



RAPPORTI TECNICI INGV

Configurazione e test di un array
sismico temporaneo nel sito candidato
per “Einstein Telescope”



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

510

**Direttore Responsabile**

Daniela VERSACE

Editor in Chief

Milena MORETTI

Editorial Board

Laura ALFONSI

Sofia BARANELLO

Carla BARNABA

Christian BIGNAMI

Simona CARANNANTE

Maria Grazia CIACCIO

Luca COCCHI

Luigi CUCCI

Lorenzo CUGLIARI

Elisabetta D'ANASTASIO

Alessia DI CAPRIO

Roberto DI MARTINO

Domenico DI MAURO

Domenico DORONZO

Filippo GRECO

Alessandro IAROCCI

Mario MATTIA

Daniele MELINI

Anna NARDI

Lucia NARDONE

Marco OLIVIERI

Arianna PESCI

Pierangelo ROMANO

Paola SBARRA

Davide SCAFIDI

Maurizio SOLDANI

Sara STOPPONI

Umberto TAMMARO

David ZULIANI

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.173 | 2014, 23 LUGLIO

© INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Presidente INGV

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma

Tutti i diritti riservati

www.ingv.it



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

RAPPORTI TECNICI INGV

Configurazione e test di un array
sismico temporaneo nel sito candidato
per “Einstein Telescope”

*Configuration and test of a temporary seismic
array at the candidate site for “Einstein Telescope”*

Giovanni Diaferia^{1,*}, Francesco Sanseverino², Carlo Giunchi², Marco Olivieri¹, Irene Molinari¹,
Gennaro Sepede³, Fabio Di Felice³, Giulio Selvaggi⁴

¹INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna

²INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa

³INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1

⁴INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Nazionale Terremoti

*Corresponding Author

Accettato 21 ottobre 2025 | Accepted 21 October 2025

Come citare | How to cite Diaferia G., Sanseverino F., Giunchi C., Olivieri M., Molinari I., Sepede G., Di Felice F., Selvaggi G.. (2025).

Configurazione e test di un array sismico temporaneo nel sito candidato per “Einstein Telescope”. *Rapporti Tecnici INGV*, 510, 24 pp.

<https://doi.org/10.13127/rpt/510>

In copertina Dettaglio dell'installazione sul campo dell'array sismico | Cover Detail of the field installation of the seismic array

510

INDICE

Riassunto	7
Abstract	7
Introduzione	7
1. Il progetto FABER	8
2. La rete sismica temporanea di FABER	9
2.1 Componenti della stazione sismica temporanea	9
2.2 Alloggiamento delle componenti	10
3. Campagna di acquisizione	11
3.1 Configurazione della stazione metereologica e acquisizione dati	12
3.2 Installazione dell'array sismico	13
3.3 Analisi spettrale	14
3.4 Ricostruzione azimutale delle sorgenti di rumore sismico	15
3.5 Analisi HVSr	16
4. Conclusioni e prospettive future	17
Acknowledgment	18
Bibliografia	18
Sitografia	20

Riassunto

Nell'ambito del progetto denominato “*Monitoring Earth's Evolution and Tectonics*” (MEET) e finanziato dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) si è posto l'obiettivo di realizzare un laboratorio geofisico in un'area caratterizzata da basso rumore sismico, sia naturale che antropico, situata presso Sos Enattos (NU). Questo laboratorio, denominato “*Sardinia Far fAult oBsERvatory*” (FABER [1]), è stato concepito in un contesto territoriale di particolare rilevanza scientifica, poiché candidato ad ospitare il rilevatore di onde gravitazionali di terza generazione “*Einstein Telescope*” (ET [2]). Il presente rapporto tecnico fornisce una descrizione dettagliata di una parte della strumentazione acquisita nell'ambito del progetto. Vengono inoltre presentati i risultati di una campagna di acquisizione mediante *array* sismico, condotta nell'area di Sos Enattos. L'indagine ha avuto il duplice scopo di testare la strumentazione sismica e confrontare i dati raccolti con quelli di precedenti campagne; inoltre, mirava a determinare le caratteristiche spettrali e di direzionalità del rumore sismico in varie bande di frequenza e infine, a calcolare i valori di *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr) per la stima di effetti di risonanza.

Abstract

As part of the project “Monitoring Earth's Evolution and Tectonics” (MEET), within the framework of the National Recovery and Resilience Plan (NRRP), INGV is going to establish a geophysical laboratory in an area characterized by low seismic noise, both natural and anthropogenic, located in Sos Enattos (NU). This laboratory, named “Sardinia Far fAult oBsERvatory” (FABER, [1]), was also conceived in the area which is a candidate to host the Einstein Telescope (ET, [2]), the third-generation gravitational wave detector.

This report provides a detailed description of some of the instrumentation acquired under the project. Here, we present the results of a short acquisition campaign of ambient noise data through a spiral array in the Sos Enattos area. The survey had the twofold objective of testing the seismic instruments and comparing the data with that from previous surveys. Furthermore, it aimed to determine the spectral and directional characteristics of the seismic noise across various frequency bands and, finally, to calculate the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr) values for the estimation of resonance effects.

Keywords Antenna sismica; Rumore ambientale; Einstein Telescope | Seismic array; Ambient noise

Introduzione

Nell'ultimo decennio la miniera sotterranea di Sos Enattos (Lula, NU) ha destato un crescente interesse all'interno della comunità scientifica. Nel 2010, il Prof. Fulvio Ricci (Università La Sapienza di Roma), alla ricerca di un sito a basso rumore naturale e antropico in cui condurre esperimenti di fisica della gravitazione, individuò nel nord-est della Sardegna il luogo ideale. In quest'area, infatti, la bassa densità di popolazione, la sismicità naturale pressoché assente, la particolare struttura geologica e la scarsità di attività antropiche determinano un livello eccezionalmente basso di rumore sismico, nonché la quasi totale assenza di rumore magnetico ed acustico (per ulteriori approfondimenti sulla scelta del sito di Sos Enattos si rimanda al sito

del progetto [3]). Tali condizioni risultano ideali per lo svolgimento di esperimenti scientifici che richiedono l'impiego di strumenti estremamente sensibili e di conseguenza facilmente perturbabili. A partire dal 2019, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), assieme alle università locali e all'INGV ha iniziato un'attività di caratterizzazione geofisica del sito. Dopo le prime conferme sull'idoneità dell'area, è stato installato un apparato sperimentale per misurare le fluttuazioni elettromagnetiche del vuoto quantistico e le loro relazioni con la gravità, nell'ambito dell'esperimento "Archimedes" [Allocca et al., 2024][4]. Nel frattempo, è stato istituito il laboratorio SAR-GRAV presso l'ex miniera di Sos Enattos, grazie al contributo finanziario della Regione Autonoma della Sardegna (RAS) e alla collaborazione con INFN, INGV, Università degli Studi di Sassari, Università degli Studi di Cagliari e Igea Spa, società che gestisce le attività della miniera.

