talora marnosi, con spessori mai superiori a 20 cm (Figura 2.3; Pandeli et al., 2017).

Figura 2.3. Mappa geologica estratta da Pandeli et al., 2017 e localizzazione delle stazioni costituenti l'Array MALA.



2.2.3 Configurazione e caratteristiche tecniche dell'array

La necessità di registrare eventi sismici anche di bassa magnitudo impone una adeguata distribuzione spaziale delle stazioni della rete di monitoraggio. Con l'obiettivo di potenziare la capacità di detezione nelle aree di Larderello-Travale e Monte Amiata, in maggio 2022 si è conclusa l'installazione dell'array MALA in una zona limitrofa a Montalcino (SI).

La scelta del sito soddisfa diverse necessità. Prima fra tutte quella di coprire un'area prima sprovvista di strumenti sismici e poi la ricerca di un sito lontano da fonti di rumore. L'area infatti si trova in una zona rurale, lontana da strade ad alto flusso di mezzi e le installazioni sono state realizzate all'interno di un vitigno privato e recintato.

In base alle caratteristiche e ai vantaggi gestionali descritti precedentemente, si propone la realizzazione di un array a piccola scala composto da almeno 6 elementi, con distanze inter-stazione, che variano tra 50 - 500 m tra le rispettive stazioni. La Figura 2.4 mostra la distribuzione delle stazioni esistenti (triangoli blu e verdi) e di recente installazione (triangoli arancioni) che contribuiscono al monitoraggio sismico dell'area. Nel riquadro in alto a destra, un ingrandimento di MALA.

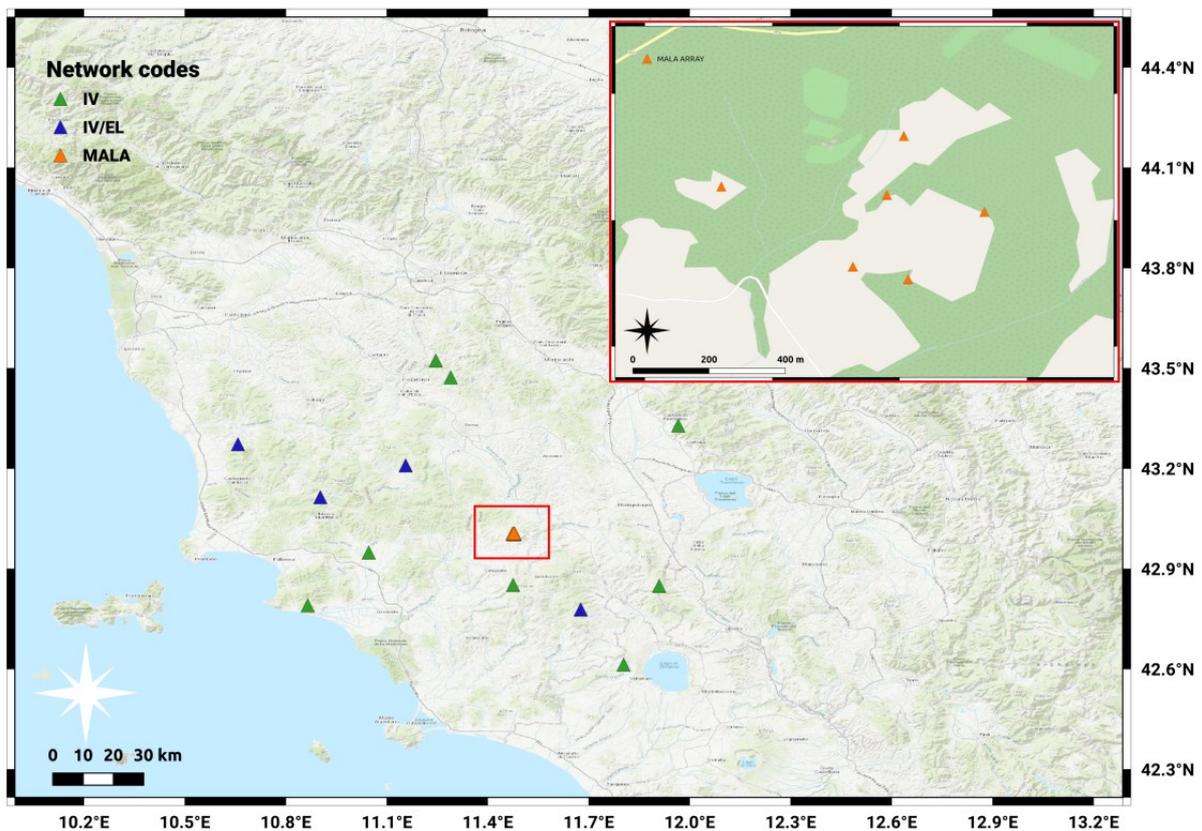


Figura 2.4. Stazioni della prima configurazione della rete sismica integrata. Il triangolo rosso indica la posizione di MALA installato nei pressi di Montalcino; il rettangolo rosso illustra un ingrandimento dell'array.

L'array è attualmente composto da 6 stazioni sismiche, disposte ad una distanza massima di circa 500 m (dist. MALA0 - MALA5) l'una dall'altra. Nella Figura 2.5 viene mostrata la disposizione e le interdistanze tra le stazioni (rispettivamente triangoli e linee arancioni). In tabella della Figura 2.5 le rispettive distanze in km.

Stazione1	Stazione2	Distanza (km)
MALA1	MALA2	0.11
MALA4	MALA5	0.16
MALA3	MALA4	0.19
MALA1	MALA4	0.2
MALA2	MALA4	0.23
MALA2	MALA3	0.23
MALA3	MALA5	0.25
MALA1	MALA3	0.29
MALA0	MALA4	0.32
MALA0	MALA1	0.33
MALA1	MALA5	0.36
MALA0	MALA5	0.37
MALA2	MALA5	0.38
MALA0	MALA2	0.43
MALA0	MALA3	0.51

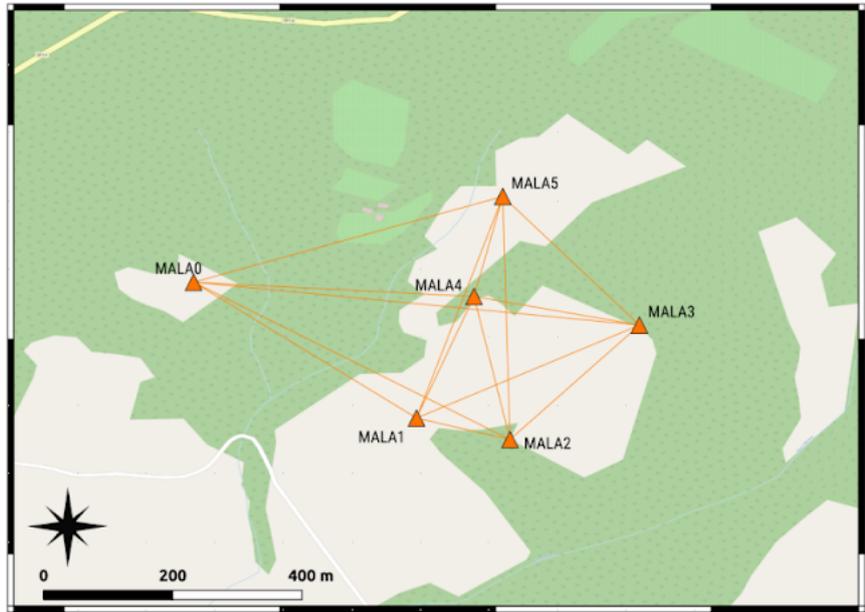
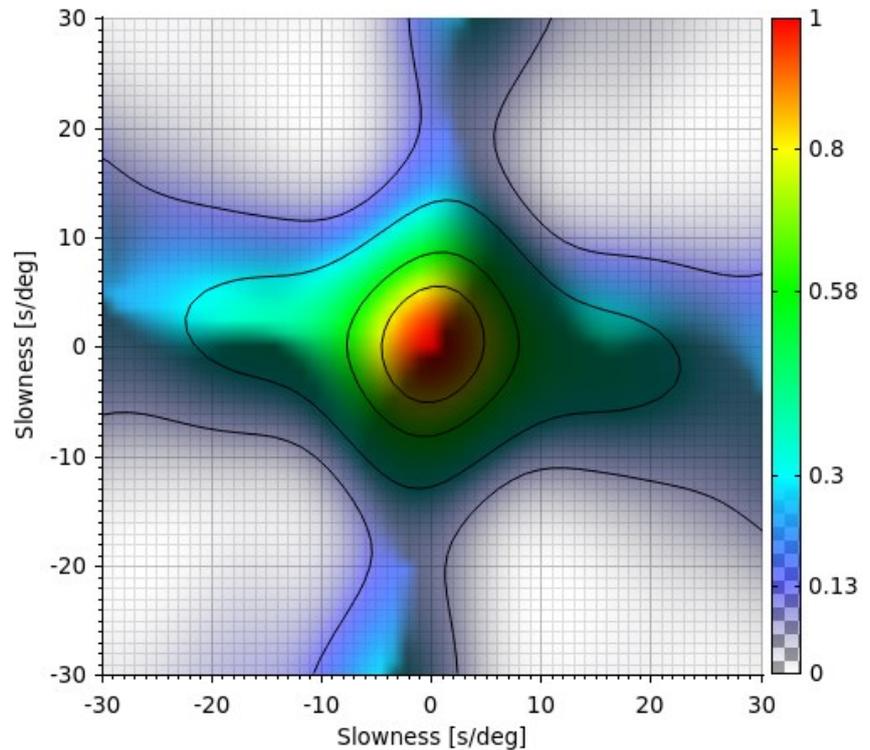


Figura 2.5. Configurazione dell'array MALA

Figura 2.6. La funzione di risposta dell'array MALA (Array Response Function).



Ogni elemento dell'array (triangoli in Figura 2.2 e Figura 2.5) è composto da un digitalizzatore a 24 bit, un sismografo (breve/medio periodo) a tre componenti, un'antenna GPS e l'unità di alimentazione (pannello solare, regolatore, batteria 12 V DC (Figura 2.7, Figura 2.9b). La stazione sismica registra la velocità del movimento del suolo in maniera passiva e trasmette i dati sismici via rete WIFI ad un router centrale (Figura 2.13), ubicato presso il fabbricato accanto al pozzo dell'acqua (Figura 2.8a). Tutta la strumentazione è alimentata a 12 V DC via pannello solare/batteria tampone (Figura 2.7, Figura 2.8b) e non rappresenta nessun pericolo per persone o animali.

Figura 2.7. Schema di una stazione sismica generica.

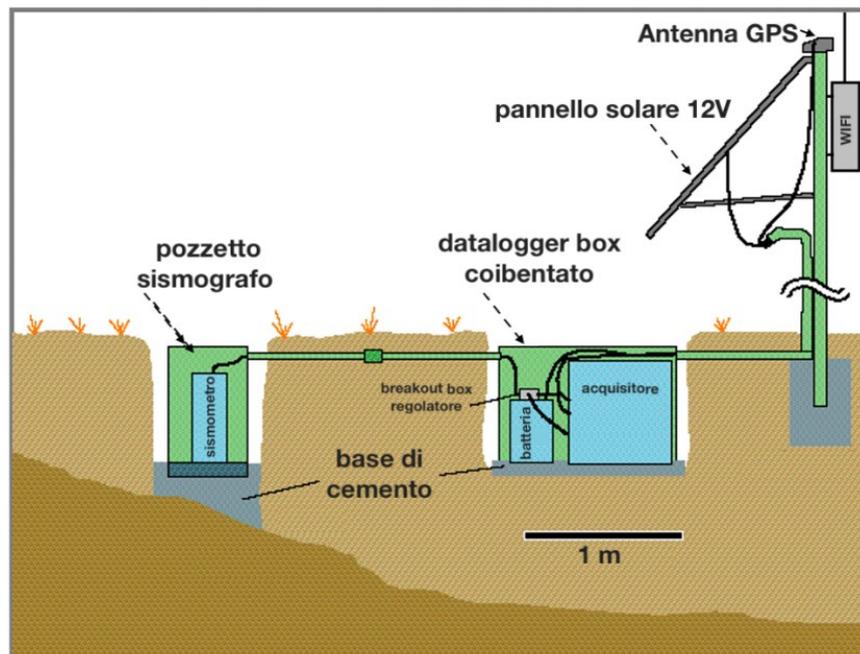


Figura 2.8. (a) Stazione MALA0 (vedi anche Figura 2.11) installato all'interno del fabbricato, che ospita anche il router 4G per la trasmissione dati di tutto l'array. (b) Pannelli solari per l'alimentazione del router e della stazione sismica.

2.2.4 Installazione stazione array

Il presente paragrafo fornisce alcune informazioni relative all'installazione delle stazioni sismiche dell'array (vedi Figura 2.5). La Figura 2.9 mostra (a) il contenitore coibentato che ospita l'acquisitore (GAIA 2), la batteria 12 V DC, il regolatore per il pannello solare e (b) il sismometro a tre componenti e a breve periodo (Mark L4-3c).