Parallelamente, una collaborazione guidata da Italia e Paesi Bassi, oggi estesa a 30 Paesi e circa 1.700 scienziati, ha iniziato lo studio, lo sviluppo e la progettazione di ET, il rivelatore di onde gravitazionali di terza generazione. Questo progetto prevede l'installazione di interferometri laser con bracci lunghi 10-15 km, collocati ad una profondità compresa tra i 100 e i 300 m di profondità, in grado di estendere fino a pochi Hz la soglia di rilevabilità delle onde gravitazionali generate da eventi cosmici, come la coalescenza di sistemi binari di buchi neri e le esplosioni di supernove. ET è stato inserito nella *roadmap* dello *European Strategy Forum on Research Infrastructures* (ESFRI) dell'Unione Europea e successivamente, nel 2023, l'Italia ha formalizzato la candidatura per ospitare ET nell'area (Figura 1) compresa tra i comuni di Bitti, Onani e Lula (NU), con il supporto della Regione Autonoma Sardegna e del Governo italiano. Le candidature sono in via di formalizzazione, con tre siti potenzialmente candidati ad ospitare ET: Sardegna, EMR (nel sud dei Paesi Bassi) e Lusazia (Germania orientale). In via di definizione è anche la scelta tra due diverse configurazioni dei rilevatori: un triangolo di 10 km di lato o due segmenti da 15 km a forma di "L" in due siti distinti.

Figura 1 Posizione del sito italiano candidato ad ospitare ET, il rivelatore di onde gravitazionali di terza generazione (immagine da <https://www.einstein-telescope.it/et-in-italia/>).

Figure 1 Location of the italian candidate site for ET, the third-generation gravitational wave detector (image from <https://www.einstein-telescope.it/et-in-italia/>).



1. Il progetto FABER

In questo contesto si inserisce il progetto FABER, il cui obiettivo è la realizzazione di un osservatorio geofisico a basso rumore a Sos Enattos, concepito per lo studio di segnali geofisici difficilmente rilevabili in contesti urbanizzati o sismicamente attivi. FABER nasce e si sviluppa come *Work Package* del progetto "MEET", finanziato dal Ministero dell'Università e Ricerca con l'obiettivo strategico di potenziare le infrastrutture di ricerca. FABER prevede l'installazione permanente di un'antenna GNSS (*Global Navigation Satellite System*), di una stazione sismica a larga banda, di una stazione magnetica e di un gravimetro superconduttore. A questa strumentazione, si affiancano dispositivi complementari, quali stazioni meteorologiche e microbarometri.

Un progetto complesso come ET richiede una forte sinergia tra enti di ricerca ed università, al fine di approfondire la conoscenza delle caratteristiche del territorio e sostenere al meglio la candidatura italiana. In questa prospettiva si è consolidata nel tempo la collaborazione spontanea tra ricercatori INGV e INFN, con il supporto delle Università di Cagliari e Sassari. Tale collaborazione si è rafforzata grazie a iniziative e progetti quali Archimedes, MEET, *Einstein Telescope Infrastructure Consortium* (ETIC) e *Terabit Network for Research and Academic Big Data in Italy* (TeRABIT), con il sostegno della Regione Autonoma Sardegna, che ha finanziato la realizzazione dell' "*Einstein Telescope Sardinia Underground Laboratory*" (ET-SUnLab), un centro di ricerche moderno ed innovativo a Sos Enattos condiviso tra INGV, INFN e INAF. A tale iniziativa si aggiunge uno continuo scambio di strumenti, dati, idee e competenze con l'intento di portare avanti il progetto e affrontare con successo la sfida di ospitare ET in Italia.

Il presente rapporto tecnico descrive una campagna di misura di rumore sismico ambientale condotta mediante *array*, nell'ambito del più ampio sforzo di caratterizzazione del sito candidato per ET. Verrà fornita una descrizione dettagliata della strumentazione impiegata, in termini di tipologia, assemblaggio e modalità di utilizzo. Saranno inoltre presentati i risultati ottenuti, in merito al contenuto spettrale dei dati sismici acquisiti, alla direzionalità delle sorgenti di rumore e agli effetti di risonanza del sito mediante l'analisi degli spettri HVSR.

2. La rete sismica temporanea di FABER

Nell'ambito del progetto FABER, sono state acquistate 12 stazioni sismiche a larga banda da utilizzare per campagne temporanee di acquisizione dati. Ogni stazione è dotata di sismometro, digitalizzatore, sistema di alimentazione e sistema di trasmissione dati. Per facilitarne il trasporto e lo stoccaggio, ciascuna stazione è alloggiata in due valigie: la valigia primaria contiene la stazione sismica, comprensiva di alimentazione e trasmissione dati, mentre quella ausiliaria ospita una seconda batteria. Questa configurazione è stata adottata per limitare il peso della valigia primaria, rendendola più maneggevole. Di conseguenza, è garantita una maggiore flessibilità operativa per installazioni di breve durata, che quindi non necessiterebbero della batteria ausiliaria.

2.1 Componenti della stazione sismica temporanea

Ciascuna stazione (Figura 2) è composta da un sismometro triassiale a larga banda "Nanometrics Trillium Compact 120s" [5] e un digitalizzatore "Nanometrics Centaur", a 24 bit e 6 canali [6]. L'alimentazione è garantita da due batterie "FIAMM AGM/GEL 12FGL55 12V 55Ah", affiancate da un pannello solare da 80W (12V), delle dimensioni di 670x770x30mm, montato su una struttura metallica per l'installazione a terra nei pressi della stazione. Il sistema di alimentazione è gestito da un regolatore di carica "Epever VS4524A" [7] che controlla il flusso di corrente verso la strumentazione e monitora in tempo reale il livello di carica, prevenendo sia il sovraccarico sia lo scaricamento completo delle batterie.

La trasmissione dati avviene su rete GSM (*Global System for Mobile Communications*), grazie ad un modem "Advantech ICR 2500" [8] con tecnologia 4G LTE. Lo stesso sistema permette il monitoraggio dello stato operativo della stazione mediante protocollo SNMP (*Simple Network Management Protocol*), fornendo i valori di tensione del modem, dello stato di carica delle batterie, nonché la possibilità di eseguire operazioni da remoto, come il riavvio del modem tramite SMS (*Short Message Service*). In Tabella 1 è fornito un elenco riassuntivo di tutte le componenti di ciascuna delle stazioni temporanee.

Figura 2 Valigia con imbottitura in gommapiuma sagomata in cui sono alloggiati: il sensore (in alto a sinistra), la batteria (in alto a destra), il digitalizzatore (in basso e sinistra), modem e regolatore di carica (in basso a destra). Sul lato destro della valigia sono presenti due fori con passacavi a tenuta stagna che permettono il passaggio del cavo del sensore e dei cavi dei pannelli solari verso l'esterno.

Figure 2 Rugged case containing shaped foam padding, housing the sensor (top left), battery (top right), digitizer (bottom left), and both the modem and load controller (bottom right). Two holes on the right side of the case, equipped with watertight grommet, allow the sensor cable and solar panel cables to pass to the outside.



Componente	Modello / Tipo	Specifiche principali	Funzione
Sensore	Nanometrics Trillium Compact 120s	Triassiale, banda lunga (periodo proprio 120 s)	Acquisizione segnale sismico
Digitalizzatore	Nanometrics Centaur	6 canali, 24 bit, storage su SD card integrata	Conversione A/D e registrazione
Batteria	FIAMM AGM/GEL 12FGL55, 12V 55Ah (x2)	Tecnologia AGM/GEL, alta affidabilità	Alimentazione
Pannello solare	80W, 12V	Dimensioni: 670×770×30 mm	Ricarica batteria (solo uso esteso)
Regolatore di carica	Epever VS4524A	Monitoraggio carica, protezione da sovraccarichi/scariche	Gestione energia solare
Modem 4G LTE	Advantech ICR 2500	Connessione dati remota, protocollo SNMP, riavvio via SMS	Trasmissione dati, diagnostica remota
Struttura	Valigia Explorer 5325	IP67 (IP54 con pressacavi), sagomatura interna in gomma	Protezione, trasporto, organizzazione

Tabella 1 Lista delle componenti delle stazioni sismiche temporanee acquisite nell'ambito del progetto FABER e impiegate nella campagna di misura presso il sito candidato di ET.

Table 1 Components of each temporary seismic station acquired within the FABER project and employed for the data acquisition campaign at the ET candidate site.

2.2 Alloggiamento delle componenti

Per l'alloggiamento delle componenti è stata adottata la valigia "Explorer 5325" [9], internamente rivestita di spugna, pre-cubettata e sagomata su misura per ciascun elemento in modo da fornire una protezione efficace e una stabilità ottimale durante il trasporto. Il lato destro della valigia è stato forato per consentire l'uscita del cavo del sensore e del pannello solare, utilizzando pressacavi multi-foro configurabili (Figura 3). Lo standard di protezione delle valigie è IP67 (Ingress Protection 67) ma con l'utilizzo di passacavi multi-foro questa si riduce a

IP54 (*Ingress Protection 54*), accettabile per installazioni temporanee non sommerse. A pieno carico, la valigia raggiunge i 35 Kg, dovuti principalmente alla batteria. Le maniglie laterali consentono comunque un trasporto agevole da parte di due persone. Inoltre, le valigie sono impilabili, agevolando il trasporto e lo stoccaggio.

La flessibilità del sistema descritto sopra ha permesso, durante la prima campagna di misura (vedi Capitolo 3), di utilizzare le stazioni in configurazione “leggera”. L’installazione sul campo ha previsto infatti l’uso di una sola batteria, pre-caricata e collegata direttamente al digitalizzatore che alimenta il sensore.



Figura 3 Lato destro della valigia con passacavi con innesti multi-foro.

Figure 3 Right side of the case with multi-hole grafts.

3. Campagna di acquisizione

Tra il 20 e il 21 Novembre 2024 è stata condotta una campagna di acquisizione sismica presso il sito P2 (Figura 4), uno dei potenziali vertici della configurazione a triangolo di ET [Naticchioni et al., 2014]. L’esperimento ha previsto l’installazione di 15 stazioni sismiche a banda larga, ovvero le 12 stazioni acquisite nell’ambito del progetto FABER (dotate di sismometro Trillium Compact 120s) a cui sono state aggiunte tre stazioni dotate di sismometro Trillium Compact 20 s fornite dall’INFN. Inoltre, nell’ambito della stessa campagna di misura, una stazione meteorologica (di proprietà dell’INFN) è stata installata permanentemente presso lo stesso sito.

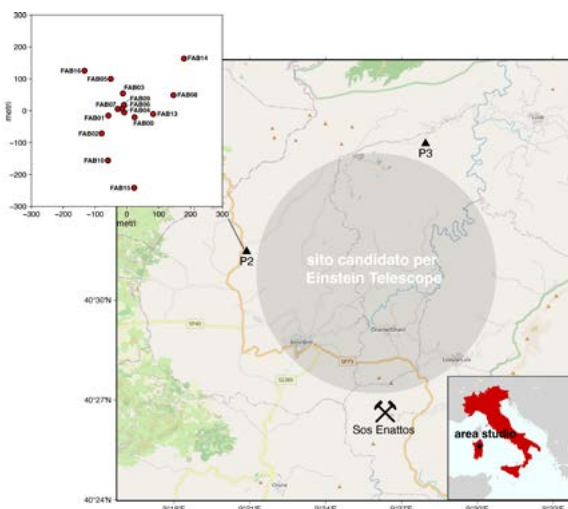


Figura 4 Mappa dell’area studio e della configurazione spaziale dell’array installato presso il sito P2.

Figure 4 Map of the study area showing the spatial configuration of the array installed at the P2 site.

3.1 Configurazione della stazione meteorologica e acquisizione dati

La stazione meteorologica è stata installata al sito P2 al fine di permettere il monitoraggio continuo delle condizioni meteo locali e confrontare queste ultime con le registrazioni di rumore sismico ambientale. Lo strumento impiegato consiste in una stazione “Davis Vantage Pro2 6162C EU” [10] in versione cablata (Figura 5). Il modulo ISS (*Integrated Sensor System*, [11]) è dotato di sensore di temperatura, sensore di umidità, barometro, pluviometro e anemometro sonico “SKU 6415” [12]. L'intera strumentazione è stata installata al sito P2, all'interno di un armadio elettrico preesistente che ospita anche alcune componenti della stazione sismica permanente ET.P2. Il datalogger “SKU 6510SER” [13] è collegato ad un modulo convertitore seriale TCP-IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) “ATC-1200 - RS-232/422/485 to TCP/IP converter” [14]. Il blocco ISS, con in cima l'anemometro sonico, è stato montato su di un palo metallico a più di tre metri dal suolo (Figura 6). Rispetto al classico anemometro a coppe, è stato scelto un anemometro sonico per le migliori performance anche a bassi regimi di vento.

Figura 5 Installazione di prova in ambiente indoor.

A sinistra la console collegata via cavo all'unità esterna ISS. Il cavo in dotazione ha una lunghezza di 30 metri.