Figura 2.9. Datalogger box completo di batteria 12V, regolatore pannello solare e antenna GPS. (b) sismometro Mark L4-3c in fase di installazione.



Per ridurre gli effetti dovuti alle escursioni termiche tutti i sensori sono stati interrati.



Figura 2.10. (a) Installazione del sismometro presso uno dei siti dell'array MALA (man at work). Orientamento del sensore sismico in direzione N-S.

Attualmente solo il sensore della stazione MALA0 non è stato interrato, ma posizionato all'interno dell'edificio che ospita il router WIFI per la trasmissione dei dati (Figura 2.11).



Figura 2.11. Sismometro Mark L4-3c della stazione MALA0.

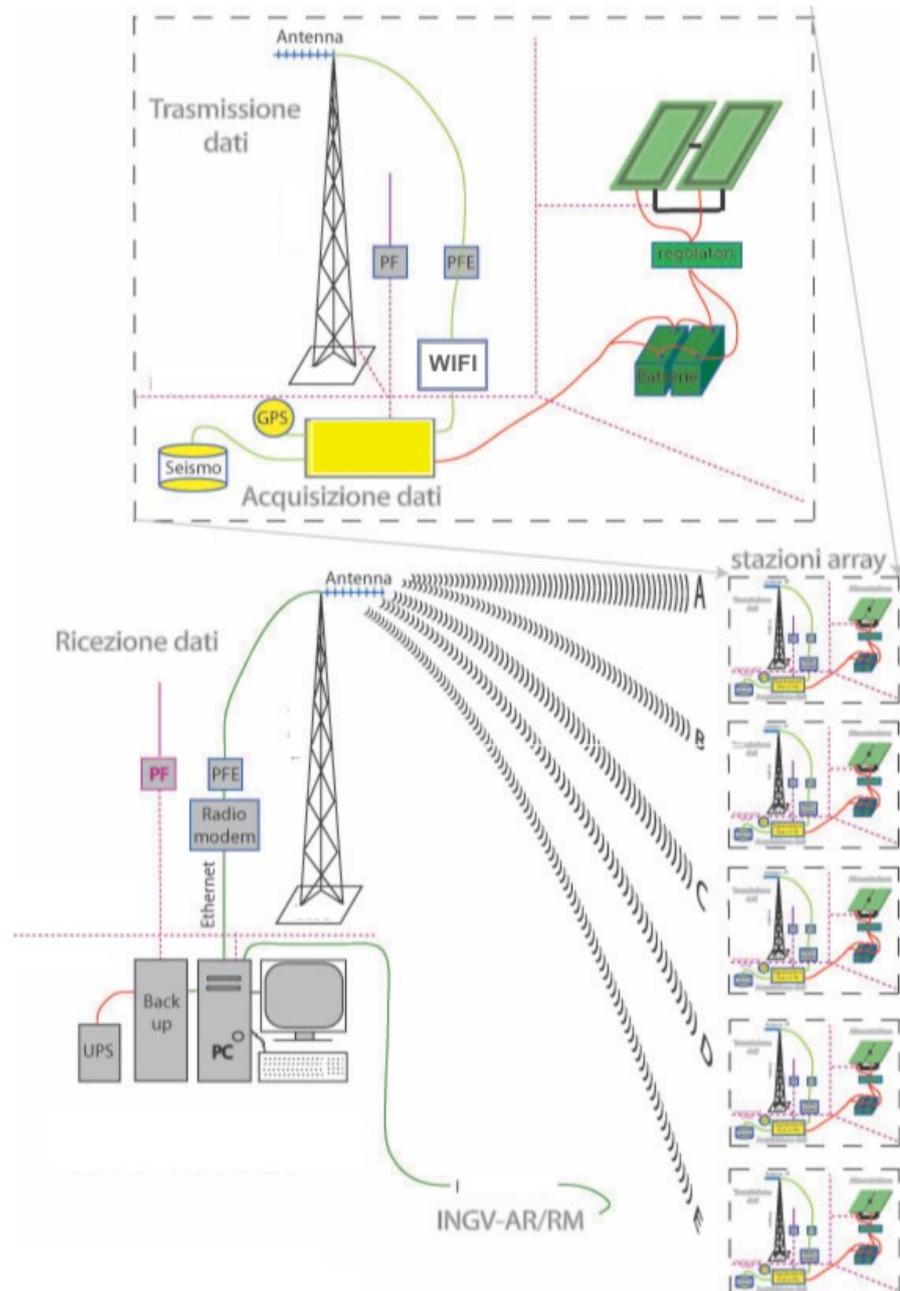
Figura 2.12. Stazione MALA2 pronta per la registrazione e trasmissione dati.



2.2.5 Trasmissione dati in tempo reale

Per la trasmissione dei dati sismici in tempo reale è stata creata un'apposita rete WIFI (vedi schema in Figura 2.13). Ogni stazione sismica è equipaggiata con un modem WIFI 5 GHz che trasmette i dati (formato *mseed*) in tempo reale ad un router 4G ubicato presso la stazione MALA0 (Figura 2.5, Figura 2.8), che invia i dati alle sale di monitoraggio sismico delle sedi centrale a Roma e del CMS a Bologna.

Figura 2.13. Schema di trasmissione dati in tempo reale dell'array MALA.



La Figura 2.13 mostra lo schema del funzionamento di un generico array sismico composto da 5 stazioni. Ognuno dei 5 elementi (A, B, C, D, E) è composto da un acquirente (*datalogger* - rettangolo giallo), a cui sono connessi via cavo un sismografo (seismo), un'antenna GPS e un router WIFI; tutto alimentato da pannello solare/batteria. Le singole stazioni (A-E) trasmettono i segnali sismici in tempo reale ad un router che inserisce i *data stream* in internet (protocollo *seedlink*).

Attualmente l'array MALA è composto da sei elementi (MALA0 - MALA5). I singoli router sono collegati in configurazione MESH, che significa che ogni radio funziona anche come ripetitore. Quindi, la trasmissione dati non deve necessariamente avvenire in via diretta dalla stazione al router centrale (MALA0); basta che l'antenna di un elemento veda l'antenna di un elemento vicino e che lo utilizzi come ponte radio per raggiungere il router centrale per poi trasmettere i dati alle sale di monitoraggio.

Il flusso di dati da trasmettere in tempo reale al CAD-BO si calcola sulla base dei seguenti parametri:

- passo di campionamento: 200 Hz (campioni al secondo);
- dinamica acquirente: 24 bit (3 byte);
- numero canali registranti: 3;
- compressione dati (Steim): 1.4.

Il volume di dati registrati su base giornaliera per ogni canale risulta quindi:

- flusso teorico dati: $\sim 24 \text{ Mb/giorno} = 200 \text{ Hz} * 1.4 * 86400$;
- flusso dati reale: $\sim 20 - 22 \text{ Mb/giorno}$.

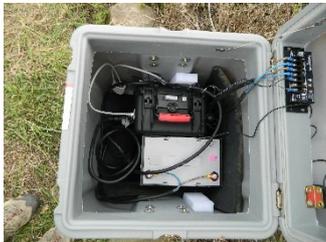
Considerando n° 6 stazioni a 3 canali, il flusso totale dei dati trasmessi ammonta a 350 - 430 Mb/giorno.

2.3 Schede stazioni

A conclusione della fase di installazione delle stazioni sismiche che compongono l'array MALA, sono state redatte le schede tecniche relative ad ogni stazione, nelle quali sono riassunte le specifiche dell'area e degli strumenti installati.

Rete:		Stazione:	
IV-MALA		MALAO	
Installazione	13/04/2022	Descrizione sito: Stazione installata in area rurale all'interno di un vigneto privato.	
Rimozione	--		
Latitudine N	43.0058°		
Longitudine E	11.4738°		
Altitudine s.l.m.	441 m		
Strumentazione			
Acquisitore	GAIA2	  	
Velocimetro			
Sensore	L-4c/3D		
Alimentazione	12V		
Acquisizione	In continuo		
Passo di campionamento	200-Hz		
Gain	1		
Accelerometro			
Sensore	--		
Alimentazione	--		
Acquisizione	--		
Passo di campionamento	--		
Gain	--		
		Geologia del sito: La stazione è situata all'interno di una costruzione rurale in pietra. La litologia sottostante è riconducibile alla Formazione di Pietraforte (Cretaceo Sup.) costituita da litofacies che vanno da arenacee a pelitico-arenacee con caratteri torbiditico-silicoclastici, generalmente ben stratificate e con spessori degli strati da decimetrici a metrici.	

Rete:		Stazione:	
IV-MALA		MALA1	
Installazione	24/02/2022	Descrizione sito: Stazione installata in area rurale all'interno di un vigneto privato.	
Rimozione	--		
Latitudine N	43.0039°		
Longitudine E	11.4769°		
Altitudine s.l.m.	403 m		
Strumentazione			
Acquisitore	GAIA2	  	
Velocimetro			
Sensore	L-4c/3D		
Alimentazione	12V		
Acquisizione	In continuo		
Passo di campionamento	200-Hz		
Gain	1		
Accelerometro			
Sensore	--		
Alimentazione	--		
Acquisizione	--		
Passo di campionamento	--		
Gain	--		
		<p>Geologia del sito: La litologia sottostante è riconducibile alla Formazione di Pietraforte (Cretaceo Sup.) costituita da litofacies che vanno da arenacee a pelitico-arenacee con caratteri torbiditico-silicoclastici, generalmente ben stratificate e con spessori degli strati da decimetrici a metrici.</p>	

Rete:		Stazione:	
IV-MALA		MALA2	
Installazione	12/04/2022	Descrizione sito: Stazione installata in area rurale all'interno di un vigneto privato.	
Rimozione	--		
Latitudine N	43.0036°		
Longitudine E	11.4782°		
Altitudine s.l.m.	414 m		
Strumentazione			
Acquisitore	GAIA2	  	
Velocimetro			
Sensore	L-4c/3D		
Alimentazione	12V		
Acquisizione	In continuo		
Passo di campionamento	200-Hz		
Gain	1		
Accelerometro			
Sensore	--		
Alimentazione	--		
Acquisizione	--		
Passo di campionamento	--		
Gain	--		
		Geologia del sito: Il substrato al di sotto della stazione è rappresentato da sabbie conglomeratiche ricche in fossili (Pliocene Inf.) a luoghi ben cementate.	

Rete:		Stazione:	
IV-MALA		MALA3	
Installazione	12/04/2022	Descrizione sito: Stazione installata in area rurale all'interno di un vigneto privato.	
Rimozione	--		
Latitudine N	43.0052°		
Longitudine E	11.4800°		
Altitudine s.l.m.	445 m		
Strumentazione			
Acquisitore	GAIA2	  	
Velocimetro			
Sensore	L-4c/3D		
Alimentazione	12V		
Acquisizione	In continuo		
Passo di campionamento	200-Hz		
Gain	1		
Accelerometro			
Sensore	--		
Alimentazione	--		
Acquisizione	--		
Passo di campionamento	--		
Gain	--		
		Geologia del sito: La litologia sottostante è riconducibile alla Formazione di Pietraforte (Cretaceo Sup.) costituita da litofacies che vanno da arenacee a pelitico-arenacee con caratteri torbiditico-silicoclastici, generalmente ben stratificate e con spessori degli strati da decimetrici a metrici.	

Rete:		Stazione:	
IV-MALA		MALA4	
Installazione	12/04/2022	Descrizione sito: Stazione installata in area rurale all'interno di un vigneto privato.	
Rimozione	--		
Latitudine N	43.0056°		
Longitudine E	11.4777°		
Altitudine s.l.m.	430 m		
Strumentazione			
Acquisitore	GAIA2		
Velocimetro			
Sensore	L-4c/3D		
Alimentazione	12V		
Acquisizione	In continuo		
Passo di campionamento	200-Hz		
Gain	1		
Accelerometro			
Sensore	--		
Alimentazione	--		
Acquisizione	--		
Passo di campionamento	--		
Gain	--		

Rete:		Stazione:	
IV-MALA		MALA5	
Installazione	13/04/2022	Descrizione sito: Stazione installata in area rurale all'interno di un vigneto privato.	
Rimozione	--		
Latitudine N	43.0070°		
Longitudine E	11.4781°		
Altitudine s.l.m.	444 m		
Strumentazione			
Acquisitore	GAIA2		
Velocimetro			
Sensore	L-4c/3D		
Alimentazione	12V		
Acquisizione	In continuo		
Passo di campionamento	200-Hz		
Gain	1		
Accelerometro			
Sensore	--		
Alimentazione	--		
Acquisizione	--		
Passo di campionamento	--		
Gain	--		
		<p>Geologia del sito:</p> <p>La litologia sottostante è riconducibile alla Formazione di Pietraforte (Cretaceo Sup.) costituita da litofacies che vanno da arenacee a pelitico-arenacee con caratteri torbiditico-silicoclastici, generalmente ben stratificate e con spessori degli strati da decimetrici a metrici.</p>	

3 WP3: Acquisizione dati sismici

3.1 Acquisizione in tempo reale dei segnali sismici presso il CMS di Bologna

Il dato sismologico viene acquisito mediante uno schema ridondante a due macchine, presso il *data center* TIER1 (<https://www.cnaf.infn.it/wlwg-tier-1-data-center/>) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), e mediante un sistema di *disaster recovery* sito presso il CED della Sezione INGV di Roma, per un totale di 5 macchine, così distribuite: presso TIER1 il CMS ha predisposto 4 macchine virtuali, divise in 2 coppie. Entrambe le coppie sono identiche e sono costituite da una macchina destinata all'acquisizione del dato sismologico e di una seconda macchina sulla quale avviene l'analisi dei dati in tempo reale e sulla quale il turnista CMS effettua la revisione delle localizzazioni. L'altra coppia è identica alla prima, quindi vi è una macchina che acquisisce e un'altra che processa. Questa seconda coppia di macchine serve come riserva nel caso di malfunzionamento o blocco programmato per manutenzione alla prima coppia di macchine. A queste si aggiunge la macchina di *disaster recovery* presso la sede INGV di Roma, la quale unisce in un unico apparato i compiti di acquisizione e trattamento automatico dei dati sismologici. Questa macchina viene usata solamente nel caso si verifichi impossibilità a connettersi alle macchine presso TIER1, o per un malfunzionamento congiunto delle stesse. La macchina di *disaster recovery* viene regolarmente aggiornata e sottoposta a manutenzione da parte del personale del CMS.

Quanto sopra descritto viene implementato mediante i seguenti componenti hardware e software:

La parte hardware consta di due server fisici con cpu Intel Xeon a 40 core con *hyperthreading*, e 4 TB di RAM ciascuno. Le 4 macchine sopra elencate sono equipaggiate con 8 core, 20 GB di *ram* e acquisiscono e processano i dati mediante il software SeisComP4 con gestore del dato sismologico *Caps*.

Una lista dei componenti utilizzati è indicata di seguito:

Hardware: server collegato ad un sistema di archiviazione dati (*mass storage*):

Sistema modulare ed espandibile;

- n. 2 Server multiblade Supermicro;
- Continuità Operativa (Disaster Recovery, Assistenza 5dx8h);
- Ridondanza;

- Green Computing (sostenibilità ambientale, efficienza energetica, costo di smaltimento e riciclaggio);
- Compatibilità Free/Libre e Open Source Software;

Storage Array SCv3000 Dell;

- n. 2 controller;
- n. 2 power supplies;
- n. 2 10GBASE-T con connettività RJ45 per controller;
- n. 16 hdd da 8TB ciascuno

La parte software è composta dal pacchetto SeisComP4 (SC4), che svolge le funzioni di:

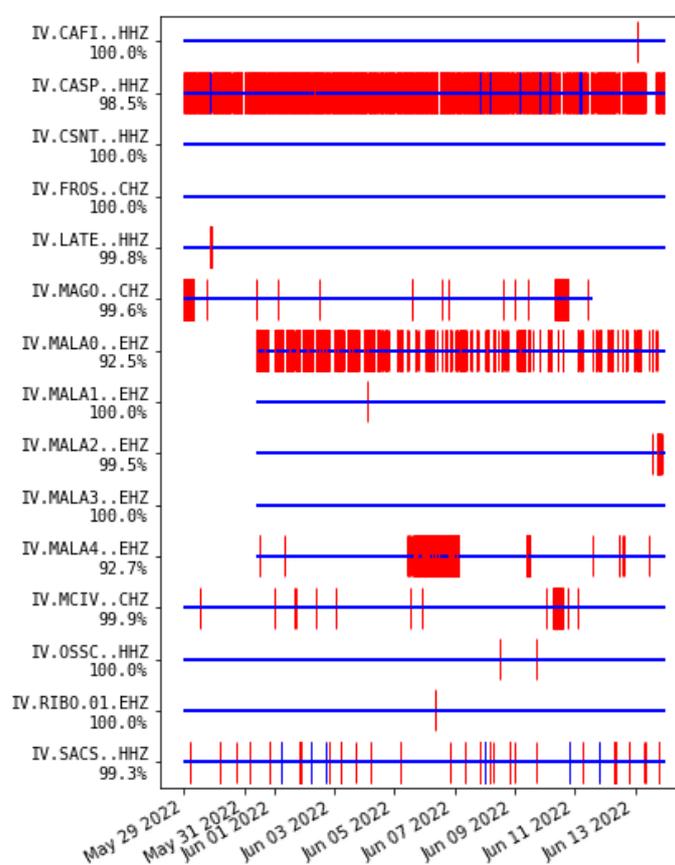
- acquisizione *datastream* dei segnali sismici in tempo reale;
- analisi automatica di dati (parametri ipocentrali, Magnitudo) in tempo quasi reale;
- rielaborazione manuale: revisione parametri, calcolo meccanismo focale, PGV, PGA;
- Reportistica;

Questo software è protetto da licenza e supportato da assistenza direttamente dalla casa costruttrice.

3.2 Controllo e valutazione della qualità dei dati

L'immagine seguente mostra la disponibilità dei dati acquisiti in tempo reale dalle stazioni sismiche che compongono la rete di monitoraggio per la geotermia Toscana (linea orizzontale blu). Le barre verticali indicano, se rosse interruzioni nei dati, se blu sovrapposizione dei dati. Come possiamo vedere nella Figura 3.1, dove viene mostrata la disponibilità dei dati nell'intervallo di tempo dal 29 maggio al 14 giugno 2022, a parte qualche breve interruzione nel segnale, sia le stazioni della rete IV che dell'array MALA acquisiscono e trasmettono i dati in modo continuativo. Ci sono invece parecchie interruzioni nel segnale delle stazioni CASP (IV) e MALA0 (MALA) per la quale stiamo cercando di risolvere il problema.

Figura 3.1. Esempio di grafico per il controllo del funzionamento delle singole stazioni IV della prima configurazione della rete sismica integrata.



Per lo stesso intervallo di tempo, sono stati calcolati gli spettri di potenza (PSD - Power Spectral Density) per le stesse stazioni, al fine di valutare il livello assoluto dell'energia sismica per periodo (s). Le Figure seguenti riportano i plot degli spettri di potenza determinati per 15 giorni di rumore sismico registrato dalle tre componenti (Z-verticale, N-S, E-W) delle stazioni dell'array MALA (Figura 3.2) e della rete IV, IV/EL di EGP (Figura 3.3), operative nelle aree geotermiche toscane. 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 (1993). Si

possono osservare delle fluttuazioni delle diverse curve al di sotto di 1s di periodo che dimostrano la variazione giornaliera del livello di energia del segnale, soprattutto ad alcune stazioni.

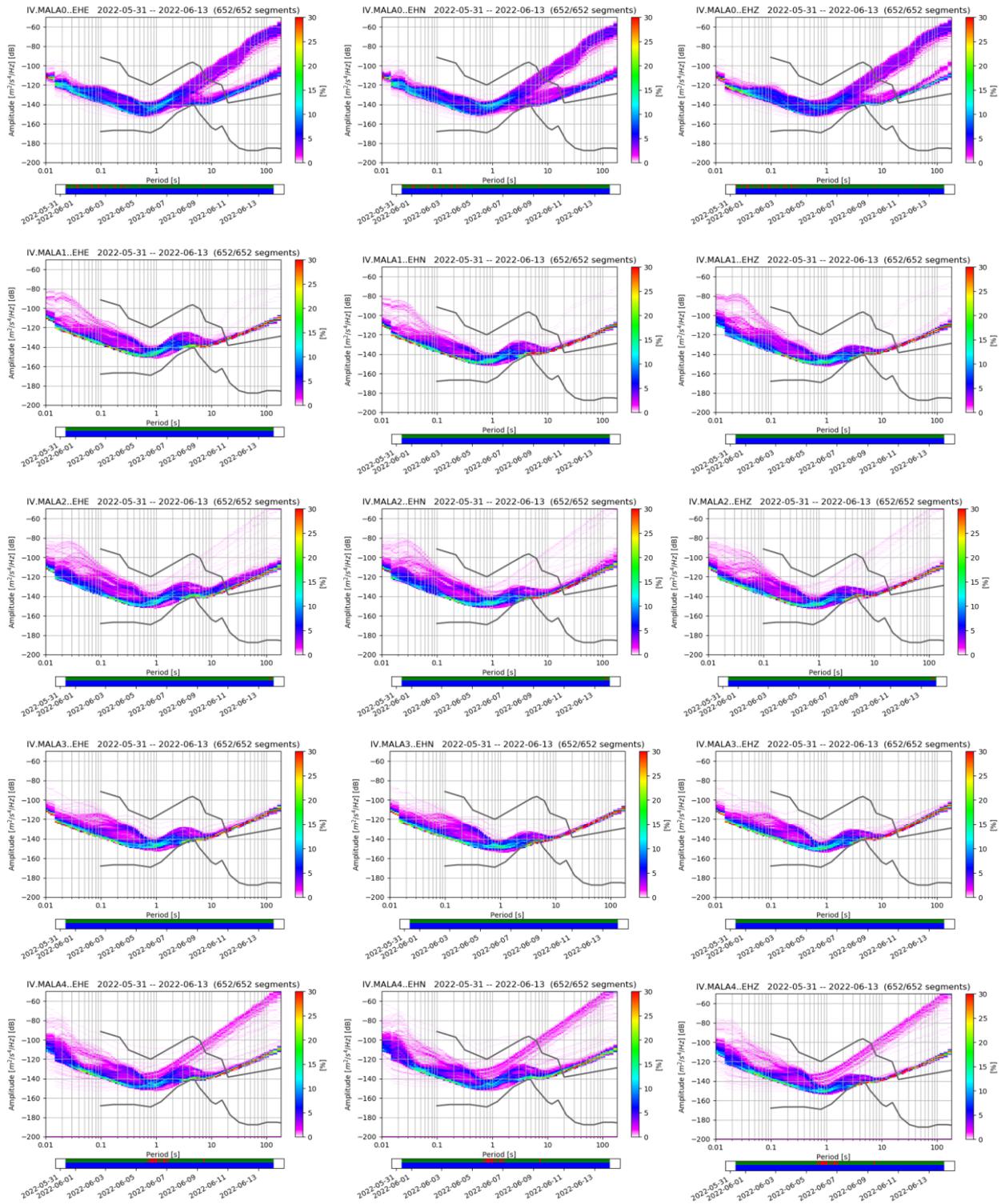
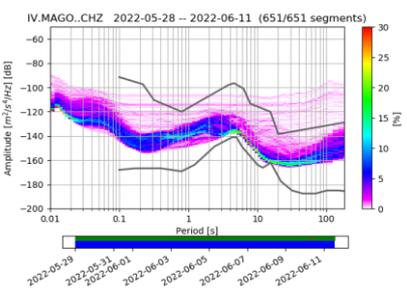
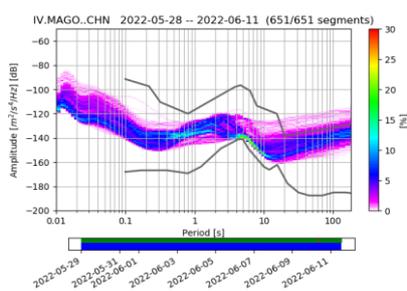
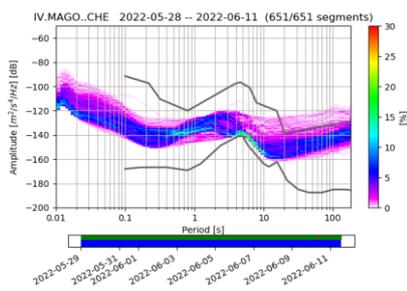
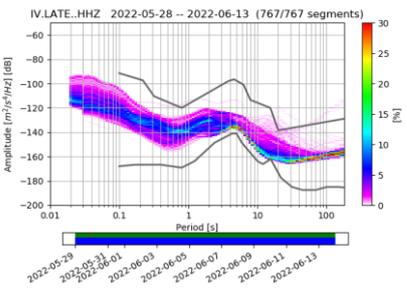
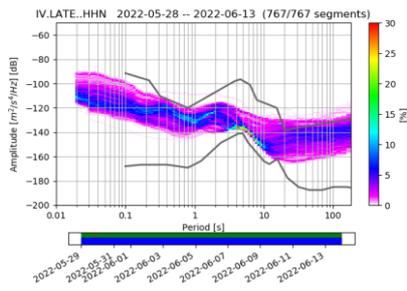
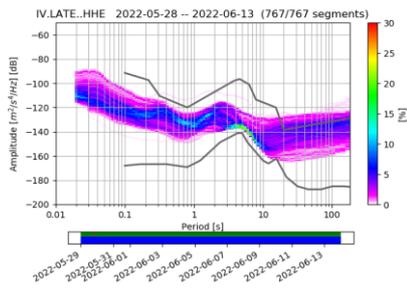
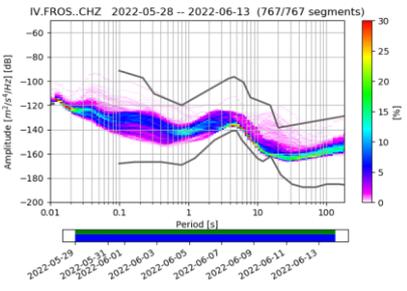
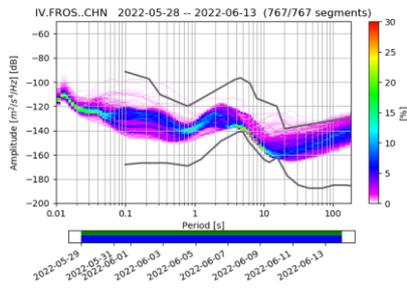
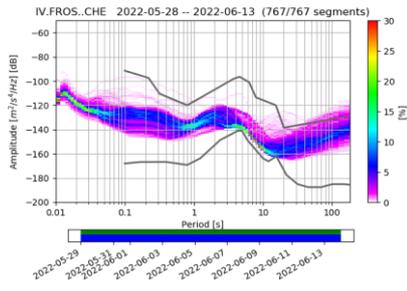
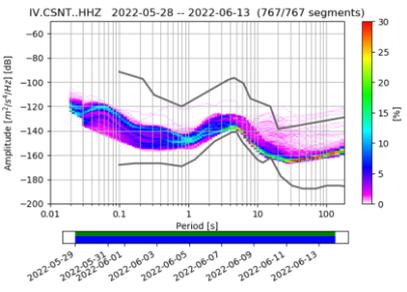
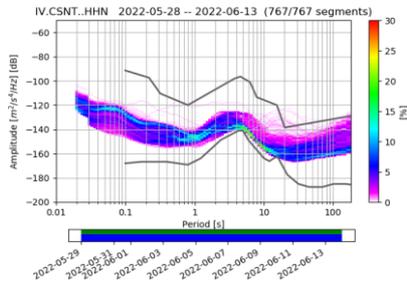
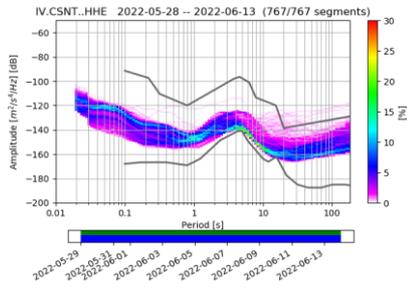
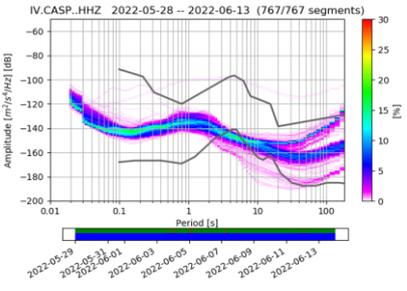
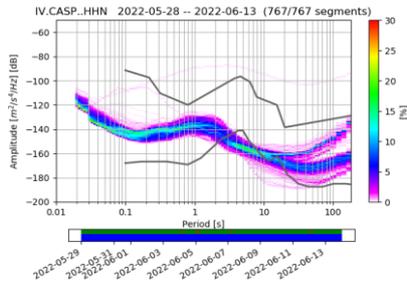
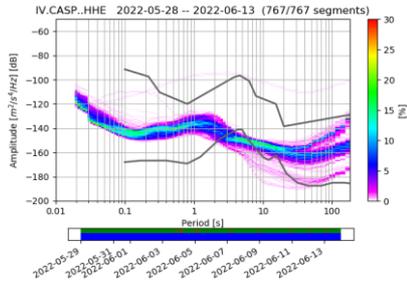
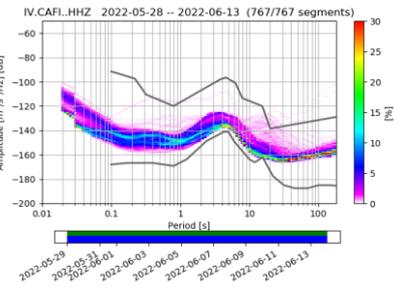
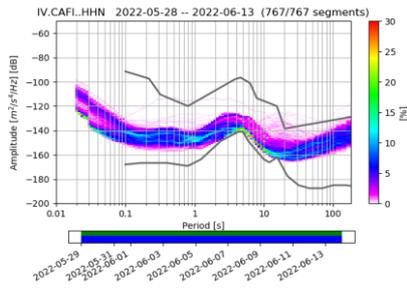
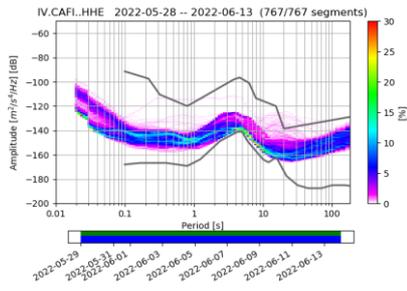