Figure 5 Indoor test installation. On the left, the console is connected via cable to the external ISS unit. The supplied cable is 30 meters long.



Figura 6 Installazione sul campo dell'unità ISS presso il sito P2.

Figure 6 Field installation of the ISS unit at the P2 site.



La stazione meteo fornisce dati con un passo di campionamento di 10 minuti. Un server situato presso il CED (Centro Elaborazione Dati) della sede INGV di Pisa interroga a cadenza oraria il dispositivo, per recuperare le variabili meteorologiche di interesse. Per ciascuna grandezza fisica, le registrazioni orarie vengono convertite in un file miniSEED, che è monitorato da un ringserver tramite *polling* sulle *directories* di produzione. Il ringserver, tramite protocollo *SeedLink* [GFZ Potsdam and GEMPA GmbH, 2025a], rende disponibili questi dati ad un'istanza del software SeisComP [GFZ Potsdam and GEMPA GmbH, 2025b], che provvede alla storicizzazione all'interno della sezione d'archivio dedicata alla stazione ET.P2 (attualmente con accesso ristretto solo ai membri della collaborazione ET).

3.2 Installazione dell'array sismico

È stata adottata una configurazione geometrica a spirale a tre bracci, con distanze inter-stazioni crescenti a partire dal centro. Tale geometria è stata scelta perchè permette, con un numero minimo di stazioni, il miglior campionamento spaziale del fronte d'onda sismico [Kennert et al., 2015; Tkalčić, 2025].

L'obiettivo dell'acquisizione è stato duplice: i) testare l'adeguatezza della configurazione per la caratterizzazione del rumore sismico locale, ii) verificare il corretto funzionamento della strumentazione acquisita e individuare eventuali criticità e malfunzionamenti in vista di un successivo impiego a lungo termine.

L'installazione è stata completata in circa tre ore da tre squadre operative composte da due persone ciascuna. Il lavoro è stato preceduto da un sopralluogo per l'individuazione e la scelta precisa dei siti di installazione e misura. Ciascun sensore è stato interrato ad una profondità di 20-30 cm (Figura 7) e il sistema è stato alimentato esclusivamente a batteria (senza installazione dei pannelli solari) vista la breve durata dell'esperimento (~24 ore). I dati sono stati acquisiti con una frequenza di campionamento di 100 Hz. In Figura 8 è mostrato il confronto tra le tracce (normalizzate e filtrate tra 0.1 e 50 Hz) delle componenti verticali alle 15 stazioni dell'array temporaneo, assieme all'andamento della velocità del vento registrata dalla stazione meteo presso il sito. Nelle sezioni successive vengono presentati e discussi i dati acquisiti, con particolare riferimento all'analisi spettrale, al *beamforming* e al calcolo degli spettri HVSR.



Figura 7 Dettaglio dell'installazione sul campo dell'array sismico.

Figure 7 Detail of the field installation of the seismic array.

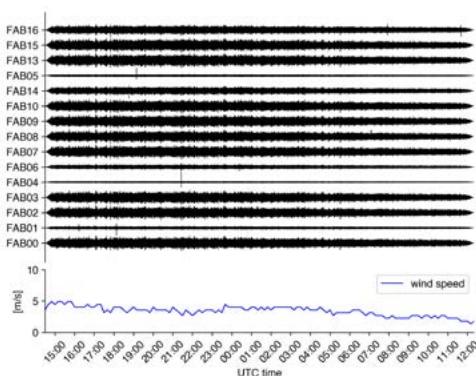


Figura 8 Registrazione in continuo della componente verticale per ognuna delle 15 stazioni temporanee installate al sito P2. Alle tracce è stata rimossa la risposta strumentale ed è stato applicato un filtro passa-banda tra 0.1 e 50 Hz. Tutte le tracce sono normalizzate. In basso, andamento della velocità del vento registrato dalla stazione meteo presente nel sito P2.

Figure 8 Continuous recording of the 15 broadband stations (vertical component) of the temporary array installed at P2. Traces are deconvolved for the instrumental response and band-pass filtered between 0.1 and 50 Hz. All traces are normalized. The bottom panel shows the wind speed registered by the meteorological station installed at P2.

3.3 Analisi spettrale

Per ciascuna stazione è stata calcolata la *Probabilistic Power Spectral Density* (PPSD) delle componenti verticali, utilizzando l'intero intervallo di registrazione (~24 ore). In Figura 9 è riportato l'esempio della PPSD per tre stazioni, da cui si osserva che la maggior parte del segnale è contenuta nella banda 0.1-1 Hz. Al contrario, per frequenze superiori a 1 Hz, il sito si conferma poco affetto da rumore ambientale, pur registrando livelli leggermente più elevati rispetto al 2021. Tuttavia, l'incremento di rumore (nell'ordine dei 10-20 dB) osservabile sia per frequenze sia inferiori che superiori a 1 Hz è attribuibile alle condizioni meteorologiche locali e regionali durante il periodo di registrazione, in particolare al vento persistente (Figura 8), con una velocità media stimata a ~3.4 m/s, e alle condizioni avverse registrate nel Mediterraneo occidentale — e.g. massima altezza del moto ondoso pari a 4 metri (fonte: CMDS, [15]). Un più dettagliato confronto tra i dati acquisiti nell'ambito di questa campagna di misura e quelle precedenti (in termini di configurazione dell'array e condizioni meteorologiche) esula dallo scopo del presente documento ed è, invece, oggetto di una pubblicazione dedicata, al momento in fase di *peer-review*. In Figura 10 sono riportate le medie delle PPSD per ciascuna stazione dell'array sismico. Si osserva una quasi perfetta sovrapposizione degli spettri delle diverse stazioni tra 0.1 e 2 Hz, indicativa nel corretto funzionamento di tutte le stazioni, e dell'assenza di malfunzionamenti in ciascuna delle componenti impiegate. Passando a frequenze più alte, si nota una crescente variabilità tra gli spettri, dovuta alla diversa influenza delle condizioni di installazione e/o del vento nelle immediate vicinanze di ogni singola stazione.