Figura 3.2. Esempi dei plot della PSD per monitorare la qualità dei dati registrati dalle stazioni dell'array.



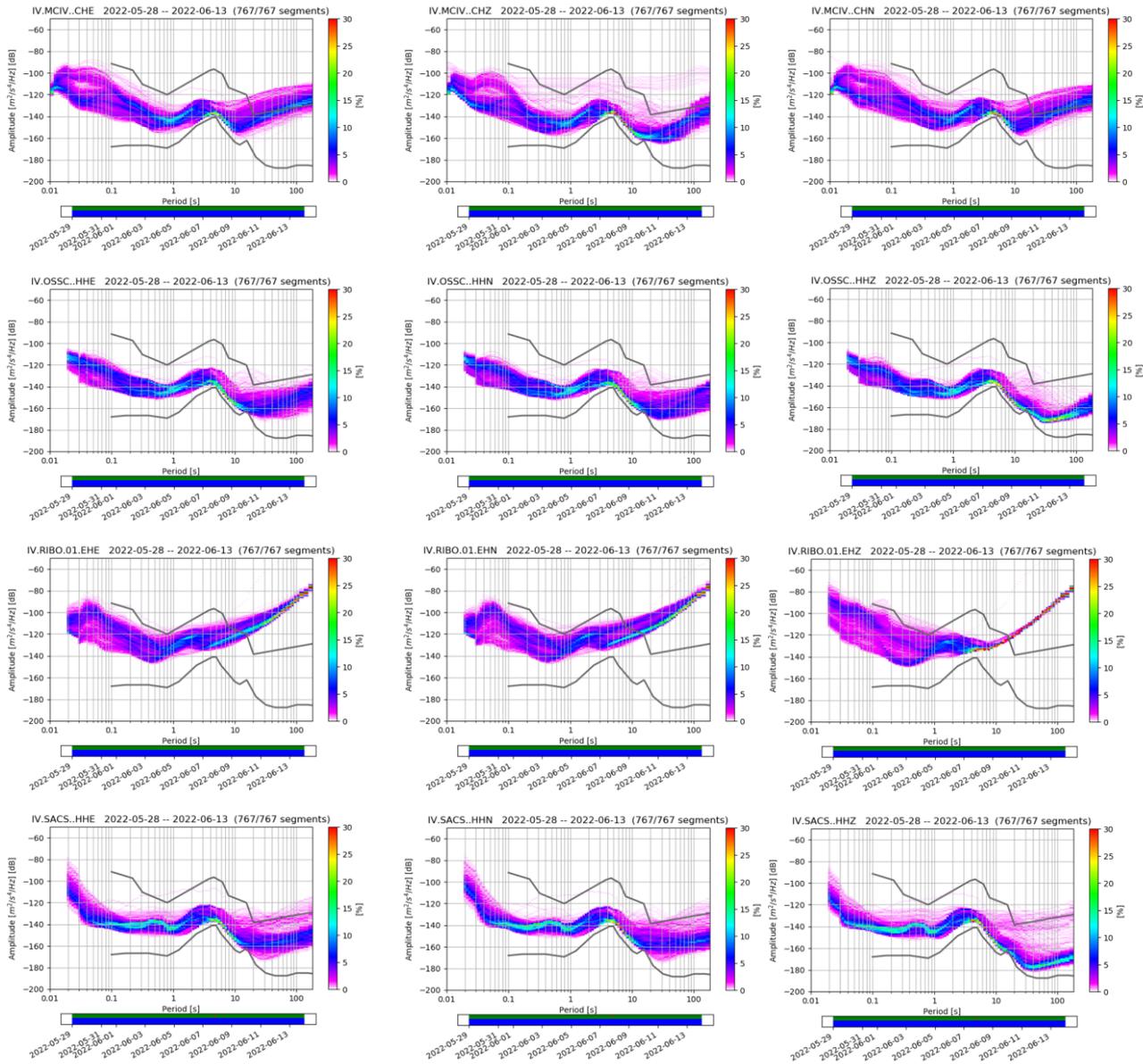


Figura 3.3. Esempi dei plot della PSD per monitorare la qualità dei dati registrati dalle stazioni delle reti IV e IV/EL.

3.3 Archiviazione dati sismici presso il CMS di Bologna

Il dato sismologico viene archiviato presso tre elementi di *storage*. I primi due afferiscono ai sistemi di immagazzinamento propri delle due macchine di acquisizione, locate presso TIER1. In questi elementi l'archiviazione avviene in formato chiuso per preservare la confidenzialità del dato sismologico in esse trattato. Un terzo punto di archiviazione avviene presso i locali della Sezione INGV di Bologna (e non presso TIER1), in questo caso in formato *Seedlink*, al fine di permettere una eventuale successiva analisi con programmi scientifici open source. L'accesso a questo *storage* con dati in formato aperto è strettamente regolamentata e controllata dal personale del CMS.

L'immagine di seguito dettaglia quanto indicato nei paragrafi 3.1 e 3.4.

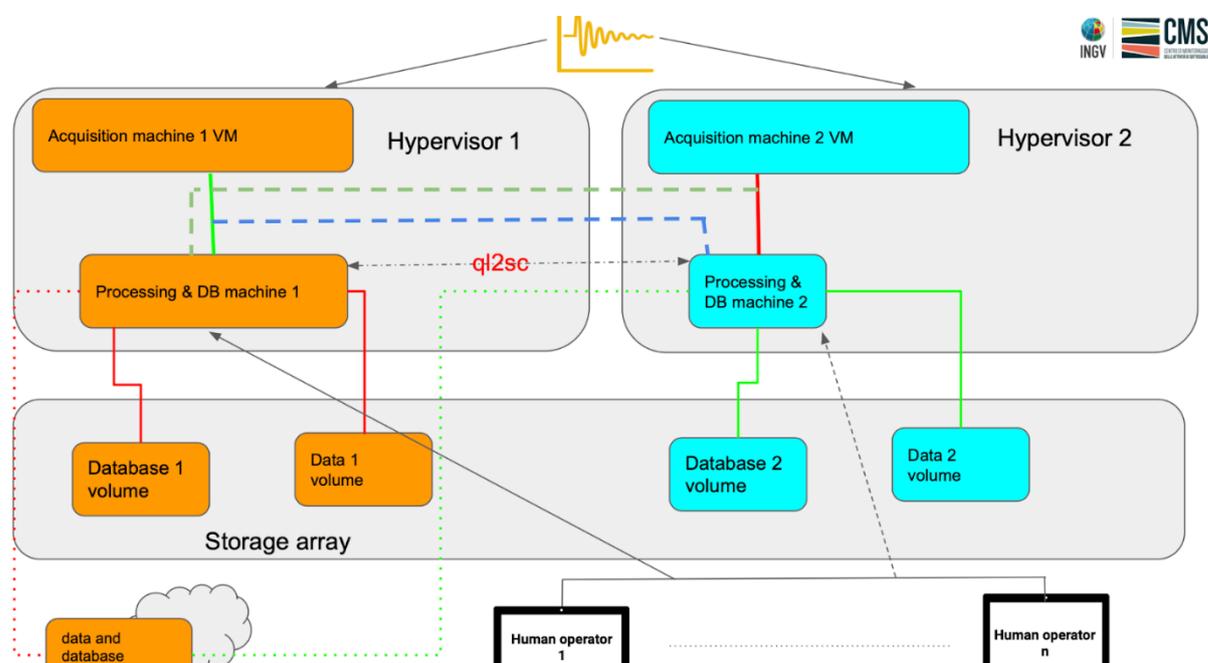


Figura 3.4. Architettura del Centro Acquisizione Dati (CAD-BO) presso l'INGV di Bologna.

3.4 Integrazioni di stazioni IV e trasmissione a CAD-BO

Come accennato nell'ultimo report, il CMS ha accesso ai dati in tempo reale della sala sismica di Roma gestita dall'Osservatorio Nazionale Terremoti (ONT). Confluiscono quindi i *datastream* delle stazioni operative nell'area di interesse tra il Monte Amiata e Larderello-Travale. Le stazioni elencate in Tabella 3.1 e illustrate in Figura 3.5 sono state integrate nel sistema di acquisizione del CMS e sono state applicate le correzioni della risposta in frequenza a ciascuna stazione per correggere le ampiezze delle forme d'onda e consentire una stima idonea delle magnitudo degli eventi localizzati.

Sigla	Rete	Lat [°] N	Long [°] E	Alt [m]	Località	Provincia
ARCI	IV	42.851900	11.475400	1080	Arcidosso	GR
CAFI	IV	43.329200	11.966300	547	Castiglion Fiorentino	AR
CASP	IV	42.790800	10.865200	390	Castiglion della Pescaia	GR
CSNT	IV	43.473110	11.290170	636	Castellina in Chianti	SI
FROS	IV/EL	43.209720	11.156220	432	Frosini	SI
LATE	IV	42.613700	11.804000	610	Latera	VT
MAGO	IV/EL	43.273245	10.657926	280	Magona	LI
MCIV	IV/EL	42.778610	11.676500	790	Monte Civitella	GR
OSSC	IV	43.523580	11.245790	452	Osservatorio del Chianti	FI
RIBO	IV	42.949000	11.046500	50	Ribolla	GR
SACS	IV	42.849060	11.909670	845	San Casciano dei Bagni	SI
TRIF	IV/EL	43.114780	10.902650	596	Trifonti	GR
MALA0	IV	43.0058	11.4738	441	Montalcino S. Angelo Colle	SI
MALA1	IV	43.0039	11.4769	403	Montalcino S. Angelo Colle	SI
MALA2	IV	43.0036	11.4782	414	Montalcino S. Angelo Colle	SI
MALA3	IV	43.0052	11.4800	445	Montalcino S. Angelo Colle	SI
MALA4	IV	43.0056	11.4777	430	Montalcino S. Angelo Colle	SI
MALA5	IV	43.0070	11.4781	444	Montalcino S. Angelo Colle	SI

Tabella 3.1. Elenco delle stazioni sismiche della rete IV e dell'array MALA operative nelle aree geotermiche toscane. Le stazioni elencate con font blu sono in condivisione con la rete sismica EL di EGP.

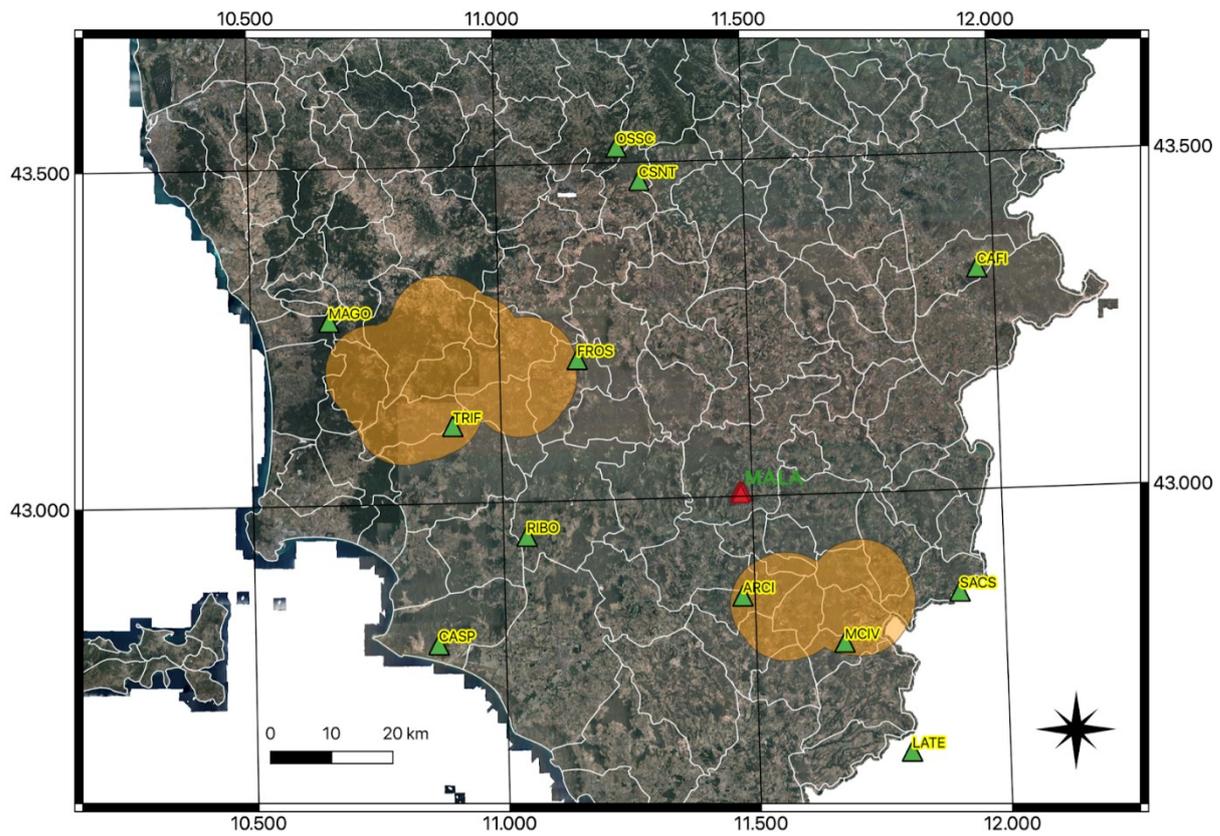


Figura 3.5. Mappa delle stazioni sismiche della rete IV e dell'array MALA operative nelle aree geotermiche tra Larderello e Amiata (vedi Tabella 3.1).

4 WP4: Monitoraggio e analisi dati

Seguendo gli ILG (UNMIG, 2016) l'obiettivo del monitoraggio sismico è:

1. rilevare, localizzare e determinare i principali parametri di sorgente della sismicità e microsismicità verificatasi nel dominio di rilevazione;
2. migliorare a scala locale il livello di magnitudo di completezza degli eventi sismici rilevati all'interno del dominio di rilevazione;
3. misurare con accuratezza le velocità di oscillazione e le accelerazioni del suolo prodotte in superficie da terremoti in prossimità dell'area di coltivazione e reiniezione.

I dati rilevati dovranno anche servire a costruire un catalogo di eventi sismici che possa essere utilizzato per valutare l'evoluzione nel dominio spazio-tempo-magnitudo della sismicità nel dominio di rilevazione, e analizzare la pericolosità dell'eventuale sismicità indotta, anche in relazione al tempo.

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

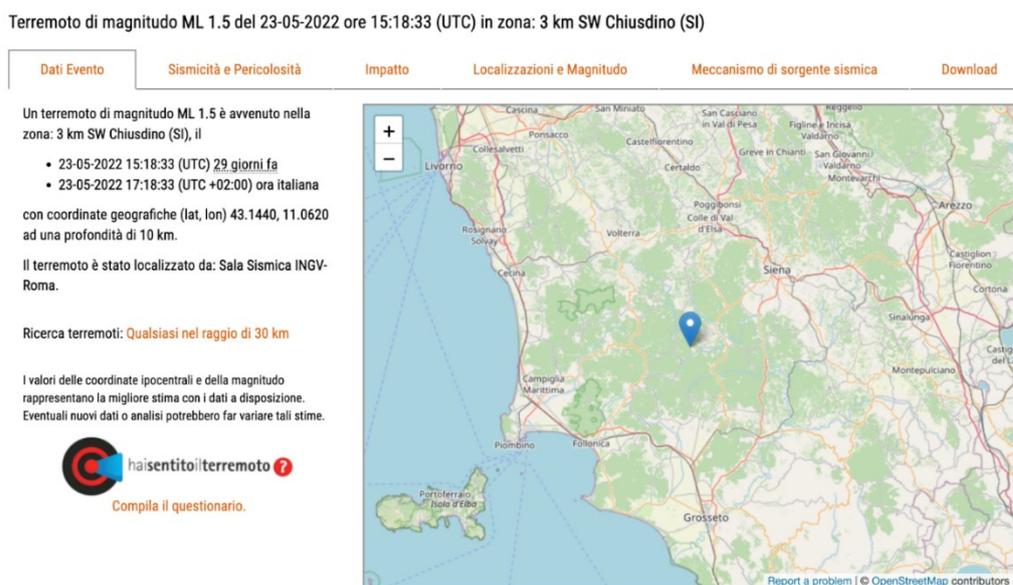
1. nel dominio di rilevazione, rilevare e localizzare i terremoti a partire da magnitudo locale ML compresa tra 0 e 1 ($0 \leq ML \leq 1$) e con errori nella localizzazione dell'ipocentro non superiori a poche centinaia di metri;
2. determinare l'accelerazione e la velocità del moto del suolo provocata da eventuali terremoti presso i punti di misurazione;
3. integrarsi opportunamente con le reti di monitoraggio esistenti (ovvero: rete nazionale, reti regionali e ulteriori eventuali reti locali) al fine di migliorare l'accuratezza e la completezza della rilevazione della sismicità mediante la stipula di opportuni accordi tra il Concessionario, l'Amministrazione competente ed i soggetti gestori delle reti di monitoraggio esistenti.

Secondo l'Accordo di Collaborazione RT - INGV, in caso di eventi significativi all'interno delle aree monitorate, viene richiesta la compilazione di un apposito report scientifico. Nell'ambito dei processi decisionali connessi con le attività di monitoraggio sismico, la RT richiede inoltre il supporto tecnico-scientifico del CMS-INGV.

4.1 Analisi dati sismici di dettaglio, monitoraggio secondo ILG

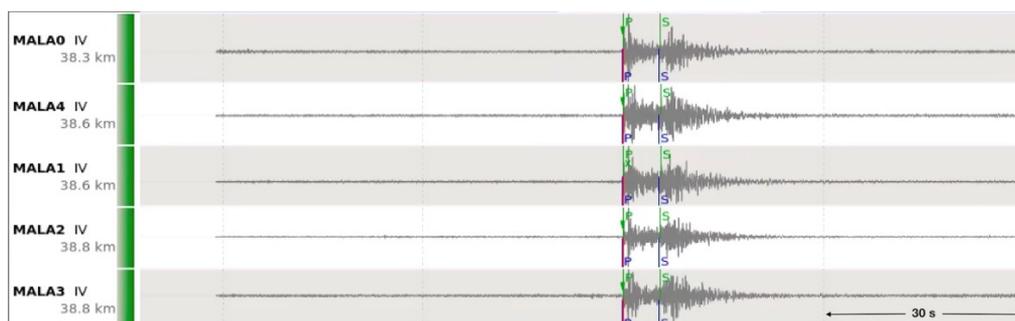
Di seguito viene illustrato la procedura dell'analisi standard di un evento sismico avvenuto nell'area di interesse, attraverso il software SeisComP4 (SC4), prendendo come esempio un evento sismico di Magnitudo $ML=1.5$ M, verificatosi nell'area di Chiusdino (SI) in data 23/05/2022 alle ore 15:18:33 UTC (17:18:33, ore italiane). La Figura 4.1 mostra uno *screenshot* con le informazioni relative all'evento fornite dalla sala sismica a Roma dell'ONT (<http://iside.rm.ingv.it/event/31203191?timezone=UTC>).

Figura 4.1. <http://iside.rm.ingv.it/event/31203191?timezone=UTC>



Le tracce verticali registrate da MALA sono illustrate in Figura 4.2, usando il modulo SC4_scolv.

Figura 4.2. Registrazione di MALA dell'evento sismico di Figura 4.1.



Per effettuare l'analisi dei dati dell'array MALA con metodi di array, è stato acquistato il modulo SC4_Lambda. La Figura 4.3 mostra l'apposita pagina di elaborazione con Lambda: è stato applicato il metodo f - k , utilizzando le stazioni MALA0 - MALA4 dell'array MALA (MALA5 non era disponibile). I dati sono stati filtrati tra 0.5 e 10 Hz. Per il *grid search* del massimo dell'energia è stata definita una griglia con i seguenti estremi (Figura 4.3, Figura 4.4):

LonMin 10.6, LonMax 12, LatMin 42.7, LatMax 43.7.