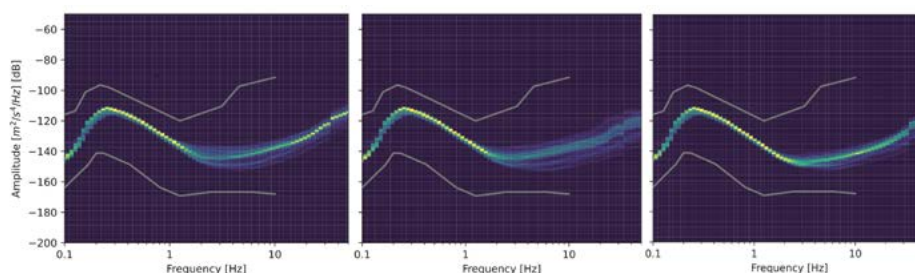
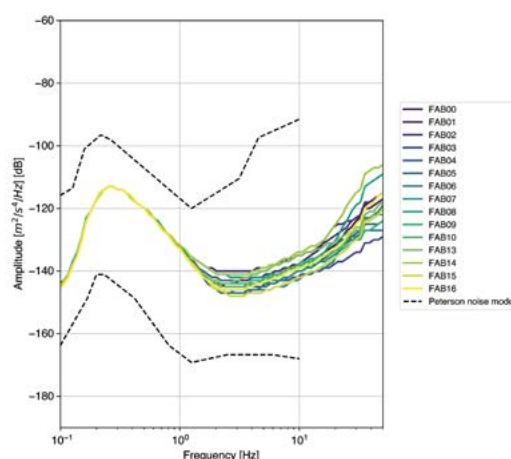


Figura 9 Plot delle *Probabilistic Power Spectral Density* (PPSD) per tre delle 15 stazioni che compongono l'array installato nel sito P2. Le linee grigie rappresentano i limiti del modello di rumore ambientale di Peterson [Peterson, 1993].

Figure 9 Probabilistic Power Spectral Density (PPSD) plot for three of the 15 stations composing the array at the P2 site. Gray lines represent the boundaries of Peterson's ambient noise model [Peterson, 1993].

Figura 10 Spettri di tutte le stazioni che costituiscono l'array sismico temporaneo installato al sito P2. Le linee tratteggiate indicano i limiti del modello di rumore ambientale di Peterson [Peterson, 1993].

Figure 10 Spectra of all stations forming the temporary seismic array installed at P2. Dashed lines represent the boundaries of Peterson's ambient noise model [Peterson, 1993].



3.4 Ricostruzione azimutale delle sorgenti di rumore sismico

Una distribuzione regolare e sufficientemente ravvicinata di sensori sismici consente di campionare spazialmente e ricostruire uno o più fronti d'onda in propagazione. Assumendo che questa avvenga in regime di onda piana (*far-field*), le registrazioni sismiche di un *array* possono essere analizzate tramite *beamforming*, trasformando i segnali acquisiti da ciascuna stazione nel dominio frequenza-numero d'onda (f - k). Da questa trasformazione si può ricavare una misura di coerenza del segnale aggregato, calcolata per ogni possibile combinazione dei valori di frequenza e numero d'onda [Kvaerna and Ringdhal, 1986; Rost and Thomas, 2002], a sua volta scomposto nelle componenti orizzontali (k_x e k_y). Nel caso di un'onda piana monocromatica, il valore di coerenza risulta massimo per una particolare combinazione di k_x e k_y , da cui si può derivare sia il *backazimuth* (ovvero la direzione di provenienza del fronte d'onda rispetto all'*array*), sia la *slowness* (reciproco della velocità apparente con cui il fronte d'onda si propaga rispetto all'*array*). Il risultato di un'analisi di *beamforming* viene tipicamente rappresentato sotto forma di istogramma polare, per uno o più intervalli di frequenza. In Figura 11 è mostrata l'analisi di *beamforming* per l'*array* installato al sito P2, relativa agli intervalli di frequenza 1-10, 10-20 e 20-40 Hz. I plot dei valori dei *beampower* (P , in scala logaritmica) evidenziano che:

- nell'intervallo 1-10 Hz si osservano *range* di *slowness* corrispondenti ad alte velocità apparenti, (5-10 km/s), indicativi della presenza di onde di volume in arrivo con elevato angolo di incidenza, prevalentemente dal settore settentrionale.
- Nell'intervallo 10-20 Hz, la distribuzione del *beampower* risulta pressoché omogenea in *backazimuth*, ad eccezione del settore SE. I valori di *slowness* rilevati (0.4-0.5 s/km), suggeriscono una propagazione con velocità di 2-2.5 km/s, attraverso onde di superficie. L'assenza di sorgenti nel settore SE sembra coerente con la distribuzione delle infrastrutture antropiche al sito P2. Questo risulta infatti delimitato a nord e ad ovest da due strade provinciali, mentre il settore SE è privo di viabilità e presenta, inoltre, una copertura vegetale scarsa o assente.
- Nell'intervallo 20-40 Hz, il segnale risulta completamente incoerente, impedendo l'identificazione dell'origine del rumore sismico che della *slowness*. Ciò indica la probabile origine non direzionale del rumore in questo intervallo di frequenza, verosimilmente associato al vento o ad altre sorgenti ambientali di natura stocastica.

Per valutare l'effettiva capacità risolutiva dell'*array*, e quindi la robustezza dei risultati del *beamforming*, è stata stimata l'*Array Transfer Function* (AFT) alle frequenze rappresentative di 3, 10 e 20 Hz (Figura 12). Tale funzione, che dipende dalla geometria e densità dei sensori, consente di quantificare la capacità risolutiva dell'*array* nel discriminare le sorgenti sismiche in termini di *slowness* e *backazimuth*, restituendo i valori di ampiezza (espressi in dB in Figura 12), del segnale ricostruito. L'analisi mostra:

- bassa risoluzione in *slowness* a 3 Hz;
- alta risoluzione tra 10-20 Hz, con una buona ricostruzione azimutale e bassa ambiguità nella stima della *slowness*;
- *aliasing* evidente per frequenze superiori a 20 Hz, come testimoniato dalla presenza di *side lobes*.

Per migliorare la risoluzione nell'intervallo a 1-10 Hz sarebbe necessario aumentare l'apertura dell'*array* di un fattore di almeno 2-3, possibilmente impiegando anche un numero più elevato di stazioni. Per l'intervallo 20-40 Hz, invece, l'apertura andrebbe ridotta dello stesso fattore. Tuttavia, nel caso specifico, l'incoerenza intrinseca del segnale atteso in questo intervallo rende comunque l'analisi di *beamforming* poco utile.

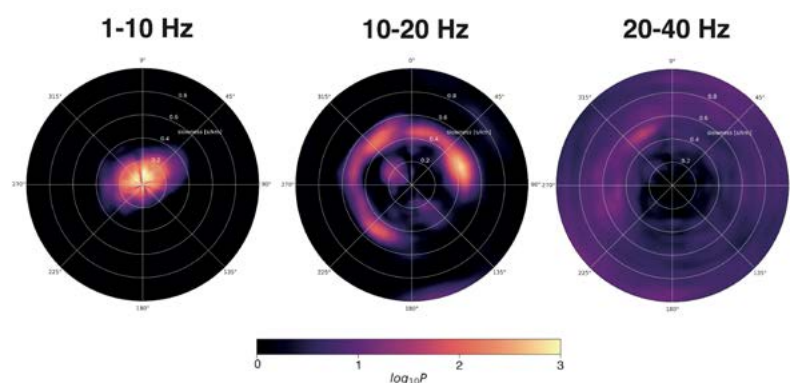


Figura 11 Risultati dell'analisi di *beamforming* sull'array installato a P2, per tre bande di frequenza (1-10, 10-20 e 20-40 Hz). Gli istogrammi polari mostrano l'andamento del *beampower* (P) in funzione di *slowness* e *backazimuth*, espresso in scala logaritmica.