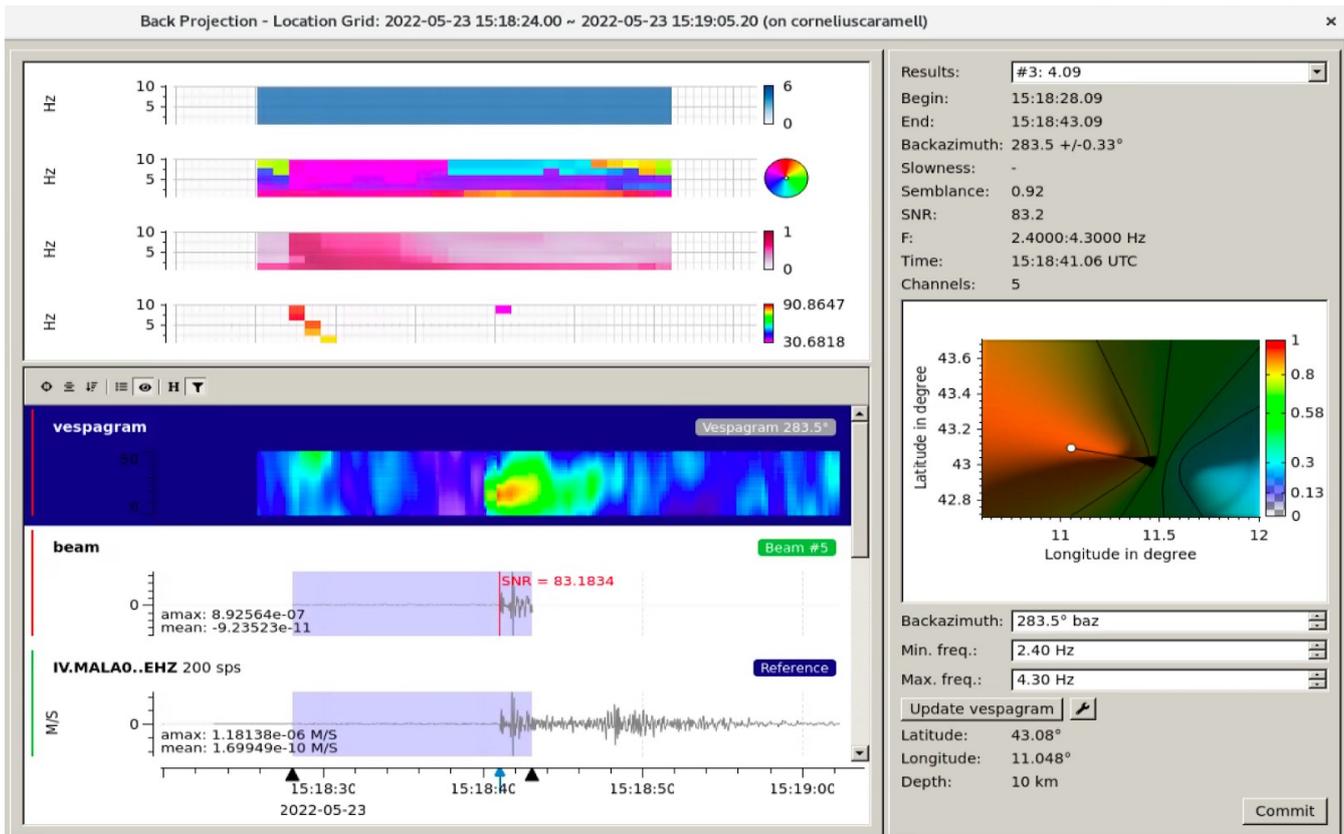


Figura 4.3. Scheda di analisi del modulo software SC4_Lambda.

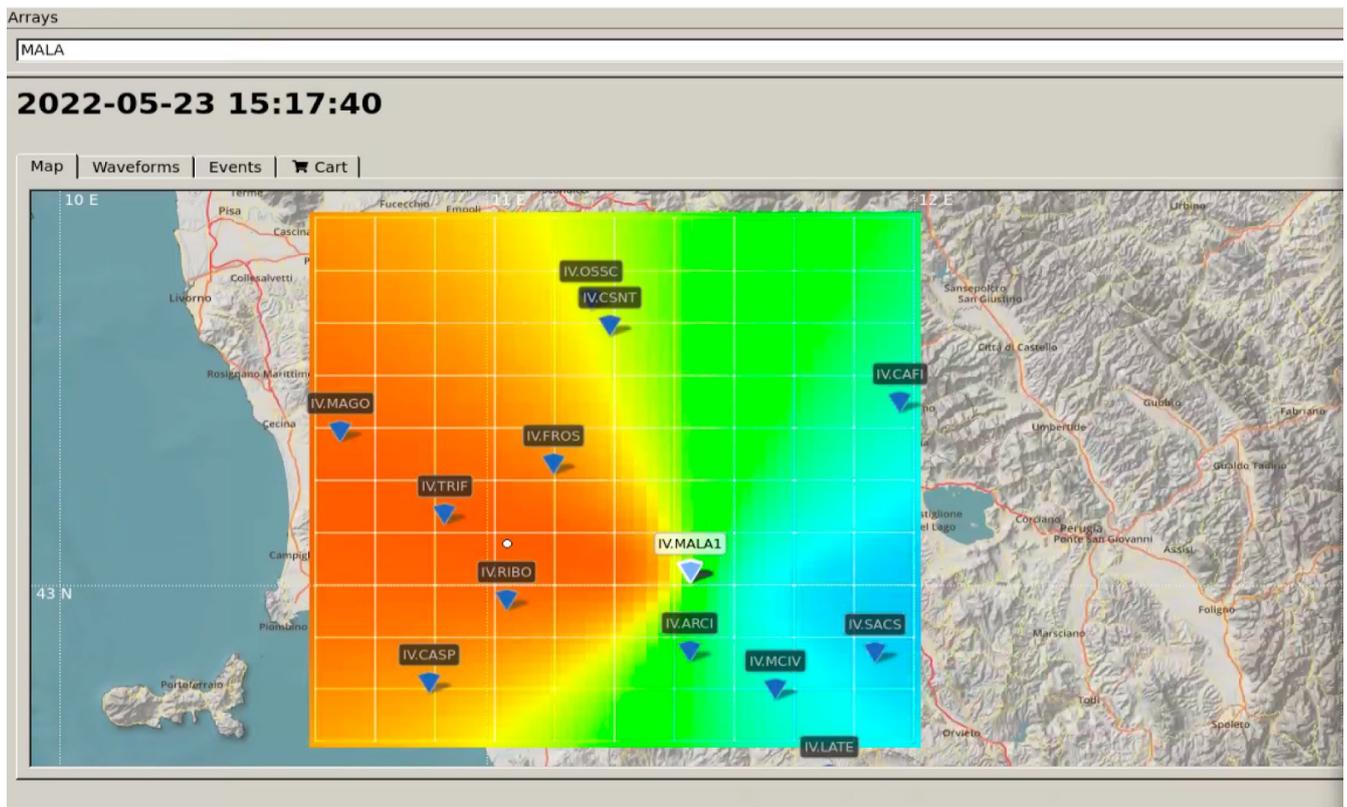


Figura 4.4. Scheda di risultato del modulo software SC4_Lambda.

Il risultato dell'analisi array è il vettore di *slowness*, che indica sia la direzione (*backazimuth*) sia l'angolo di incidenza del fronte d'onda che raggiunge l'array. La retro-proiezione per il massimo dell'energia coerente permette di calcolare le coordinate ipocentrali (*backprojection*). La Figura 4.4 indica l'energia coerente relativa per ogni cella della griglia predefinita con una scala di colori "arcobaleno" da blu (bassa coerenza) a rosso (alta coerenza). Il massimo (epicentro) è rappresentato da un cerchio bianco.

Aggiungendo all'array alcune delle stazioni della rete IV/EL (FROS, RIBO, MAGO, CSNT, OSSC, ARCI) l'analisi classica effettuata con SC4_scolv fornisce il risultato per le coordinate ipocentrali illustrato in Figura 4.5, che include anche il grafico delle dromocrone per gli arrivi Pg e Sg (palline verdi).

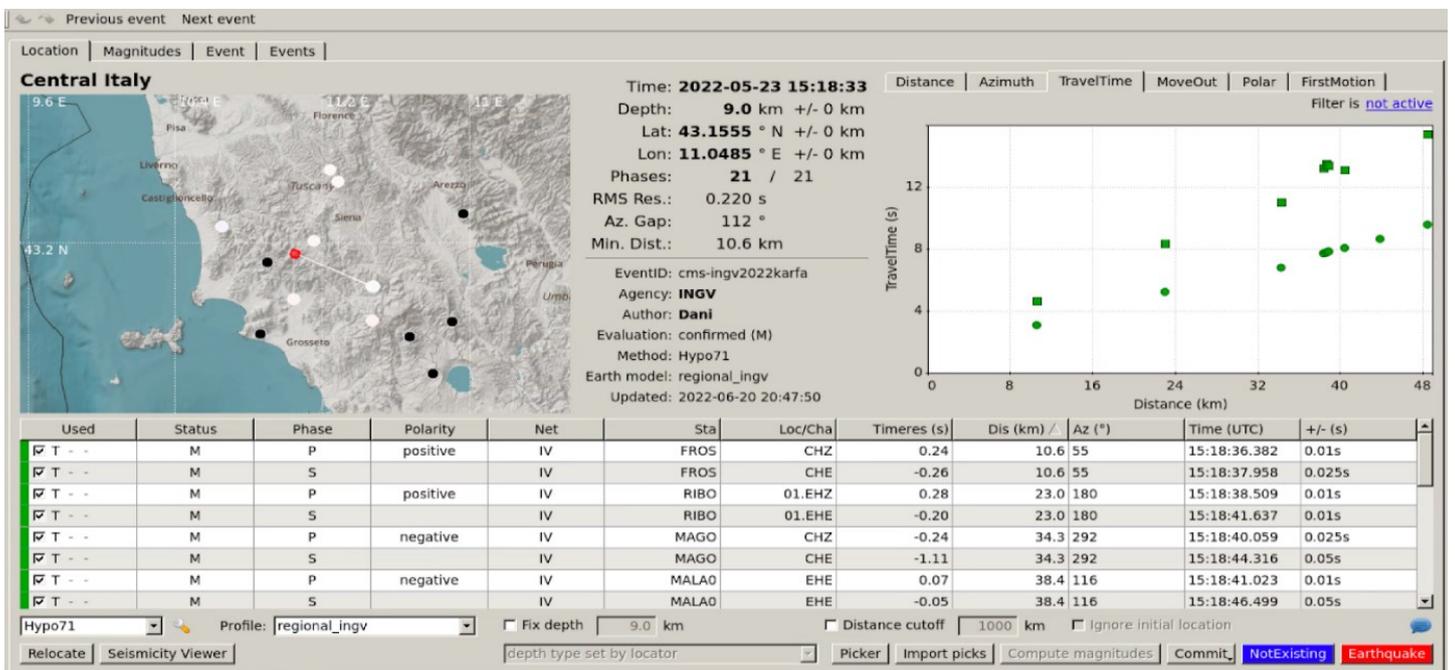


Figura 4.5. Scheda di localizzazione del modulo software SC4_Scolv.

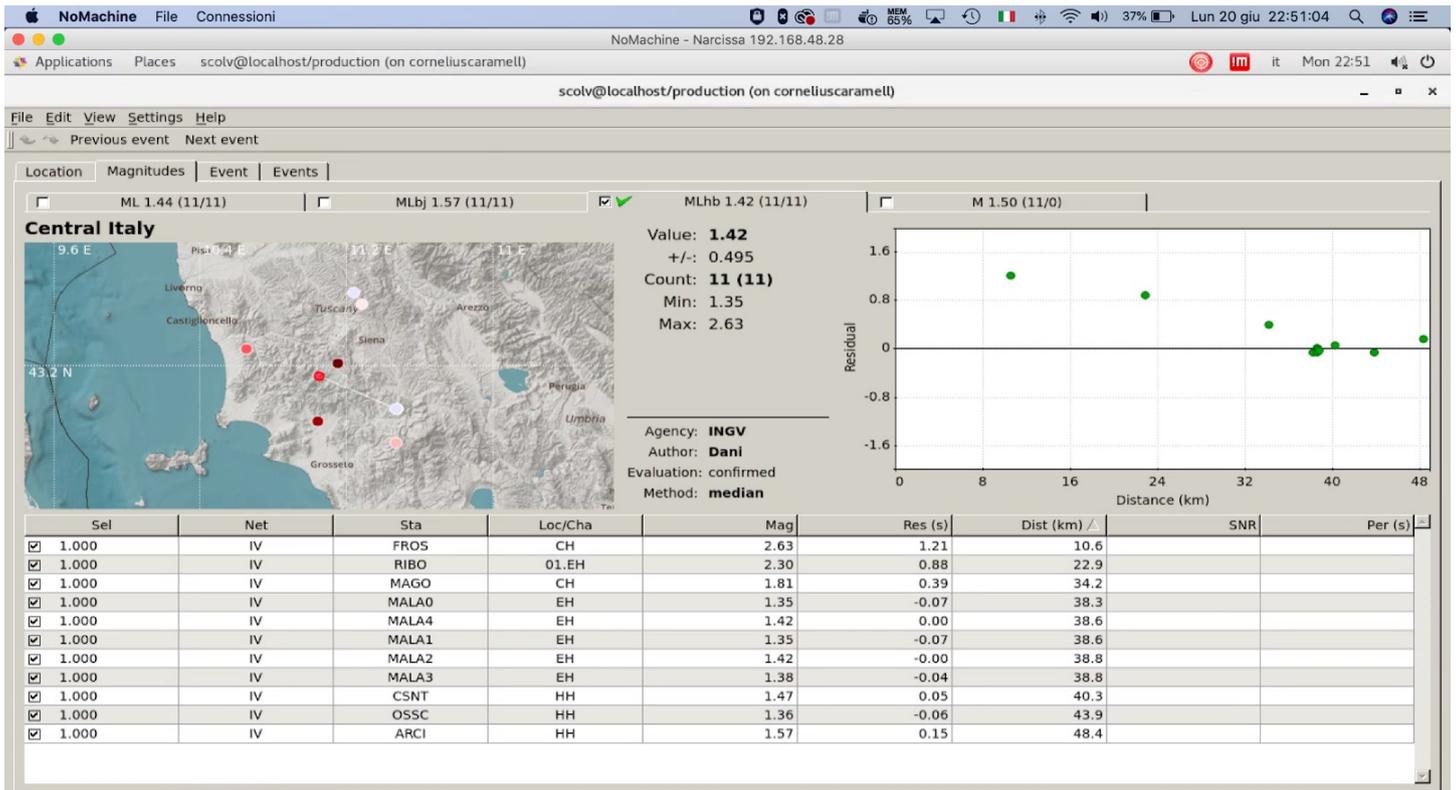


Figura 4.6. Scheda di calcolo della magnitudo del modulo software SC4_Scolv.