Figure 11 Results of the *beamforming* analysis for the array installed at P2, in three different frequency bands (1-10, 10-20 and 20-40 Hz). *Beampower*, as a function of *slowness* and *backazimuth*, is expressed in logarithmic scale on polar histogrammes.

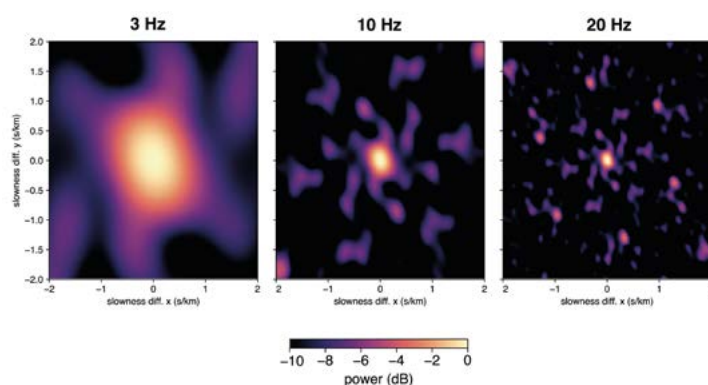


Figura 12 Array Transfer Function dell'array a spirale installato al sito P2, calcolata per frequenze di 3, 10 e 20 Hz. A 3 Hz l'array mostra una bassa capacità risolutiva in termini di *slowness*, dovuta all'apertura limitata (~400 m), non sufficiente per un corretto campionamento del fronte d'onda. Tra 10 e 20 Hz, l'array presenta invece un'elevata risoluzione in *slowness* ed una ricostruzione azimutale omogenea. I valori sono espressi in ampiezza (espressa in dB) del segnale ricostruito.

Figure 12 Array Transfer Function of the spiral array installed at the P2 site, computed for frequencies of 3, 10, and 20 Hz. At 3 Hz, the array exhibits low *slowness* resolution, due to the relatively small aperture (~400 m) which is insufficient for a proper spatial sampling of the seismic wavefront. Between 10 and 20 Hz, the array shows high *slowness* resolution and homogenous azimuthal reconstruction. Amplitude of the reconstructed signal is expressed in dB.

3.5 Analisi HVSR

Grazie alla disponibilità di registrazioni a tre componenti, è stato possibile calcolare i valori di HVSR (rapporto tra gli spettri della componente orizzontale e quella verticale) per ciascuna stazione dell'array. Questo metodo, ampiamente consolidato, consente di individuare gli effetti di risonanza legati alla presenza di uno strato superficiale a bassa velocità di taglio, sovrastante un semispazio a velocità più elevata. In presenza di tale configurazione, la risposta sismica del sito può risultare amplificata a una frequenza caratteristica di risonanza, manifestandosi come

un picco marcato nello spettro HVSR [Nogoshi and Igarashi, 1971; Nakamura, 1989; Bard, 1999; SESAME, 2004]. Nell'ambito di questa analisi, sono state considerate sei ore di registrazione continua (06:00-12:00 UTC). I valori di HVSR sono stati calcolati con la suite Python *hvsrpy* [Vantassel, 2025], su finestre temporali di 100 s, i cui spettri sono stati successivamente mediati nell'intervallo di frequenze 1-20 Hz. In Figura 13 sono riportati gli HVSR calcolati per ogni singola stazione. La linea tratteggiata rappresenta la media sull'intero *array*, mentre l'area in grigio evidenzia la dispersione statistica (una deviazione standard) intorno alla media. I risultati mostrano un rapporto spettrale uniforme, coerente e pressoché piatto per tutte le stazioni lungo l'intervallo di frequenza analizzato, suggerendo l'assenza di effetti di risonanza. Ciò è coerente con la presenza di rocce rigide (e.g. granitoidi) dall'elevata capacità geomeccanica [Saccorotti et al., 2023; Villani et al., 2025] che non presentano discontinuità significative nei primi metri di sottosuolo tali da generare effetti di amplificazione sismica locale.

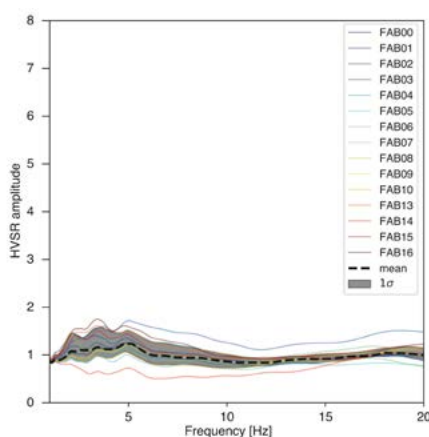


Figura 13 Valori di HVSR calcolati per ciascuna stazione dell'*array* temporaneo installato a P2. La linea tratteggiata rappresenta la media sull'intero *array*, mentre in grigio è indicata la dispersione (deviazione standard) attorno alla media.

Figure 13 HVSR spectra computed for all stations composing the temporary array at P2. The dashed line indicates the mean and the gray area the dispersion (one standard deviation) around the mean.

4. Conclusioni e prospettive future

Nell'ambito del progetto FABER e della collaborazione tra INGV e INFN, sono state installate 15 stazioni sismiche ed una stazione meteorologica, impiegate in una campagna di caratterizzazione del rumore sismico ambientale in Sardegna, presso il sito P2, area candidata ad ospitare il futuro rilevatore di onde gravitazionali ET. Il presente lavoro ha il duplice obiettivo di:

- verificare l'affidabilità tecnico-operativa della strumentazione in configurazione temporanea;
- valutare le caratteristiche spettrali e direzionali del rumore sismico anche in funzione delle condizioni meteorologiche.

I principali risultati possono essere così riassunti:

- la strumentazione ha dimostrato un buon funzionamento generale, non ha evidenziato alcuna criticità ed ha restituito un dataset di buona qualità;
- la configurazione a spirale si è rivelata efficace nel compensare il numero non elevato di stazioni nel fornire un adeguato campionamento spaziale del rumore sismico nella banda 10-20 Hz;
- tramite *beamforming*, è stata riscontrata una distribuzione delle sorgenti di rumore sostanzialmente omogenea in *backazimuth*, ad eccezione del settore sud-orientale;
- l'analisi degli spettri HVSR, calcolati per tutte le stazioni dell'*array*, ha confermato l'assenza di effetti di risonanza locale, suggerendo una stratigrafia priva di discontinuità sismiche superficiali rilevanti, coerente con quanto riscontrato in precedenti campagne geofisiche.

Per frequenze inferiori a 10 Hz, più strettamente rilevanti per la valutazione dell'impatto del rumore sismico sull'infrastruttura di ET, sarebbe necessario un *array* ad apertura maggiore al fine di garantire un adeguato campionamento del fronte d'onda. Sarà inoltre necessario garantire periodi di registrazioni più lunghi (nell'ordine delle settimane o mesi), in modo da poter valutare eventuali fluttuazioni diurne, settimanali o mensili del rumore sismico, sia in termini di ampiezza che di direzionalità. In tale contesto, conviene sottolineare l'importanza che riveste l'installazione permanente della stazione meteo al sito P2 che, sul lungo periodo, potrà fornire importanti informazioni sul ruolo del vento, e delle condizioni meteo in generale, nel contribuire al rumore sismico registrato nell'area.

L'esperienza operativa maturata nel contesto del progetto FABER dimostra l'affidabilità e l'operatività della strumentazione acquisita. In linea con le intenzioni del finanziamento PNRR, entro cui il progetto FABER si inserisce, il miglioramento e potenziamento dell'infrastruttura di ricerca costituisce una base solida al servizio della comunità scientifica e della candidatura italiana ad ospitare ET. Infatti, la qualità dell'equipaggiamento, unitamente alla modularità e semplicità delle operazioni di installazione e disinstallazione permetteranno una rapido ed efficace impiego in future campagne di misura, per tomografia sismiche, analisi di rumore ambientale e monitoraggio sismico.

I dati sismici relativi alla campagna di acquisizione sono archiviati e disponibili presso la repository EIDA Italia [16] gestita dall'INGV, con il codice network 3M_2024. Similmente, i dati raccolti nelle future campagne di acquisizione saranno resi accessibili alla comunità scientifica con le stesse modalità.

Acknowledgment

L'acquisto della strumentazione e lo svolgimento della campagna di misura è stata finanziata dal progetto MEET ("Monitoring Earth's Evolution and Tectonic", CUP D53C22001400005), nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), finanziato da Next Generation EU. Il contributo di G. Diaferia, F. Sanseverino e G. Sepede è stato supportato dal progetto MEET. Questo studio è stato condotto nell'ambito dell'accordo quadro tra INGV e INFN.

Bibliografia

- Allocca A., Avino S., Calloni E., Caprara S., Carpinelli M., Contu A., D'Onofrio L., D'Urso D., De Rosa R., Errico L., Esposito M., Gagliardi G., Grilli M., Mangano V., Marsella M., Naticchioni L., Pasqualetti A., Pepe G., Perciballi M., Puppo P., Rapagnani P., Ricci F., Rosa L., Rovelli C., Rozza D., Ruggi P., Saini N. L., Sequino V., Sipala V., Stornaiuolo D., Tafuri F. and Trozzo L., (2024). *Thermal noise-limited beam balance as prototype of the Archimedes vacuum weight experiment and BL dark photon search*. The European Physical Journal Plus, 139(2), 1–8. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-04920-x>
- Bard P.Y., (1999). *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?* In Proceedings the Effects of Surface Geology on Seismic Motion 3, 1251–1279.
- Di Giovanni M., Koley S., Ensing J.X., Andric T., Harms J., D'Urso D., Naticchioni L., De Rosa R., Giunchi C., Allocca A., Cadoni M., Calloni E., Cardini A., Carpinelli M., Contu A., Errico L., Mangano V., Olivieri M., Punturo M., Rapagnani P., Ricci F., Rozza D., Saccorotti G., Trozzo L., Dell'Aquila D., Pesenti L., Sipala V., Tosta e Melo I., (2023). *Temporal variations of the ambient seismic field at the Sardinia candidate site of the Einstein Telescope*. Geophysical Journal International, 234(1), 229–244. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad146>

- GFZ Potsdam and GEMPA GmbH, (2025a). *SeedLink Protocol and Server – Real-time Data Transmission in SeisComP*. SeisComP Documentation v6.7.9. <https://www.seiscomp.de/doc/apps/seedlink.html>
- GFZ Potsdam and GEMPA GmbH, (2025b). *SeisComP Release documentation v6.7.9*. <https://www.seiscomp.de/doc>
- Kennett B.L.N., Stipčević J., and Gorbatov A., (2015). *Spiral-arm seismic arrays*. Bulletin of the Seismological Society of America, 105(4), 2109–2116. <https://doi.org/10.1785/0120140354>
- Kvaerna T., and Ringdahl F., (1986). *Stability of various fk estimation techniques*. NORSAR Semiannual Technical Summary, 1, 1–86.
- Nakamura Y., (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30(1).
- Naticchioni L., Perciballi M., Ricci F., Coccia E., Malvezzi V., Acernese F., Barone F., Giordano G., Romano R., Punturo M., De Rosa R., Calia P. and Loddo G., (2014). *Microseismic studies of an underground site for a new interferometric gravitational wave detector*. Classical and Quantum Gravity, 31(10), 105016. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/31/10/105016>
- Nogoshi M., and Igarashi T., (1971). *On the amplitude characteristics of microtremor, Part II*. Journal of the Seismological Society of Japan, 24, 26–40. https://doi.org/10.4294/zisin1948.24.1_26
- Peterson J.R., (1993). *Observations and modeling of seismic background noise (No. 93-322)*. US Geological Survey.
- Rost S., and Thomas C., (2002). *Array seismology: Methods and applications*. Reviews of Geophysics, 40(3), 1008. <https://doi.org/10.1029/2000RG000100>
- Saccorotti G., Giunchi C., D'Ambrosio M., Gaviano S., Naticchioni L., D'Urso D., Rozza D., Cardini A., Contu A., Dordei F., Cadeddu M., Tuveri M., Migoni C., Punturo M., Allocca A., Calloni E., Cardello G. L., D'Onofrio L., Davari N., Dell'Aquila D., De Rosa R., Carpinelli M., Di Fiore L., di Giovanni M., Errico L., Fiori I., Tringali M. C., Harms J., Koley S., Longo V., Majorana E., Mangano V., Olivieri M., Paoletti F., Pesenti L., Puppo P., Rapagnani P., Razzano M., Ricci F., Sipala V., Tosta e Melo I., and Trozzo L., (2023). *Array analysis of seismic noise at the Sos Enattos mine, the Italian candidate site for the Einstein Telescope*. The European Physical Journal Plus, 138(9), 825. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04395-2>
- SESAME European Research Project, (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: Measurements, processing and interpretation*. Deliverable D23.12, European Commission – Research General Directorate.
- Tkalčić H., (2015). *Complex inner core of the Earth: The last frontier of global seismology*. Reviews of Geophysics, 53(1), 59–94. <https://doi.org/10.1002/2014RG000469>
- Vantassel J.P., (2025). *hvsrpy: An Open-Source Python Package for Microtremor and Earthquake Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio Processing*. Seismological Research Letters, 96(4), 2671–2682. <https://doi.org/10.1785/0220240395>
- Villani F., Maraio S., Improta L., De Martini P.M., Cavallaro D., Firetto Carlino M., Brunori C.A., Longo V., Casini L., Caradonna M. C., Zei C., Rapisarda S., Oggiano G., Giunchi C., Saccorotti G., Coltelli M., D'Urso D., Naticchioni L., Ricci F., Schillaci G., Cittadino D., Marsella M., Napoleoni Q., Rossini C. and Cardello G. L., (2025). *Subsurface characterization of crystalline rocks at the Einstein Telescope candidate site (Italy): Insights from seismic tomography, geoelectrical and morphostructural analyses*. Tectonophysics, 230830. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2025.230830>