La Figura 4.6 mostra il risultato del calcolo della magnitudo, applicando il modulo SC4_scolv. Il miglior fit risulta con il modello di velocità regionale INGV. Uno dei futuri compiti è la definizione di un modello di velocità 3D del volume crostale delle aree geotermiche toscane. La magnitudo locale (secondo Hutton & Boore, 1987) risulta MLhb 1.44.

4.2 Organizzazione dei turni di monitoraggio/reperibilità.

Dai primi mesi del 2021 la SPM ha istituito un sistema di sorveglianza della sismicità registrata entro le aree dei domini di interesse per le diverse sperimentazioni organizzato con turni settimanali di reperibilità di un sismologo addestrato all'elaborazione quotidiana dei dati acquisiti e alla compilazione di bollettini giornalieri.

E' stato stilato dal direttivo del CMS un mansionario del turnista, applicato e collaudato per la sperimentazione in Val d'Agri (concessione ENI) che da un paio di anni monitora il dominio di interesse nell'area, analizzando i dati di una rete sismica integrata composta di 57 stazioni tra pubbliche e private.

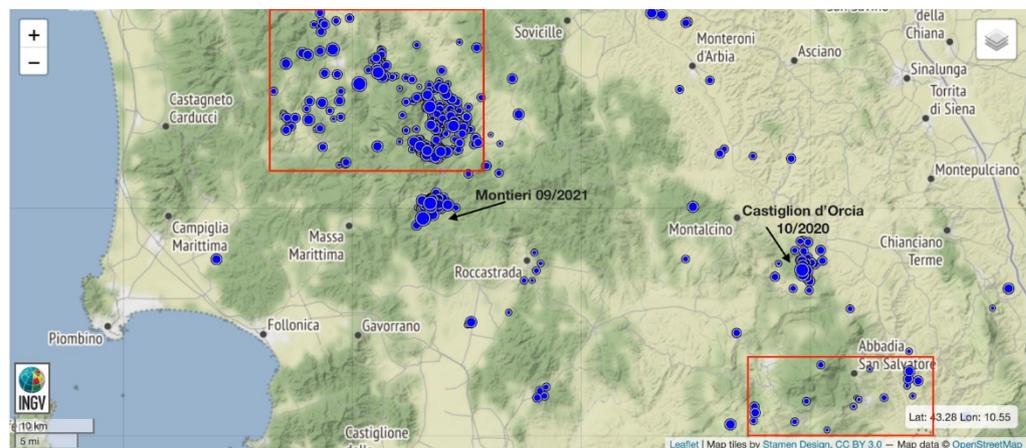
La rete integrata attuale che consiste in stazioni dell'INGV operative nell'area di interesse (IV), stazioni EGP condivise con INGV (vedi §3.4) e dell'array MALA è in grado di fornire i dati necessari per inserire la "geotermia Toscana" nei turni di monitoraggio e redigere un bollettino sismico.

4.3 Bollettino sismico

Dovuto al fatto che (i) ad oggi non sono ancora disponibili dati sismici provenienti da parte dei concessionari operativi nelle aree geotermiche e (ii) che l'array MALA è ancora in fase di configurazione definitiva, il monitoraggio sismico ordinario da parte del CMS non è ancora iniziato. Quindi, le stazioni sismiche utili al monitoraggio appartengono tutte alla rete sismica Nazionale dell'INGV, che pubblica il bollettino quotidianamente su web <http://terremoti.ingv.it>.

Come evidente dalla mappa in Figura 4.7, per il periodo dall'inizio del presente AC ad oggi (01/07/2020 - 22/06/2022), all'interno di un'area con raggio 50 km intorno alla coordinata centrale 43.0/11.3, l'ONT ha localizzato 402 eventi compresi tra $0 \leq ML \leq 2.8$, di cui l'evento più forte con epicentro a Montieri, verificatosi in data 18/09/2021.

Figura 4.7. Scheda di calcolo della magnitudo del modulo software SC4_Scolv.



Prendendo in considerazione solamente le concessioni attualmente attive (vedi Figura 2.1) la sismicità osservata si riduce alle due aree delimitate da rettangoli rossi (Figura 4.7). Tali aree si estendono intorno alle concessioni produttive di EGP a Larderello Travale con 229 eventi sismici, di cui 75 $M \geq 1.5$ (Tabella 4.1) e sul Mt. Amiata con 18 eventi sismici, di cui 4 con $M \geq 1.5$ (Tabella 4.2). Le piccole sequenze registrate a Montieri (settembre 2021) e a Castiglion d'Orcia (ottobre 2020) si trovano in aree con "permesso di ricerca" o "istanze di concessioni" (vedi Figura 8 nel Report 2: CMS, 2020b) e sono attualmente esterni ai domini di monitoraggio.

Data e Ora (Italia) 📅🕒	Magnitudo 📉📈	Zona 📍	Profondità 📏	Latitudine	Longitudine
2021-04-11 02:55:53	ML 2.7	Castelnuovo di Val di Cecina (PI)	10	43.21	10.91
2021-04-17 17:45:53	ML 2.5	6 km N Montieri (GR)	11	43.18	11.02
2022-04-06 13:11:07	ML 2.4	3 km NE Castelnuovo di Val di Cecina (PI)	8	43.22	10.94
2021-07-24 20:40:40	ML 2.3	6 km NW Castelnuovo di Val di Cecina (PI)	9	43.25	10.87
2020-09-20 05:15:46	ML 2.3	3 km W Chiusdino (SI)	7	43.16	11.05
2022-06-05 21:14:28	ML 2.1	2 km NW Montieri (GR)	9	43.15	10.99
2022-03-23 23:45:13	ML 2.1	2 km NW Montieri (GR)	10	43.14	11.00
2021-05-17 08:33:44	ML 2.1	1 km NW Montieri (GR)	9	43.13	11.01
2021-05-21 21:49:26	ML 2.1	1 km E Montieri (GR)	10	43.13	11.03
2021-09-16 00:02:30	ML 2.0	1 km SE Montieri (GR)	9	43.13	11.03
2021-12-04 16:45:40	ML 2.0	6 km S Radicondoli (SI)	6	43.20	11.04
2021-03-19 00:53:56	ML 2.0	1 km W Montieri (GR)	9	43.13	11.01
2022-03-10 03:56:32	ML 2.0	6 km S Radicondoli (SI)	6	43.21	11.03
2021-05-07 19:18:36	ML 2.0	7 km N Montieri (GR)	9	43.20	11.01
2020-09-08 12:01:15	ML 2.0	3 km NW Monterotondo Marittimo (GR)	7	43.17	10.83
2021-05-03 12:12:14	ML 1.9	4 km N Montieri (GR)	10	43.16	11.02
2021-04-23 04:42:00	ML 1.9	3 km NE Castelnuovo di Val di Cecina (PI)	7	43.23	10.94
2021-12-01 17:16:34	ML 1.9	2 km E Montieri (GR)	10	43.13	11.04

Tabella 4.1. Elenco degli eventi sismici più forti registrati dalla rete RSN (IV) nell'area di Larderello - Travale nel periodo 01/07/2020 - 22/06/2022.

Data e Ora (Italia) 📅🕒	Magnitudo 📉📈	Zona 📍	Profondità 📏	Latitudine	Longitudine
2020-09-08 17:15:20	ML 1.8	2 km SW Radicofani (SI)	7	42.89	11.75
2021-03-19 02:50:11	ML 1.7	4 km SW Arcidosso (GR)	6	42.84	11.52
2020-12-12 03:13:56	ML 1.6	3 km S Radicofani (SI)	10	42.88	11.77
2020-12-18 11:33:27	ML 1.6	3 km SW Radicofani (SI)	7	42.88	11.75
2021-03-19 01:58:05	ML 1.4	4 km SW Arcidosso (GR)	7	42.84	11.52
2021-07-01 04:24:16	ML 1.2	5 km W Abbazia San Salvatore (SI)	7	42.89	11.62
2021-03-19 01:36:27	ML 1.1	5 km N Roccalbegna (GR)	5	42.83	11.51
2021-06-06 23:35:04	ML 1.1	2 km E Piancastagnaio (SI)	6	42.86	11.71
2020-12-18 11:19:16	ML 1.1	2 km SW Radicofani (SI)	8	42.88	11.75
2021-06-08 13:14:50	ML 1.1	1 km W Santa Fiora (GR)	4	42.83	11.58
2021-07-18 16:05:11	ML 1.1	2 km N Santa Fiora (GR)	7	42.85	11.60
2020-10-24 17:11:47	Md 0.9	2 km W Piancastagnaio (SI)	4	42.85	11.67
2021-07-05 20:41:23	ML 0.9	4 km SW Radicofani (SI)	7	42.87	11.75
2021-01-17 22:32:32	ML 0.8	5 km S Radicofani (SI)	10	42.86	11.76
2020-08-11 20:24:32	ML 0.8	1 km W Piancastagnaio (SI)	5	42.85	11.68

Tabella 4.2. Elenco degli eventi sismici più forti registrati dalla rete RSN (IV) nell'area di Monte Amiata nel periodo 01/07/2020 - 22/06/2022.

5 WP5: Disseminazione/divulgazione risultati

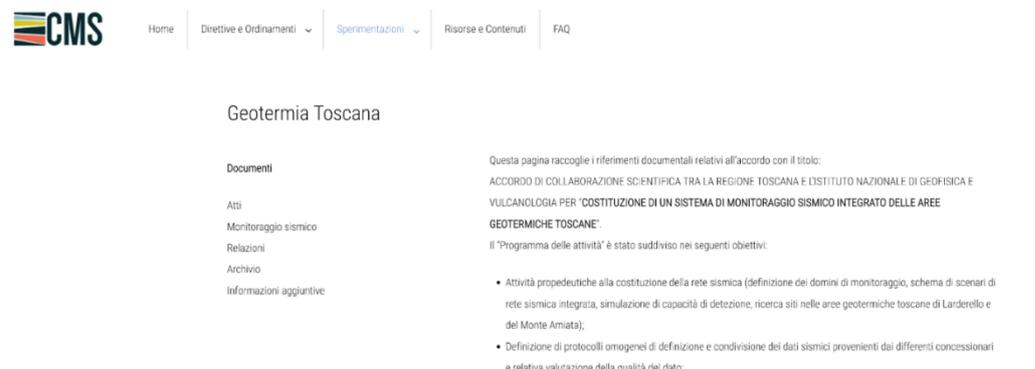
Il CMS informa e divulga le informazioni che riguardano il monitoraggio oggetto di questo report mediante il suo sito internet cms.ingv.it, alla sezione sperimentazioni > Geotermia Toscana

Figura 5.1. La pagina home del sito CMS e la sezione "Geotermia Toscana"



La sezione presenta una prima introduzione generale alla sperimentazione, ed è suddivisa in Atti, Monitoraggio sismico, Relazioni, Archivio e Informazioni aggiuntive (Figura 5.2).

Figura 5.2. Pagina introduttiva della sperimentazione ed il menù con i dettagli sulla destra



- **Atti:** raccoglie i documenti di fondazione e di contesto di attuazione (Accordo di collaborazione scientifica)
- **Monitoraggio sismico:** descrive i dettagli tecnici relativi alla "rete sismica", al "Monitoraggio Sismico" e alle "Concessioni, istanze di concessioni e permessi di ricerca".
- **Relazioni:** raccoglie la pubblicazione dei rapporti tecnici.
- **Archivio:** raccoglie l'atto e le relazioni tecniche relativi all'accordo precedente
- **Informazioni aggiuntive:** informa su domande frequenti, sismicità storica e letteratura scientifica.

6 Conclusioni e raccomandazioni

Per il raggiungimento degli obiettivi principali dell'accordo di collaborazione scientifica tra la RT e INGV dal titolo "Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane, elencati nel §1.1 il progetto è stato suddiviso in 5 Work Packages illustrati in Figura 1.1.

Nonostante le difficoltà dovute alla situazione pandemica relativamente al WP02, sia WP02a pianificazione, sia WP02b realizzazione della rete sismica (MALA), possono essere considerate concluse (vedi §2). L'obiettivo WP02c - la realizzazione della rete sismica integrata - richiede la messa a disposizione dei *datastream* sismici da parte dei concessionari; un apposito protocollo d'intesa tra RT e EGP dovrebbe essere siglato prossimamente, in maniera tale che entro la fine dell'anno 2022, la trasmissione dei dati EGP al CAD-BO potrà essere realizzata.

Per ciò che concerne il WP03, i dati attualmente acquisiti presso CAD-BO, provenienti dalle stazioni RSN (IV) e dall'array MALA, vengono regolarmente archiviati, secondo gli standard protocollo CAPS. Tale protocollo di archiviazione garantisce una gestione di dati sensibili non-pubblici, provenienti da reti differenti, rispettando la privacy.

Per quanto riguarda il WP04 - Monitoraggio e analisi dati sismici, a 24 mesi dall'inizio dell'accordo è già stata preparata e predisposta tutta l'infrastruttura per poter iniziare il monitoraggio sismico standard attraverso dei turni di sorveglianza giornalieri (vedi §4.2), non appena disponibili i *datastream* sismici dei concessionari.

In merito alla divulgazione e la disseminazione delle attività e dei risultati è stata realizzata una prima versione della pagina WEB cms.ingv.it/sperimentazioni/geotermia-toscana (vedi §5).

In conclusione, gli obiettivi definiti nel diagramma Gantt (Figura 1.1) sono stati quasi tutti raggiunti con eccezione della ricezione dei dati sismici da parte di concessionari e la messa a disposizione delle informazioni relative ai pozzi di produzione e reiniezione.

Un argomento da affrontare nel terzo anno è la definizione dei Domini Interni di Rilevamento (DIR) in funzione delle concessioni attive. Come accennato nel report finale della precedente convenzione (RT 2020), nell'ottica della futura realizzazione della rete di monitoraggio sismico integrata, è necessario approvare intanto i DIR per le concessioni EGP di LARD e AMIA.

La proposta presentata nel §6 del RT (2020), consiste nella definizione del DIR per ogni concessione come volume che si estende per 8 km prendendo come riferimento l'involuppo dei pozzi di reiniezione, sia lateralmente che in profondità.

Infine sarà necessario definire il cosiddetto Comitato, composto da Concessionari, SPM, Regione Toscana ed eventuali amministratori locali e di decidere se applicare un sistema a semaforo e quali valori di soglia definire.

Glossario

ACS:	Accordo di Collaborazione Scientifica
CAD-BO:	Centro Acquisizione Dati - Bologna
CMS:	Centro di Monitoraggio per le attività di Sottosuolo
CPTI15:	Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (2015_v3, Rovida et al., 2021):
DIR:	Dominio Interno di Rilevamento
EGP:	Enel-Green Power
GB:	GigaByte
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 RSN
MATTM:	Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio del Mare
MiSE:	Ministero dello Sviluppo Economico
ML:	Magnitudo locale
PGA:	Peak Ground Acceleration
PGV:	Peak Ground Velocity
PRI:	Pozzo di Reiniezione
RT:	Regione Toscana
RSN:	Rete Sismica Nazionale (INGV)
SC4:	SeisComP v.4.5
SPM:	Struttura Preposta al Monitoraggio
TB:	TeraByte

Bibliografia

Braun T., Dahm T., Krüger F. and Ohrnberger M.; 2016: Does geothermal exploitation trigger earthquakes in Tuscany? *Eos*, 97, doi: 10.1029/2016E0053197.

Braun T., Caciagli M., Carapezza M., Famiani D., Gattuso A., Lisi A., Marchetti A., Mele G., Pagliuca NM, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.06.005>

Braun T., Cesca S., Kuhn 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., Famiani D., Caciagli M., Cesca S., Heimann S. & Dahm T. (2021): On the origin of micro-earthquakes in geothermal areas (OMEGA): first results from a seismic experiment at Mt. Amiata (Italy). *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 62 (2), pp. 231-242.

Brogi A. and Fabbrini L. (2009): Extensional and strike-slip tectonics across the Monte Amiata - Monte Cetona transect (northern Apennines, Italy) and seismotectonics implications. *Tectonophys.*, 476, 195-209.

Brogi A., Capezzuoli E., Liotta D. and Meccherini M. (2015): The Tuscan Nappe structures in the Monte Amiata geothermal area (central Italy): a review. *Ital. J. Geosci.*, 134, 219-236, doi: 10.3301/IJG.2014.55.

CMS (2020a): Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane. T. Braun & A. Morelli: "Relazione di Inizio Attività"; 24/07/2020; 14 pp.

CMS (2020b): Costituzione di un sistema di monitoraggio sismico integrato delle aree geotermiche toscane. T. Braun, M. Errico, D. Famiani, A. Morelli: "Relazione Tecnica Intermedia"; 30/11/2020; 31 pp.

Famiani D., M. Caciagli, A. Govoni, M. Mariotti, M. Martini, W. Thorossian and T. Braun (2019). Caratteristiche del campo d'onda del rumore sismico di un'installazione array in Italia Centrale. *Atti 38. Convegno G.N.G.T.S.*, 12.-14. Nov. 2019, Roma/Italy.

<https://www.cnaf.infn.it/wlwg-tier-1-data-center/>

Hutton, L.K., & M. Boore (1987). The ML scale in southern California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 77, 2074-2094. Richter C.F. (1935): An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seism. Soc. Am.* 25, 1–31

INGV (2018a): Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL - GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale ed Amiata. T. Braun & D. Famiani: Prima relazione (7 Luglio 2018) nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018; 6 pp.

INGV (2018b): Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL - GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale. T. Braun & D. Famiani: Seconda relazione (28 Novembre 2018) nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018; 14 pp.

INGV (2019): Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL - GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale. T. Braun & D. Famiani: Terza Relazione (29 Novembre 2019) nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018; 20 pp.

- INGV (2021): Supporto scientifico per la valutazione del monitoraggio sismico operato dalle reti ENEL - GREEN POWER nelle aree geotermiche di Larderello – Travale. T. Braun & D. Famiani: relazione finale (14 Giugno 2021) nell'ambito della convenzione RT-INGV del 13 Giugno 2018; 25 pp
- Lee, W. H. K., and J. C. Lahr (1972). HYP071: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 72-224, doi: 10.3133/ofr72224.
- Lee, W. H. K., and J. C. Lahr (1975). HYP071: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, U.S. Geol. Surv. Open-File Report. 75-311, doi: 10.3133/ofr75311.
- Lisi A., Marchetti A., Frepoli A., Pagliuca N.M., Mele G., Carapezza M.L., Caciagli M., Famiani D., Gattuso A. & Braun T. (2019): Microseismicity analysis in the geothermal area of Torre Alfina, Central Italy. *J. Seismology*; <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09865-8>
- Nakamura Y (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quart Rep RTR* 30(1): 25–33
- Pandeli E., Bertini G., Orti L. (2017): Inquadramento geologico regionale dell'area del Monte Amiata. p.21-48, in Principe C., Lavorini G. and Vezzoli M.L. (eds.) (2017): *Il Vulcano di Monte Amiata*. Nola, 399 pp.
- Peterson, J. R. (1993): Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Geological Survey Open-File Report. 93-322. Doi: 10.3133/ofr93322
- Piccardi L., Vittori E., Blumetti A.M., Comerci V., Di Manna P., Guerrieri L., Baglione M. and D'Intinosante V. (2017): Mapping capable faulting hazard in a moderate-seismicity, high heat-flow environment: the Tuscia Province (southern Tuscany - northern Latium, Italy). *Quat. Int.*, 451, 11-36.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A. (eds) (2021): *Italian Parametric Earthquake Catalogue (CPTI15)*, version 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.3>
- Saccorotti G., Di Lieto B., Tronca F., Fischione C., Scarpa R., Muscente R. (2006). Performances of the UNDERground SEISmic array for the analysis of seismicity in Central Italy. *Ann. Geof.*, 49(4/5), 1941 - 1057.
- Seed Manual (2012): Standard for the Exchange of Earthquake Data, SEED Format Version 2.4, August, 2012. Ahern and Dost (eds.). http://www.fdsn.org/pdf/SEEDManual_V2.4.pdf
- UNMIG, Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse, (2014): Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche, 1-38. https://unmig.mise.gov.it/images/docs/85_238.pdf
- UNMIG, Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse, (2016): Linee guida per l'utilizzazione della risorsa geotermica a media e alta entalpia, 1-43. <https://unmig.mise.gov.it/images/docs/linee-guida-geotermia.pdf>

Elenco delle figure

Figura 1.1. Pianificazione temporale delle attività previste nei singoli WP.	6
Figura 2.1. Stazioni sismiche della prima configurazione della rete sismica integrata.	10
Figura 2.2. (a) Paragone tra un array sismico (triangoli) e un'antenna satellitare. (b) Combinazione di array sismici multipli per la localizzazione epicentrale.	12
Figura 2.3. Mappa geologica estratta da Pandeli et al., 2017 e localizzazione delle stazioni costituenti l'Array MALA.	14
Figura 2.4. Stazioni della prima configurazione della rete sismica integrata. Il triangolo rosso indica la posizione di MALA installato nei pressi di Montalcino; il rettangolo rosso illustra un ingrandimento dell'array.	15
Figura 2.5. Configurazione dell'array MALA.	16
Figura 2.6. La funzione di risposta dell'array MALA (Array Response Function).	16
Figura 2.7. Schema di una stazione sismica generica.	17
Figura 2.8. (a) Stazione MALA0 (vedi anche Figura 2.11) installato all'interno del fabbricato, che ospita anche il router 4G per la trasmissione dati di tutto l'array. (b) Pannelli solari per l'alimentazione del router e della stazione sismica.	17
Figura 2.9. Datalogger box. completo di batteria 12V, regolatore pannello solare e antenna GPS. (b) sismometro Mark L4-3c in fase di installazione.	18
Figura 2.10. (a) Installazione del sismometro presso uno dei siti dell'array MALA (man at work). Orientamento del sensore sismico in direzione N-S.	18
Figura 2.11. Sismometro Mark L4-3c della stazione MALA0.	19
Figura 2.12. Stazione MALA2 pronta per la registrazione e trasmissione dati.	19
Figura 2.13. Schema di trasmissione dati in tempo reale dell'array MALA.	20
Figura 3.1. Esempio di grafico per il controllo del funzionamento delle singole stazioni IV della prima configurazione della rete sismica integrata.	30
Figura 3.2. Esempi dei plot della PSD per monitorare la qualità dei dati registrati dalle stazioni dell'array.	31
Figura 3.3. Esempi dei plot della PSD per monitorare la qualità dei dati registrati dalle stazioni delle reti IV e IV/EL.	33
Figura 3.4. Architettura del Centro Acquisizione Dati (CAD-BO) presso l'INGV di Bologna.	34
Figura 3.5. Mappa delle stazioni sismiche della rete IV e dell'array MALA operative nelle aree geotermiche tra Larderello e Amiata (vedi Tabella 3.1).	36
Figura 4.1. http://iside.rm-ingv.it/event/31203191?timezone=UTC	38
Figura 4.2. Registrazione di MALA dell'evento sismico di Figura 4.1.	38
Figura 4.3. Scheda di analisi del modulo software SC4_Lambda.	39
Figura 4.4. Scheda di risultato del modulo software SC4_Lambda.	39
Figura 4.5. Scheda di localizzazione del modulo software SC4_Scolv.	40
Figura 4.6. Scheda di calcolo della magnitudo del modulo software SC4_Scolv.	41
Figura 4.7. Scheda di calcolo della magnitudo del modulo software SC4_Scolv.	42
Figura 5.1. La pagina home del sito CMS e la sezione "Geotermia Toscana"	44
Figura 5.2. Pagina introduttiva della sperimentazione ed il menù con i dettagli sul-la destra	44

Elenco delle tabelle

Tabella 3.1. Elenco delle stazioni sismiche della rete IV e dell'array MALA operative nelle aree geotermiche toscane. Le stazioni elencate con font blu sono in condivisione con la rete sismica EL di EGP.	35
Tabella 4.1. Elenco degli eventi sismici più forti registrati dalla rete RSN (IV) nell'area di Larderello - Travale nel periodo 01/07/2020 - 22/06/2022.	43
Tabella 4.2. Elenco degli eventi sismici più forti registrati dalla rete RSN (IV) nell'area di Monte Amiata nel periodo 01/07/2020 - 22/06/2022.	43