Sitografia

- [1] <https://meet.ingv.it/progetto/wp-linee-di-ricerca/wp7-sardinia-faber-far-fault-observatory>
- [2] <https://www.einstein-telescope.it/>
- [3] <https://www.einstein-telescope.it/2024/02/12/perche-sos-enattos-alle-origini-della-candidatura-sarda-a-ospitare-et-intervista-a-fulvio-ricci/>
- [4] <https://www.roma1.infn.it/ricerca/csn2/archimedes.html>
- [5] <https://nanometrics.ca/instrumentation/products/seismometers/trillium-compact-horizon>
- [6] https://www.epos-france.fr/sismob/wp-content/uploads/sites/2/2020/12/25-Centaur_UserGuide_17935R10.pdf
- [7] https://www.epever.com/product/vs-au-10-60a-pwm-charge-controller/?_gl=1
- [8] https://www.advantech.com/en/products/f99fe300-4bb6-4348-a51f-8d5eba466175/icr-2531/mod_cff7e985-3e31-4b74-9417-eb1c843a609f
- [9] <https://www.explorercases.com/it/prodotti/5325/5325-g-valigia-a-tenuta-stagna-in-polipropilene-copolimero/>
- [10] <https://www.davis-europe.nl/product/davis-6162eu-cabled-vantage-pro2-plus-with-standard-radiation-shield/>
- [11] <https://www.davisinstruments.com/products/cabled-vantage-pro2-plus-iss>
- [12] https://www.davisinstruments.com/products/sonic-anemometer?srsId=AfmBOoo74i8NFHSwZ_70BHeShL6wghV4g_UOmA4AEX5g4ZKQWQHY872_
- [13] https://www.davisinstruments.com/products/weatherlink-windows-serial-port?srsId=AfmBOope6Jr7Jfse4o4wylARcB8_9H-IB-eNdNC0m4oPwG_R-MBuvLZA
- [14] <https://www.szatc.com/product/atc-1200>
- [15] <https://data.marine.copernicus.eu/>
- [16] <https://eida.ingv.it/it/>



QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<https://collane-editoriali.ingv.it/index.php/qdg/it/index/>

QUADERNI di GEOFISICA è una rivista scientifica che pubblica dati, misurazioni e osservazioni geofisiche (anche preliminari) in italiano e inglese. L'obiettivo è una diffusione rapida e gratuita per la comunità scientifica, garantita da un processo di peer-review e da un Editorial Board multidisciplinare. La rivista è inclusa in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics e "Open Access Journals" di Scopus, e adotta il modello Diamond Open Access, che non prevede costi né per gli autori né per i lettori.

QUADERNI di GEOFISICA is a scientific journal that publishes geophysical data, measurements and observations, including preliminary results, in Italian and English. Its aim is to ensure rapid and free dissemination to the research community, supported by a peer-review process and by a multidisciplinary Editorial Board. The journal is included in the Emerging Sources Citation Index of Clarivate Analytics and it's included in the Open Access journals of Scopus. It follows the Diamond Open Access model, with no charges for either authors or readers.



RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<https://collane-editoriali.ingv.it/index.php/rt/it/index>

RAPPORTI TECNICI INGV è una rivista tecnico-scientifica che mette in mostra le numerose attività tecnologiche e di ricerca condotte dai ricercatori e tecnici INGV, e non solo. Pubblicata in italiano e inglese, RAPPORTI TECNICI INGV è ideata per valorizzare anche quei lavori che offrono un contributo significativo dal punto di vista tecnico, operativo o documentale fondamentale per lo sviluppo dell'Ente. La rivista adotta il modello Diamond Open Access, che non prevede costi né per gli autori né per i lettori.

RAPPORTI TECNICI INGV is a technical-scientific journal that showcases the wide range of technological and research activities carried out by INGV researchers and technical staff, as well as by external contributors. Published in Italian and English, RAPPORTI TECNICI INGV is designed to highlight works that provide a significant contribution from a technical, operational, or documentary perspective, and that are essential to INGV development. The journal follows the Diamond Open Access model, with no charges for either authors or readers.



MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

<https://collane-editoriali.ingv.it/index.php/mi/it/index>

MISCELLANEA INGV rappresenta una tipologia di editoria non tradizionalmente catalogabile nelle ordinarie riviste scientifiche di settore. Pubblicata in lingua italiana e inglese, MISCELLANEA INGV offre uno spazio per la pubblicazione di materiali eterogenei che, pur non rientrando nei formati più strutturati delle altre Collane editoriali INGV, rivestono un interesse scientifico, tecnico o divulgativo. La rivista adotta il modello Diamond Open Access, che non prevede costi né per gli autori né per i lettori.

MISCELLANEA INGV represents a form of publishing that cannot be classified within the standard scientific journals. Published in Italian and English, MISCELLANEA INGV provides a venue for the publication of heterogeneous materials that are of scientific, technical or outreach interest, even though they do not fall within the more structured formats of the other INGV editorial series. The journal follows the Diamond Open Access model, with no charges for either authors or readers.

Progetto grafico
Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Ufficio Editoriale
Francesca DI STEFANO | Coordinatore

Segreteria di redazione
segreteria.collane-editoriali@ingv.it

Editing | Produzione | Grafica redazionale
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Francesca DI STEFANO
Patrizia PANTANI

© 2026 the Author(s). All rights reserved. Open Access



Creative Commons Attribution 4.0 International



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA