

QUADERNI di GEOFISICA

Sullo sviluppo della rete
multiparametrica in Sicilia



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

172

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Mario CASTELLANO (mario.castellano@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

Segreteria di Redazione

Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI
Robert MIGLIAZZA
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Patrizia PANTANI
Tel. +39 06 51860068
redazione@ingv.it

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale
di Geofisica e Vulcanologia
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

QUADERNI di GEOFISICA

Sullo sviluppo della rete multiparametrica in Sicilia

On the development of the multiparametric network in Sicily

Antonino D'Alessandro¹, Roberto D'Anna¹, Fabio Di Gangi¹, Giuseppe Passafiume¹,
Salvatore Scudero¹, Stefano Speciale¹, Giovanni Vitale¹, Christian Bignami¹, Antonio Piersanti²,
Valentina Cannelli², Gianfranco Galli², Rosario Mineo³, Giuseppe Alessandro³,
Salvatore Buonmestieri³, Sandro Rao¹, Salvatore Stramondo¹

¹INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Nazionale Terremoti

²INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Sismologia e Tettonofisica

³Libero Consorzio Comunale di Ragusa, Ragusa

Accettato 9 maggio 2021 | Accepted 9 May 2021

Come citare | How to cite D'Alessandro A. et al., (2021). Sullo sviluppo della rete multiparametrica in Sicilia. Quad. Geofis., 172: 1-40,
<https://doi.org/10.13127/qdg/172>

In copertina Sismicità strumentale dal 1985 al 2018 classificata per profondità e magnitudo | Cover Instrumental seismicity recorded from
1985 to 2018 and ranked according to depth and magnitude

172

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	8
1. Considerazioni sul rischio sismico in Sicilia	9
2. Sviluppo della rete multiparametrica in Sicilia	10
2.1. La rete velocimetrica	12
2.2. La rete accelerometrica, GPS, Radon e <i>Corner Reflector</i>	16
2.3. Sistemi di alimentazione, acquisizione e trasmissione	21
3. Altre reti	22
3.1. Reti sperimentali a piccola scala	22
3.2. Rete fiduciaria c/o Stazioni dei Carabinieri	24
4. Considerazioni e conclusioni	25
Bibliografia	28
Appendice	33

Riassunto

In questo contributo viene illustrato lo stato dell'arte sullo sviluppo della rete multiparametrica in Sicilia in riferimento all'ultimo triennio. Questa regione è storicamente nota per i suoi forti terremoti ($M > 6.5$), ma la copertura della Rete Sismica Nazionale (RSN) sviluppata nel corso degli anni dall'INGV non risultava ancora ottimale in funzione delle esigenze di monitoraggio e sorveglianza sismica. A partire dal 2017, il personale dell'Osservatorio Nazionale Terremoti (ONT) operativo in Sicilia, ha dato il via ad un programma di sviluppo e implementazione della rete sismica preesistente (RSN) nell'ambito del Progetto FISR "Sale Operative Integrate e Reti di Monitoraggio del futuro: l'INGV 2.0 (S.O.I.R.)"; tale programma si concluderà nei prossimi anni, grazie anche al Progetto "GRINT Infrastruttura di Ricerca Italiana per le Geoscienze" nell'ambito del Programma Operativo Nazionale (PON) del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. Questo progetto consiste sia nell'*up-grade* dei sistemi di monitoraggio in alcuni dei siti di stazione già esistenti, sia nell'aggiunta di nuovi nodi alla rete. L'obiettivo è quello di realizzare una rete multiparametrica che, parallelamente alla preesistente RSN che rappresenta l'infrastruttura principale, preveda il monitoraggio anche di altri segnali e parametri geofisici mediante apposita sensoristica: accelerometri, GPS geodetici, rilevatori di gas radon e riflettori radar (*Corner Reflector*). Viene inoltre illustrato il programma di realizzazione di una rete fiduciaria ridondante rispetto alla rete esistente, che possa garantire la sorveglianza sismica in caso di crisi dell'infrastruttura primaria. Vengono infine presentate le potenzialità di reti sperimentali a scala urbana, che in futuro potranno essere integrate all'infrastruttura principale.

Abstract

This contribution illustrates the state of the art on the development of the multiparametric network in Sicily in the last three years. This region is well-known for the strong earthquakes ($M > 6.5$) which struck in historic time. However, the coverage of the seismic network developed in the last decades was not fully optimized to the need of the seismic surveillance. Since 2017, the group belonging to the National Earthquake Observatory (ONT) which operates in Sicily launched a developing plan of the pre-existing seismic network in the framework of the project FISR "Sale Operative Integrate e Reti di Monitoraggio del futuro: l'INGV 2.0 (S.O.I.R.)". Such update will end by the next years thanks to the project "GRINT Italian Research Infrastructure for Geosciences" in the framework of the "Programma Operativo Nazionale" (PON) of the Italian Ministry for the University and Research. This plan envisages both the upgrade of monitoring systems in the already existing nodes, and the integration of new nodes. The main objective is to build a multiparametric network which integrates the main seismic network, with the monitoring of other geophysical signals through the implementation of other sensors: accelerometers, geodetic GPS, radon detectors, and corner reflectors. We also illustrate the plan for the realization of a redundant network which could support the tasks of the main infrastructure in case of failure of the latter. Finally, we present some experimental urban-scale networks which in the future could support the main infrastructure.

Keywords Rete Sismica Nazionale; Rete multiparametrica; Sicilia | National Seismic Network; Multiparametric network; Sicily.

Introduzione

Negli ultimi vent'anni, l'implementazione e lo sviluppo tecnologico della Rete Sismica Nazionale (RSN), formalmente avviato a partire dal 1981, ha permesso di migliorare significativamente la qualità del monitoraggio sismico, sia in termini di copertura areale che di riduzione della magnitudo di detezione, ovvero della capacità di localizzare terremoti sempre più piccoli sull'intero territorio italiano [Amato and Mele, 2008; D'Alessandro et al., 2011]. Il crescente numero di terremoti registrati dalle stazioni della RSN, rispetto a quelli rilevati nei primi anni di attività della stessa, è frutto di un continuo sviluppo che ha permesso di innalzare a livelli di eccellenza gli standard operativi di monitoraggio e sorveglianza [Michelini et al., 2016; Margheriti et al., 2021].

È di fondamentale importanza, in virtù di un legame indissolubile tra sviluppo tecnologico dei sistemi di monitoraggio e avanzamenti scientifici, continuare ad ampliare e implementare le strutture di monitoraggio operative nell'ambito della ricerca sismologica, e più in generale nell'ambito del monitoraggio multiparametrico dei fenomeni sismici.

Il miglioramento delle conoscenze è realizzabile solo attraverso lo sviluppo e l'*upgrade* continuo di un sistema di monitoraggio moderno basato su un approccio multiparametrico e multidisciplinare, ma anche multiscala. Solo in tal modo è possibile progredire nella comprensione del fenomeno sismico e dei fenomeni ad esso associati, aprire nuove prospettive per la valutazione della pericolosità sismica, per la previsione probabilistica dei terremoti, per la prevenzione e l'aumento della resilienza, e più in generale per la mitigazione del rischio sismico [Rao et al., 2020].

Il territorio siciliano offre una innumerevole varietà di ambienti e sottosistemi, che rendono la Sicilia un laboratorio naturale unico al mondo. Da tale variabilità naturale, segue un'altrettanta variabilità nella pericolosità associata ai molteplici fenomeni ambientali che in questo territorio frequentemente osserviamo. Se da una parte la molteplicità dei fenomeni presenti in un'area come la Sicilia può renderne complicato e oneroso lo studio e l'osservazione sistematica, dall'altro lato ciò apre la possibilità (o forse la necessità) di utilizzare un approccio multiparametrico e multidisciplinare al monitoraggio della stessa. Per tale ragione, a partire dal 2017, il personale dell'Osservatorio Nazionale Terremoti (ONT) operativo in Sicilia (ONT-Sicilia da qui in avanti) ha perseguito come obiettivo lo sviluppo e l'implementazione di una rete di monitoraggio multiparametrica sul territorio regionale che, oltre a sensori velocimetrici *broadband* e sensori GPS geodetici, associasse altri sensori utili ed importanti per lo studio dei terremoti e più in generale dei fenomeni fisici caratteristici del territorio siciliano [AA.VV., 2020]. Questa attività di sviluppo e potenziamento ha consentito di dotare diverse stazioni della Rete Sismica Nazionale di sensori accelerometrici, radonometri, *Corner Reflector* e stazioni di monitoraggio prototipali basate su tecnologia MEMS (*Micro-ElectroMechanical System*) [D'Alessandro et al., 2020c]. Inoltre, il progresso di queste ultime ha permesso di dare avvio, parallelamente allo sviluppo della rete multiparametrica a scala regionale, allo sviluppo in via sperimentale di reti di monitoraggio a scala urbana e di edificio [D'Alessandro, 2014; 2016].

Questo sforzo iniziale, attuato nell'ambito del Progetto FISR "Sale Operative Integrate e Reti di Monitoraggio del futuro (S.O.I.R.)" si è reso necessario quale attività propedeutica all'importante potenziamento delle infrastrutture di monitoraggio previste per il 2021-2022 nell'ambito del progetto PON "GRINT - Infrastruttura di Ricerca Italiana per le Geoscienze". Il presente lavoro ha quindi lo scopo di illustrare l'attuale stato di sviluppo e avanzamento della rete multiparametrica in Sicilia, così come le prospettive di sviluppo future.

1. Considerazioni sul rischio sismico in Sicilia

La Sicilia ha subito numerosi terremoti catastrofici, sicuramente tra quelli più rilevanti mai accaduti nella storia sismica d'Italia (Tabella 1). Tra questi per danni e numero di vittime, si ricordano soprattutto il terremoto della Val di Noto del 1693 (M 7.4) e il terremoto di Messina del 1908 (M 7.1) le cui sorgenti sismogenetiche non sono state ancora inequivocabilmente identificate. L'eterogenea sismicità del territorio siciliano è conseguenza del ruolo che la Sicilia ricopre nel complesso quadro geodinamico del Mediterraneo centrale. Nel contesto generale di convergenza tra Eurasia e Africa sono riconoscibili differenti sottodomini riconducibili alla presenza di blocchi crostali indipendenti. In un'area relativamente ristretta come la Sicilia coesistono quindi diversi processi attivi quali quelli di subduzione litosferica, di collisione continentale, di margini trascorrenti, di zone di *rifting* continentale [Serpelloni et al., 2007; Sgroi et al., 2012; Palano et al., 2012; Siino et al., 2018].

Il catalogo delle sorgenti sismogenetiche in Italia (*Database of Individual Seimogenic Sources*, DISS), sulla base di evidenze geologiche, sismologiche, geofisiche, paleosismologiche e archeosismologiche ha individuato in Sicilia numerose sorgenti in grado di produrre terremoti di magnitudo superiore a 5.5 [DISS Working Group, 2018]. La sismicità strumentale recente, registrata a partire dal 1985 (Figura 1), pur rimarcando in maniera abbastanza evidente alcuni dei più importanti volumi sismogenetici siciliani, non permette una esaustiva caratterizzazione delle zone stesse.

Data	I ₀ (MCS)	M	Zona epicentrale
4 Febbraio 1169	X	6.4	Sicilia orientale
10 Dicembre 1542	X	6.8	Sicilia sud-orientale
11 Gennaio 1693	XI	7.4	Sicilia orientale
20 Febbraio 1818	IX	6.0	Etna
28 Dicembre 1908	XI	7.1	Calabria meridionale e Sicilia
15 Gennaio 1968	X	6.4	Valle del Belice

Tabella 1 Principali terremoti storici in Sicilia, da Rovida et al. [2016] e Guidoboni et al. [2018]. Per ogni terremoto è riportata la data, l'intensità massima nella scala MCS, la Magnitudo equivalente e la zona epicentrale.
Table 1 Main historical earthquakes in Sicily, from Rovida et al. [2016] and Guidoboni et al. [2018]. For each earthquake is given the date, the maximum intensity in MCS scale, the equivalent magnitude, and the epicentral area.

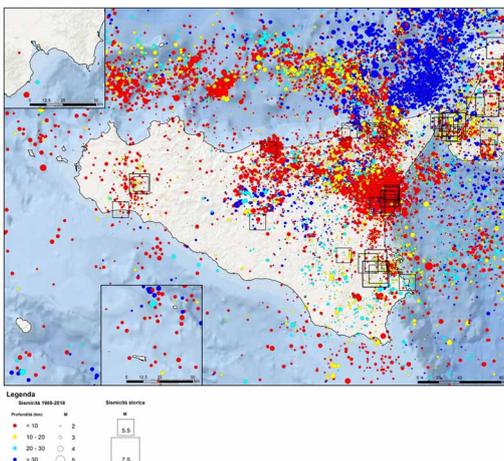


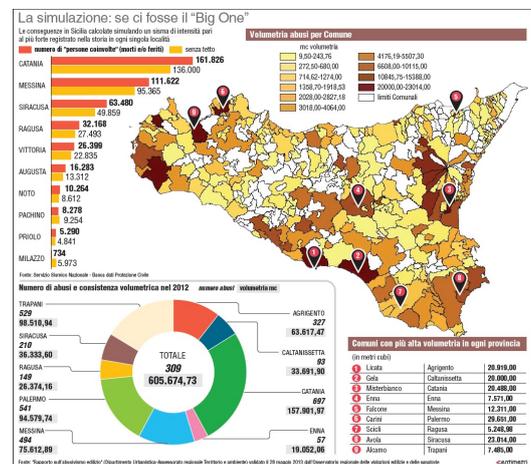
Figura 1 Sismicità strumentale dal 1985 al 2018 classificata per profondità e magnitudo. I quadrati rappresentano gli eventi riportati nel Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1997 [Guidoboni et al., 2018].

Figure 1 Instrumental seismicity recorded from 1985 to 2018 and ranked according to depth and magnitude. The black squares represent the events reported in the Italian Catalogue of Strong Earthquakes, from 461 B.C. to 1997 [Guidoboni et al., 2018].

La Sicilia è dunque una regione a elevata pericolosità sismica per la quale è importante approfondire la conoscenza del territorio e dei fenomeni sismici che su essa si manifestano, mediante un processo di studio e monitoraggio multiparametrico, che deve essere il più possibile continuo ed esteso. Il monitoraggio sismico del territorio siciliano appare ancora più importante in relazione alla vulnerabilità e all'esposizione di questa regione. Il Servizio Sismico Nazionale, simulando il ripetersi di forti terremoti del passato [Protezione Civile, 2013] ha stimato per la Sicilia (soltanto nelle 10 città-campione considerate), un bilancio di 436.347 fra morti e feriti, con 373.544 persone senza tetto (Figura 2). Le stime del Servizio Sismico Nazionale tengono conto dei diversi fattori che, più o meno direttamente, influiscono sul rischio sismico. Pertanto, oltre alla densità abitativa, sono stati usati i dati del Sistema Informativo di Gestione delle Emergenze (SIGE) della Protezione Civile, soprattutto quelli sulla vulnerabilità degli edifici in base all'epoca e ai materiali edili, oltre che all'altezza degli immobili e alla tipologia di terreni sui quali sono costruiti [Toscano et al., 2013]. Su questi elementi sono stati stilati i cosiddetti "Scenari di danno". Per la Sicilia sud-orientale si è fatto riferimento al catastrofico terremoto dell'11 gennaio del 1693 (M 7.4, 54.000 vittime accertate e una cinquantina di centri abitati rasi al suolo), per la Sicilia nord-orientale il terremoto di riferimento è stato il sisma sullo Stretto di Messina del 28 dicembre 1908 (M 7.1, vittime stimate fra 60 e 80.000). Secondo queste simulazioni Catania risulterebbe la città con più persone coinvolte, con ben 161.829 fra morti e feriti e 136.000 senza tetto, seguita da Messina, con 111.622 cittadini fisicamente coinvolti e 95.365 sfollati, Siracusa con 63.480 morti e feriti e 49.859 senza tetto. Rilevante anche l'impatto sulle città di Ragusa (32.168 e 27.493), Vittoria (26.399 e 22.835), Noto (10.264 e 8.612), Augusta (16.283 e 13.312), Pachino (8.278 e 9.254) e Priolo (5.290 e 4.841). In generale, il rischio sismico in Sicilia è elevato a causa della sfavorevole combinazione tra pericolosità sismica e vulnerabilità dell'edificato [Crowley et al., 2009].

Figura 2 Estratto dal dossier a cura del Servizio Sismico Nazionale [Protezione Civile, 2013].

Figure 2 Report from the Servizio Sismico Nazionale [Protezione Civile, 2013].



2. Sviluppo della rete multiparametrica in Sicilia

Il monitoraggio sismico in una regione come la Sicilia, per mezzo di una rete di sensori adeguatamente distribuiti, rappresenta la base fondamentale per la caratterizzazione sismica e la definizione della pericolosità da terremoto, o più in generale da fenomeni naturali e antropici che incidono sul territorio stesso. Negli ultimi vent'anni la RSN si è velocemente evoluta grazie ai grandi passi in avanti compiuti dalla tecnologia di settore. I più importanti step tecnologici sono stati sicuramente il passaggio dai sistemi analogici a quelli digitali, lo sviluppo dei sensori a larga banda e il miglioramento dei sistemi di trasmissione e archiviazione dei dati. Grazie a

questi progressi tecnologici, la varietà di fenomeni sismici osservabili è cresciuta enormemente (e.g. microsismicità, telesismi). Inoltre, grazie agli importanti finanziamenti ottenuti negli ultimi vent'anni da parte del Dipartimento della Protezione Civile e del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) e da parte della Regione Sicilia, la rete di monitoraggio dell'INGV in Sicilia è stata ampliata, ed è attualmente in fase di implementazione e ammodernamento grazie anche a importanti finanziamenti legati ad alcuni progetti di ricerca quali il FISR "Sale Operative Integrate e Reti di Monitoraggio del futuro (S.O.I.R.)" e il PON infrastrutturale GRINT (Infrastruttura di Ricerca Italiana per le Geoscienze).

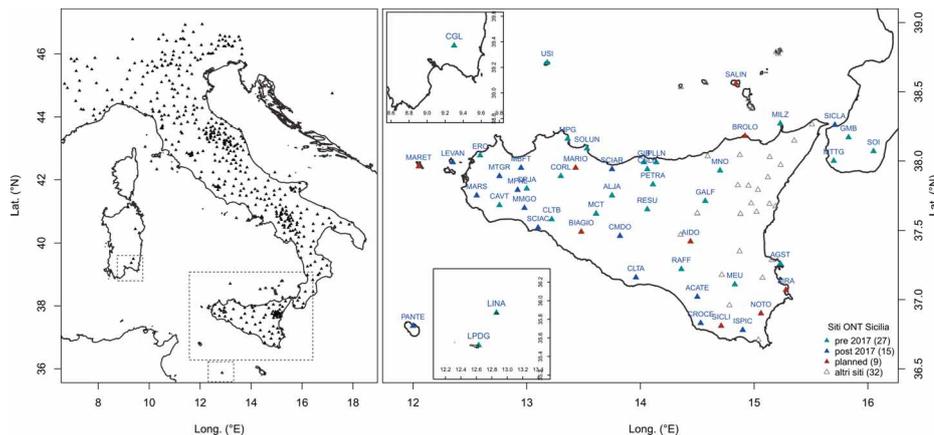


Figura 3 Mappa dei nodi delle reti sismiche in Italia [INGV Seismological Data Center, 2006] e dettaglio della rete sismica gestita dall'INGV in Sicilia (inclusi i siti con installazione già programmata). I triangoli pieni indicano le stazioni di competenza dell'ONT-Sicilia, i triangoli vuoti sono i siti di competenza dell'Osservatorio Etneo (OE), di MedNet o di altre reti locali.

Figure 3 Map of the nodes of the seismic networks in Italy (from INGV, 2006) and detail of the network managed by INGV in Sicily region (included the planned sites). The filled triangles indicate the stations managed by the ONT-Sicilia, the empty triangles indicate the ones managed by the OE-INGV (Etna Observatory), MedNet, or other local networks.

Sulla base di quanto detto, e in prospettiva del PON GRINT, a partire dal 2017, l'ONT-Sicilia ha perseguito lo sviluppo e l'implementazione di una rete di monitoraggio multiparametrico su tutto il territorio regionale che, oltre a sensori velocimetrici *broadband* e GPS geodetici, associasse altri sensori importanti per lo studio dei terremoti, e più in generale per la conoscenza del territorio e le valutazioni di pericolosità da rischi naturali e antropici [Progetto FISR S.O.I.R. "Sale Operative del Futuro" - AA.VV., 2020].

La mappa di Figura 3 mostra l'ubicazione delle stazioni che attualmente contribuiscono alla Rete Sismica Nazionale e quelle la cui installazione è stata già programmata. Tra il 2017 e il 2019, sono state installate varie nuove stazioni di monitoraggio (Tabella 2 e Figura 4); questa attività è stata purtroppo interrotta nell'ultimo anno (2020) a causa dell'emergenza sanitaria collegata alla pandemia da COVID-19. Si prevede tuttavia, come già detto, di riprendere l'attività di potenziamento della rete sismica in Sicilia a partire dagli inizi del 2021, grazie anche alla disponibilità di nuova strumentazione acquisita in seno al PON GRINT. Tale attività riguarderà in realtà anche altre aree ricadenti nelle regioni di convergenza e il potenziamento della rete MedNet [Pondrelli et al., 2020].

È da tenere in considerazione che lo sviluppo di una rete costituita da stazioni multiparametriche, ovvero da siti che ospitano contemporaneamente più tipologie di sensori, permette un sicuro

abbattimento dei costi di realizzazione e in particolare del loro mantenimento nel lungo termine. Infatti, il costo di una rete multiparametrica nella quale gli oneri per la struttura e per i servizi (alimentazione, trasmissione, manutenzione, etc.) siano condivisi, è sicuramente di gran lunga minore del costo della somma delle singole reti qualora queste fossero realizzate indipendentemente. Per venire quindi, ove possibile, alla realizzazione di stazioni multiparametriche è una scelta di ragionevole economicità e sostenibilità nel lungo termine. Naturalmente non è secondario l'aspetto scientifico: una rete multiparametrica permette di monitorare diversi fenomeni geologici e/o geofisici per una possibile valutazione di precursori sismici.

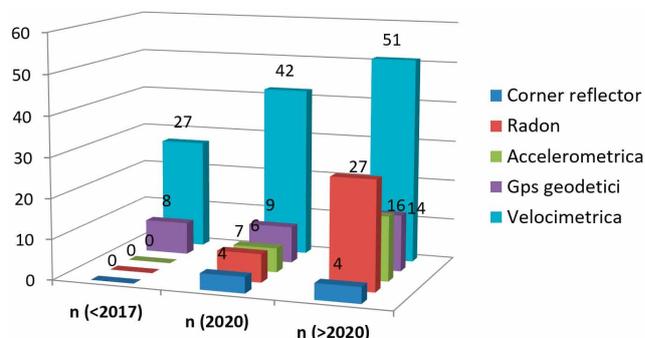
Tipo rete	n (<2017)	n (2020)	n (>2020)
Velocimetrica	27	42	51
Gps geodetici	8	9	14
Accelerometrica	0	6	16
Radon	0	7	27
Corner Reflector	0	4	4
Totale stazioni	27	42	51

Tabella 2 Numero cumulato di sensori della rete preesistente (<2017), dell'attuale (2020) e della futura (>2020) rete multiparametrica in Sicilia. Fare riferimento all'appendice per la versione estesa della tabella.

Table 2 Cumulative number of sensors of the pre-existing (<2017), present-day (2020), and future (>2020) multiparametric network in Sicily. Refer to the Appendix for the extended version of the table.

Figura 4 Evoluzione della rete multiparametrica in Sicilia.

Figure 4 Evolution of the multiparametric network in Sicily.



2.1 La rete velocimetrica

La rete velocimetrica costituisce la base del monitoraggio sismico: la copertura spaziale e la tipologia di sensori devono consentire il più capillare controllo del territorio, così come la più fedele registrazione delle forme d'onda nella più ampia banda di frequenze. Il potenziamento della RSN ha visto l'installazione di alcune nuove stazioni in Sicilia occidentale, per rendere più densa la rete di monitoraggio nell'area della Valle del Belice. Come ben noto, la Sicilia occidentale è stata interessata nel 1968 da una importante sequenza sismica, il cui evento principale, conosciuto come terremoto del Belice, ebbe magnitudo 6.4 (Tabella 1). Il potenziamento prevederà inoltre l'estensione verso il mare della RSN mediante l'installazione di alcune stazioni sismiche sulle isole Egadi (Figura 3). Si è inoltre proceduto a potenziare la rete in Sicilia sud-orientale, in particolare nel settore ibleo. Le stazioni già installate, e quelle di prossima

installazione, permetteranno una adeguata copertura della Val di Noto, come ben noto area ad elevatissima pericolosità sismica, in passato colpita da terremoti violentissimi come quello del 1693, di magnitudo momento stimata pari a 7.3 (Tabella 1). Nella stessa Sicilia sud-orientale, tre stazioni sismiche (ACATE, CROCE, ISPIC), parte di una rete locale gestita dal Libero Consorzio Comunale di Ragusa, sono entrate a far parte della RSN a seguito di una convenzione con INGV.

Modello	Periodo (s)	n	%
CMG-3EX	120	4	9,5
Trillium-120	120	4	9,5
Trillium-40	40	16	38,1
LE3D-20	20	7	16,7
LE3D-5	5	9	21,4
LE3D-1	1	1	2,4
L-4C-1	1	1	2,4
		42	100

Tabella 3 Elenco dei sensori velocimetrici in uso presso i siti di stazione della RSN dell'INGV-ONT in Sicilia (al 31/12/2020).

Table 3 List of the sensors installed in the sites of the INGV seismic network in Sicily (until 31/12/2020).

Si è inoltre proceduto all'istallazione di alcune stazioni in Sicilia nord-orientale e in Calabria meridionale, per migliorare la copertura del settore montuoso dei Monti Nebrodi - Monti Peloritani e soprattutto dello Stretto di Messina. Anche quest'ultima area, come ben noto, risulta tra quelle a maggiore pericolosità dell'interno territorio nazionale, colpita poco più di un secolo fa dal terremoto più catastrofico documentato, ovvero il terremoto calabro-messinese del 1908 di M_w 7.1 (Tabella 1).

Il processo di *upgrade* della RSN ha previsto un'importante fase propedeutica, ovvero le necessarie indagini e valutazioni di sito. L'individuazione di un nuovo sito di stazione per la RSN è un'operazione estremamente importante e che necessita di accurate valutazioni di carattere geologico-geofisico. Tra queste, la valutazione delle condizioni dei terreni affioranti e della presenza di fonti di disturbo (antropico o naturale) che devono essere verificate tramite misurazioni del livello di rumore sismico. Di non minore importanza sono anche le valutazioni di carattere tecnico-logistico: sui sistemi di alimentazione, sui sistemi di trasmissione dati e sulla logistica di accesso al sito. Queste valutazioni di dettaglio sull'idoneità dei siti, sono ovviamente successive a una prima analisi, a più grande scala, sulle aree che necessitano di un potenziamento del monitoraggio. Queste vanno individuate seguendo strategie precise che devono tenere conto sia della geometria della rete già esistente, sia della sismicità storica e strumentale, o più in generale delle strutture sismogenetiche individuate nel settore da ottimizzare [D'Alessandro et al., 2013a, 2013b, 2014; Siino et al., 2020b].

La rete velocimetrica in Sicilia gestita dall'ONT, risulta attualmente costituita da 42 stazioni, e nell'ambito del progetto PON GRINT dovrebbe subire un importante ammodernamento della strumentazione e un incremento pari circa al 30%. Attualmente risultano installati sia sensori a corto periodo sia a larga banda (Tabella 3 e Figura 5), tutti a tre componenti. Naturalmente la tendenza è quella di sostituire progressivamente tutti i sensori a più corto periodo (fino a 5s) con sensori a banda larga, attività che sarà in buona parte realizzata in seno al progetto GRINT che ha come obiettivo principale l'*upgrade* con sensori *broadband* delle stazioni ricadenti in specifiche regioni, quali la Sicilia.

Attualmente i sensori sismici, livellati con accuratezza e orientati rispetto alla direzione Nord-Sud, sono generalmente posizionati all'interno di pozzetti isolati termicamente e protetti dagli agenti atmosferici e fisici. Inoltre, installando il sensore in profondità nel terreno, sul fondo di pozzi che intercettano il *bedrock* (*posthole*), è possibile abbattere il livello di rumore sismico le cui sorgenti sono quasi sempre superficiali (i.e. sorgenti antropiche, vento, pressione atmosferica, vegetazione) e rendere il più possibile stabili parametri quali la temperatura, la pressione e l'umidità.

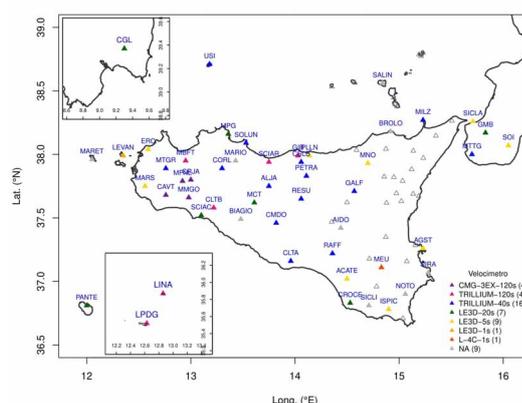


Figura 5 Rete sismica dell'INGV-ONT in Sicilia. I triangoli colorati indicano i vari tipi di velocimetri installati ed elencati in Tabella 3. NA: non applicabile; strumentazione non ancora installata in siti già programmati.

Figure 5 Seismic network managed by INGV-ONT in Sicily. The colored triangles indicate the various types of velocimeters installed and listed in Table 3. NA: not applicable; sensor not yet installed in planned sites.

L'abbattimento del rumore per installazioni in pozzo è strettamente dipendente dalla frequenza ed è inoltre variabile sulle diverse componenti. A frequenze di pochi Hz si osservano riduzioni dell'ordine dei 20 dB già a poche decine di metri di profondità e riduzioni fino a 40 dB a qualche centinaio di metri. Per frequenze superiori ai 10 Hz si osservano attenuazioni del *noise* anche di 40 dB a profondità di alcune decine di metri [Greig et al., 2014; Withers et al., 1996; Hutt et al., 2017]. Tra i sensori utilizzati per installazione in pozzo, si distinguono generalmente i sismometri "*borehole*" e i "*posthole*". Mentre i primi sono progettati per perforazioni profonde (centinaia e migliaia di metri) e sono dotati di sistemi di ancoraggio laterale al rivestimento del pozzo, i secondi sono progettati per l'installazione al fondo di perforazioni poco profonde (<50 m), anche senza rivestimento [Haymanm, 2014]. In prospettiva della prossima realizzazione del progetto infrastrutturale GRINT, che prevede l'installazione anche di un elevato numero di velocimetri in pozzo, un primo sensore *posthole* è stato installato temporaneamente presso un pozzo di 10 metri di profondità realizzato da parte del Libero Consorzio Comunale di Ragusa presso la propria sede (Figura 6).

Il sensore testato è un Trillium Compact 120s *posthole* prodotto dalla Nanometrics, lo stesso che sarà impiegato per le stazioni *posthole* previste in seno al GRINT. Il pozzo è stato inizialmente predisposto per accogliere il sensore *posthole* predisponendo una base di appoggio a fondo pozzo, creata mediante una colata di cemento autolivellante. Il sensore è poi stato installato, messo in bolla e orientato grazie all'ausilio di un sistema di controllo/interfacciamento sviluppato dalla Nanometrics.



Figura 6 Installazione del sensore Trillium Compact posthole in una perforazione di 10 metri presso Ragusa (ottobre 2018).

Figure 6 Installation of a Trillium Compact posthole velocimeter into a 10 meters deep borehole in Ragusa (October 2018).

La significativa riduzione del rumore sismico è stata verificata eseguendo un'analisi comparativa della PSD (*Power Spectral Density*) di accelerazione stimata per il sensore in pozzo con quella ottenuta da un identico sensore posto in superficie. Come è possibile osservare dalle PSD e dal grafico delle loro differenze riportato in Figura 7, l'installazione di un sensore in pozzo riduce anche di 20 dB il livello di rumore sismico in un'ampia banda di frequenze. La riduzione della potenza del rumore sismico non è omogenea su tutta la banda di frequenza ma risulta più evidente alle frequenze inferiori a 0.1 Hz e superiori ai 10 Hz. Alle basse frequenze, nella banda 0.01 - 0.1 Hz, la riduzione significativa della potenza del rumore è sicuramente legata a una maggiore stabilità termica e schermatura del sensore in profondità rispetto a quella dello strumento di riferimento co-installato in superficie. Come ben noto, la moderna strumentazione *broadband* necessita di un'ottimale stabilità dei parametri fisici/ambientali per poter garantire una piena efficienza di funzionamento. Alle alte frequenze invece, nella banda 10 - 40 Hz, la riduzione della potenza del rumore sismico è sicuramente da imputare alla naturale attenuazione delle microvibrazioni ambientali con la profondità.

L'installazione di sensoristica in pozzo è tra le azioni programmate per le future fasi di *upgrade* della RSN previste in seno al PON GRINT. Tuttavia, il miglioramento di una stazione sismica non passa solamente per l'*upgrade* del sensore, che sicuramente ne è il componente più importante, ma anche dall'*upgrade* dei sistemi di alimentazione, di acquisizione e di trasmissione (vedi paragrafo 2.3).

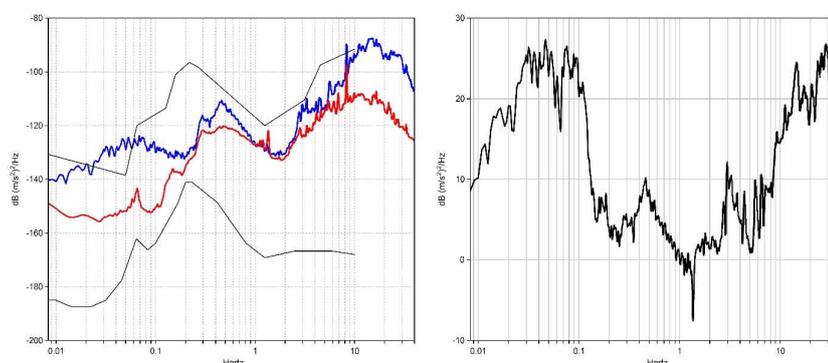


Figura 7 A sinistra: confronto tra le PSD di accelerazione (componenti verticali) determinate per la stazione in pozzo (linea rossa) e in superficie (linea blu); a destra, la loro differenza.

Figure 7 On the left: comparison between the acceleration PSDs (vertical components) determined for the posthole station (red line) and that on the surface (blue line); to the right their difference.

2.2 La rete accelerometrica, GPS, Radon e Corner Reflector

A partire dal 2018 l'ONT-Sicilia ha iniziato lo sviluppo della rete accelerometrica, in particolare l'installazione dei primi accelerometri in Sicilia occidentale e meridionale. Lo sviluppo della rete accelerometrica è di grande importanza per l'attività di monitoraggio perché consente di aumentare notevolmente la dinamica complessiva della stazione sismica e quindi l'intervallo di misure osservabili. Gli accelerometri risultano, infatti, strumenti indispensabili per il monitoraggio e la caratterizzazione dei forti terremoti. La Figura 8 mostra lo stato attuale della rete accelerometrica in Sicilia.

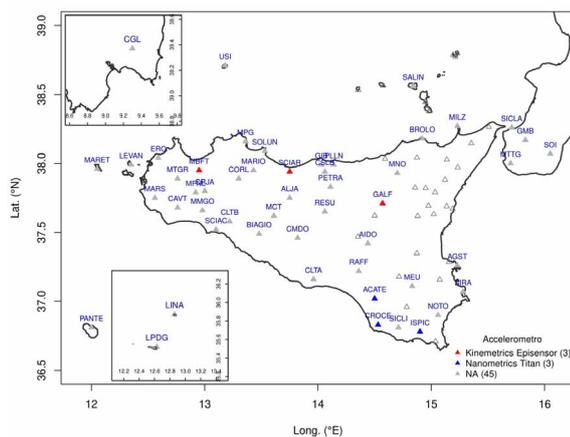


Figura 8 Rete accelerometrica dell'INGV-ONT in Sicilia. I triangoli colorati indicano i siti equipaggiati con accelerometro. NA: non applicabile; strumentazione non presente o non ancora installata in siti già programmati.

Figure 8 Accelerometric network managed by INGV-ONT in Sicily. The colored triangles indicate the sites equipped with the accelerometer. NA: not applicable; sensor not present or not yet installed in planned sites.

Contestualmente, in alcune stazioni sono state installate anche stazioni GPS, Radon e *Corner Reflector*, le cui prerogative sono di seguito descritte brevemente.

Il GPS (*Global Positioning System*) è un sistema di posizionamento globale di derivazione militare che può essere usato anche per il monitoraggio geodetico. Lo strumento è in grado di fornire la posizione assoluta di un punto con precisione sub-centimetrica. Il GPS è in grado di rilevare *trend* di deformazioni nel medio e lungo termine, ma anche registrare il movimento del suolo in occasione di eventi sismici molto forti, mediante acquisizioni ad alta frequenza (20 Hz). Permette di osservare l'accumulo pre-sismico e il rilascio post-sismico nell'intorno di una struttura sismogenetica. Infine, proprio l'utilizzo sistematico del GPS a partire dagli anni '90, ha permesso di comprendere come gran parte dello *stress* tettonico si traduca in deformazione asismica e il confronto tra il rilascio sismico e asismico è fondamentale per una corretta valutazione della pericolosità. La Figura 9 mostra lo stato attuale della rete GPS in Sicilia e i siti già predisposti per l'installazione dello strumento.

Il radon (^{222}Rn) è un gas radioattivo che si origina dal decadimento naturale di altri elementi radioattivi presenti nella crosta. Il trasporto del radon nel suolo avviene essenzialmente mediante altri gas o fluidi che agiscono da vettori. Il tempo di dimezzamento del radon è di soli 3,8 giorni, pertanto il radon normalmente rilevato in superficie è di origine estremamente superficiale. Anomalie nei valori di radon possono essere messe in relazione con i processi che ne facilitano

la risalita da parti più profonde della crosta, come ad esempio il rilascio di *stress* tettonico e la conseguente apertura di fratture. Evidenze della relazione tra rilascio di radon e sismicità sono state proposte da numerosi gruppi di ricerca in zone sismiche in varie parti del mondo [Ghosh et al., 2009; Woith, 2015; Morales-Simfors et al., 2020].

L'INGV nel corso degli ultimi anni ha sviluppato delle tecniche di misura innovative che permettono di acquisire, sia in laboratorio sia in campagna, serie temporali in continuo della concentrazione di radon con alto rapporto segnale/rumore e scarsamente influenzate dalle variazioni dei parametri meteorologici e ambientali. Peculiarità fondamentali di questa tecnica di misura sono la semplicità ed economicità di installazione (da 1.000 a 10.000 € a seconda del sensore utilizzato e delle necessarie opere di adattamento alle caratteristiche specifiche del sito da strumentare), l'elevatissima sensibilità ed efficienza e l'alta precisione delle misure anche in ambienti a basse concentrazioni di radon [Cannelli et al., 2020].

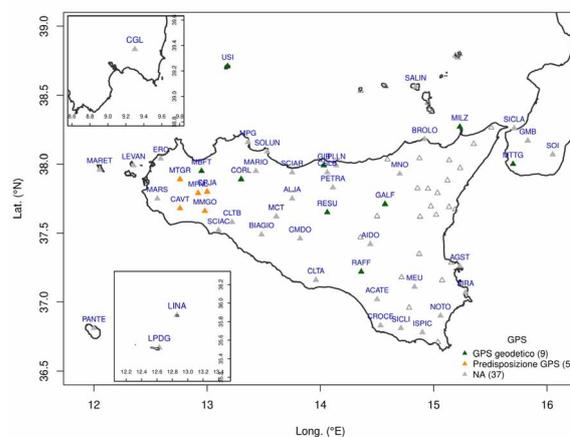


Figura 9 Rete GPS dell'INGV-ONT in Sicilia. I triangoli colorati indicano i siti equipaggiati con GPS geodetico e i siti già predisposti per l'installazione dello strumento nei prossimi anni. NA: non applicabile; strumentazione non presente.

Figure 9 GPS network in Sicily managed by INGV-ONT. The colored triangles indicate the sites equipped with geodetic GPS, and the ones ready for its installation in the next years. NA: not applicable; sensor not present.

Tutte queste caratteristiche assicurano la fattibilità di un progetto di implementazione in tutte le stazioni della RSN. D'altra parte, i risultati degli studi sulla sismogenesi portati avanti negli ultimi decenni a livello mondiale, uniti a semplici considerazioni dimensionali sulla frequenza spazio-temporale dei forti terremoti, permettono immediatamente di concludere che l'acquisizione in continuo e con un'alta densità spaziale in un'area di dimensioni almeno regionali (in senso geodinamico: e.g. l'intero territorio nazionale), sono caratteristiche imprescindibili per una rete di monitoraggio che sia in grado di fornire dati utili da poter correlare alla fase di preparazione dei forti terremoti, pertanto con ricadute potenzialmente operative nel campo dei precursori sismici [Cannelli et al., 2018].

L'installazione di una rete nazionale per la misurazione della concentrazione di radon dal suolo è stata avviata a partire dal 2009. La rete, denominata "IRON", Italian Radon mOnitoring Network [Cannelli et al., 2018, 2020] conta ad oggi 59 stazioni che risultano co-locate nei siti della RSN dell'INGV. I risultati preliminari ottenuti dall'elaborazione delle serie temporali sono molto promettenti sia per quanto riguarda le caratteristiche qualitative generali delle serie temporali acquisite [Siino et al., 2019, 2020a; D'Alessandro et al., 2020a], sia in termini di risultati

scientifici derivati dallo studio: i) della sismicità di fondo in Umbria, ii) della sequenza sismica del Pollino nel 2012 e, soprattutto, iii) della sequenza sismica di Amatrice-Visso-Norcia del 2016 e 2017 [Cannelli et al., 2016; Piersanti et al., 2015, 2016].

A partire dal 2018, l'ONT ha iniziato lo sviluppo della rete radon in Sicilia, con l'installazione dei primi sette radonometri in acquisizione continua e trasmissione in tempo reale (Figura 10). La Figura 11 mostra lo stato della rete radon in Sicilia. Tre dei siti di monitoraggio radon attualmente operativi (ACATE, CROCE e ISPIC) erano già in funzione dal 2003 sotto la gestione del Libero Consorzio Comunale di Ragusa. Questi tre siti, adeguati agli standard della rete IRON nell'ottica di rendere omogenei tutti i dati acquisiti, ne sono oggi parte integrante.



Figura 10 Esempio di stazione multiparametrica: pozzetto con velocimetro, accelerometro e radonometro (a sinistra). Operazioni di sostituzione del sensore e installazione della stazione multiparametrica di ACATE nel marzo 2019 (a destra).

Figure 10 Example of a multiparametric station: a concrete manhole hosts the velocimeter, the accelerometer, and the radonmeter (left-hand side). Maintenance activities and installation of multiparametric station at ACATE site in March, 2019 (right-hand side).

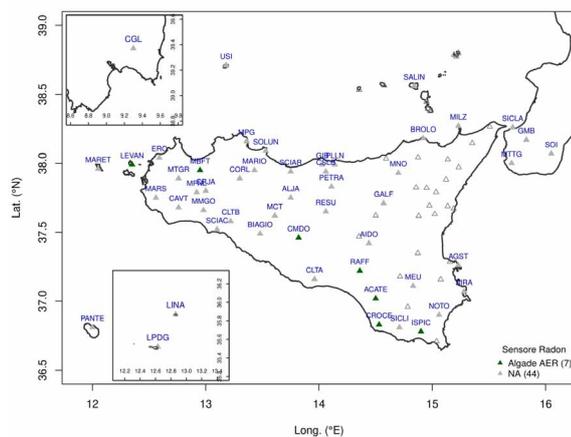


Figura 11 Rete con sensori radon dell'INGV-ONT in Sicilia. I triangoli verdi indicano i siti equipaggiati con radonometri. NA: non applicabile; strumentazione non presente o non ancora installata in siti già programmati.

Figure 11 The radon network managed by INGV-ONT in Sicily. Green triangles indicate the sites equipped with the radon detectors. NA: not applicable; sensor not present or not yet installed in planned sites.

Nell'ambito poi del Progetto PON GRINT si prevede l'installazione di un rilevatore radon presso tutti i siti della RSN, e anche presso siti appositamente individuati in aree di particolare interesse. Infatti, la Sicilia, vista la sua varietà ambientale e geologica, si presenta come un naturale laboratorio per lo sviluppo di una rete di sensori radon a elevata densità.

Agli inizi del 2019, l'ONT ha iniziato inoltre lo sviluppo della rete di riflettori radar (*Corner Reflector*) in Sicilia, con l'installazione dei primi cinque strumenti. Si tratta di dispositivi che riflettono in maniera ottimale le onde elettromagnetiche emesse da alcuni satelliti che implementano la tecnica di rilevamento denominata interferometria SAR (InSAR). Da una ventina d'anni la tecnica InSAR permette di osservare e misurare con grande dettaglio le deformazioni della superficie terrestre su vaste aree. L'interferometria SAR si basa sulla differenza tra due immagini acquisite con un sensore radar in condizioni geometriche identiche ma in due istanti di tempo differenti. La mappa delle differenze di fase presenti tra due immagini SAR viene denominata interferogramma. Tra le varie applicazioni, l'InSAR consente di misurare con precisione la deformazione cosismica e post-sismica e come queste si distribuiscono intorno alla sorgente, fornendo indicazioni circa le dimensioni, il rigetto e la cinematica della sorgente stessa [Besoya et al., 2020]. Tra gli altri importantissimi utilizzi della tecnica dell'interferometria SAR vi è l'osservazione di spostamenti della superficie terrestre dovuti a subsidenza vulcanica o a deformazioni gravitative di versante [Zebker et al., 2000; Hooper et al., 2012; Solari et al., 2020]. Trattandosi di un radar, il sistema può operare sia di giorno sia di notte e in qualsiasi condizione meteorologica, può essere però limitato da condizioni al suolo che incentivino la dispersione del segnale (e.g. acqua, vegetazione, etc.). In alcune situazioni tuttavia, cioè in aree in cui i bersagli (punti di riferimento) sono scarsamente presenti o del tutto assenti, è necessario installare dei riflettori radar, anche noti con il termine inglese di "*Corner Reflector*" (CR).



Figura 12 Uno dei Corner Reflector (per SAR in banda X) già installato dall'ONT in Sicilia (a destra nella foto). La struttura è formata da una base di sostegno in acciaio inox e da un triedro in alluminio perforato, orientabile in funzione della traiettoria di passaggio del satellite.

Figure 12 One of the Corner Reflectors (for band X SAR) installed by ONT in Sicily (right side in the photo). The device is made of a stainless steel support and a perforated aluminum trihedron, which can be oriented according to the trajectory of the satellite.

I riflettori radar, sono delle strutture costituite da tre superfici piane, mutualmente perpendicolari, che sono in grado di riflettere quasi totalmente il segnale SAR (Figura 12). Si tratta quindi di un sistema passivo, ovvero non alimentato da corrente elettrica. Ancorati solidalmente al suolo o a strutture stabili, e opportunamente orientati, i CR costituiscono dei

capisaldi fondamentali in aree che per loro natura hanno una risposta molto rumorosa al segnale SAR. L'utilizzo dei CR è di particolare importanza in molte applicazioni del telerilevamento ambientale, quali la calibrazione radiometrica e la georeferenziazione di misure SAR, nonché la stima delle mappe di deformazioni del suolo mediante tecniche di InSAR [Ferretti et al., 2007; Crosetto et al., 2016]. Grazie alle dimensioni ridotte, alla facile installazione e alla loro bassa tecnologia di realizzazione e di posa in opera, i CR rappresentano un valido strumento per la realizzazione di mappe di velocità e serie temporali di deformazione del suolo. La Figura 13 mostra lo stato attuale della rete di CR in Sicilia.

La presenza del CR nei siti di stazione della RSN è stata verificata confrontando le immagini radar precedenti e successive all'installazione dello stesso. La Figura 14 mostra il confronto tra l'immagine nel visibile e l'immagine radar post-installazione. Il pixel bianco (alta riflettività) indicato dalla freccia gialla corrisponde alla risposta del CR ed è la verifica della corretta orientazione del triedro rispetto alla geometria dell'orbita del satellite.

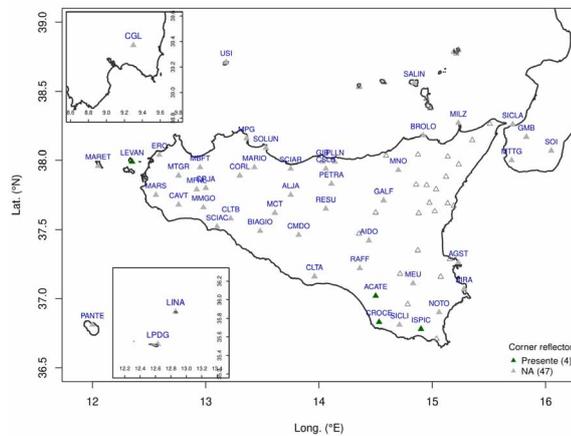


Figura 13 Corner Reflector dell'INGV-ONT in Sicilia. NA: non applicabile; strumentazione non presente o non ancora installata in siti già programmati.

Figure 13 Corner Reflector managed by INGV-ONT in Sicily. NA: not applicable; instrumentation not present or yet installed in planned sites.



Figura 14 Verifica della risposta del Corner Reflector installato a CROCE nelle immagini radar. La freccia gialla indica il pixel corrispondente al Corner Reflector.

Figure 14 Check for the response of the Corner Reflector installed at CROCE into the radar images. The yellow arrow indicates the pixel corresponding to the Corner Reflector.

2.3. Sistemi di alimentazione, acquisizione e trasmissione

Ai fini della sorveglianza sismica, la continuità della trasmissione dei dati dalle singole stazioni alla sala operativa, non è secondaria alla bontà dei dati stessi. Pertanto i sistemi di alimentazione, acquisizione e trasmissione sono di fondamentale importanza al pari del sensore sismico.

Il sistema di alimentazione della strumentazione installata (sensori attivi, acquisitore e sistema di trasmissione) è funzione delle esigenze specifiche di ogni sito (i.e. assorbimento dei sensori e dell'acquisitore). Laddove disponibile, si fa ricorso all'alimentazione della rete di distribuzione elettrica, in alternativa si ricorre a pannelli solari e a batterie appositamente dimensionate. Le Figure 15 e 16 mostrano i sistemi di alimentazione e le tipologie di *datalogger* utilizzate per le stazioni della RSN dell'INGV-ONT in Sicilia. È possibile osservare come la rete sismica in Sicilia sia largamente basata sull'acquisitore Gaia 2 sviluppato presso l'omonimo laboratorio di sviluppo dell'INGV [Rao et al., 2010]. Seguendo un principio di differenziazione si prevede di sostituire buona parte dei *datalogger* Gaia 2 con *datalogger* Gaia 4 (in fase di produzione), con *datalogger* commerciali e con *datalogger* di nuova sperimentazione da parte del personale dell'ONT-Sicilia quale il KRONOS-HR [D'Alessandro and Vitale, 2020].

La sorveglianza sismica dell'intero territorio nazionale avviene presso la Sala di Sorveglianza Sismica e Allerta Tsunami dell'ONT a Roma. Per consentire la localizzazione degli eventi e il calcolo dei parametri ipocentrali, i segnali sismici acquisiti dalla rete devono essere trasmessi in tempo reale e con continuità alla sala stessa. Ogni stazione sismica è dotata di un proprio sistema di trasmissione dati. Qualunque sia il vettore di trasmissione utilizzato, interruzioni del flusso dati sono sempre possibili a seguito di guasti degli apparati di trasmissione ai singoli siti della rete o a seguito di problemi tecnici del *provider* gestore della rete. Per ovviare a questo possibile inconveniente, i vettori di trasmissione dati sono stati diversificati: link satellitari, UMTS, ponti radio, rete cablata, ecc. La soluzione adottata presso ogni sito tiene conto delle esigenze di trasmissione dati e delle condizioni logistiche. In Figura 17 viene schematizzato il sistema attuale di trasmissione dati implementato per le stazioni sismiche della RSN verso la sala operativa dell'INGV a Roma; in Figura 18 invece vengono indicati i sistemi di trasmissione adottati per ogni sito di stazione.

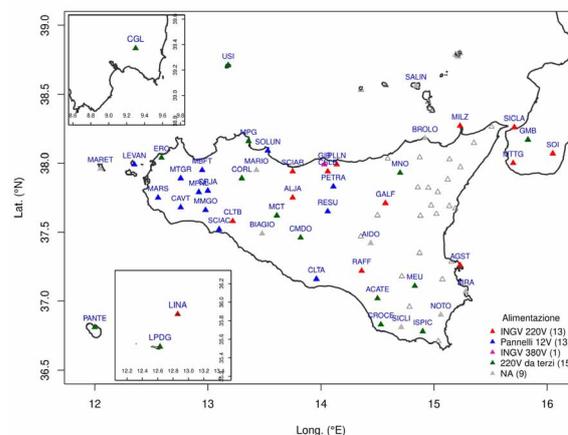


Figura 15 Rete sismica dell'INGV-ONT in Sicilia. I triangoli colorati indicano i vari tipi di alimentazione adottati per ogni sito di stazione. NA: non applicabile; strumentazione non presente in siti già programmati.

Figure 15 Seismic network managed by INGV-ONT in Sicily. The colored triangles indicate the various types of power supply at each site. NA: not applicable; power not yet available in planned sites.

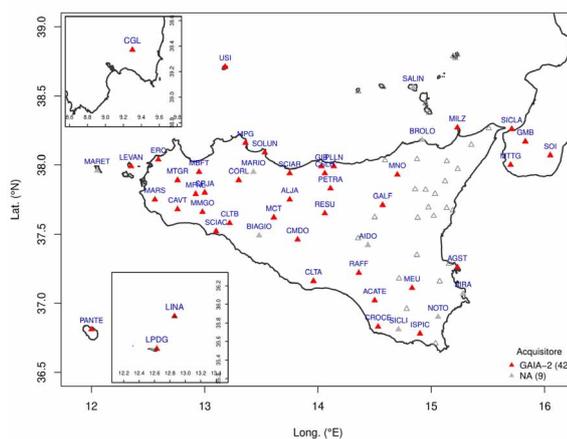


Figura 16 Rete sismica dell'INGV-ONT in Sicilia. I triangoli colorati indicano l'acquisitore adottato per ogni sito di stazione. NA: non applicabile; strumentazione non presente in siti già programmati.

Figure 16 Seismic network managed by INGV-ONT in Sicily. The colored triangles indicate the datalogger used at each site. NA: not applicable; instrumentation not yet installed in planned sites.

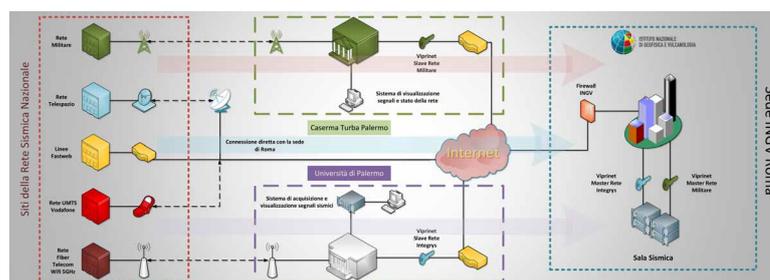


Figura 17 Schema del sistema di trasmissione dati tra le stazioni sismiche della RSN e la sala operativa dell'INGV nella sede di Roma.

Figure 17 Scheme of the data transmission system between the seismic stations of the RSN and the INGV seismic room in the headquarters in Rome.

3. Altre reti

3.1. Reti sperimentali a scala urbana e di edificio

Parallelamente alle attività istituzionali, negli ultimi anni il personale dell'ONT operativo in Sicilia ha avviato delle attività con carattere sperimentale per il monitoraggio sismico a scala urbana e strutturale [D'Alessandro et al., 2019a]. Si tratta di reti a piccola scala e ad alta densità, rese possibili grazie allo sviluppo di sensoristica miniaturizzata a basso costo basata su tecnologia MEMS (*Micro-ElectroMechanical System*) [D'Alessandro et al., 2019b; 2019c].

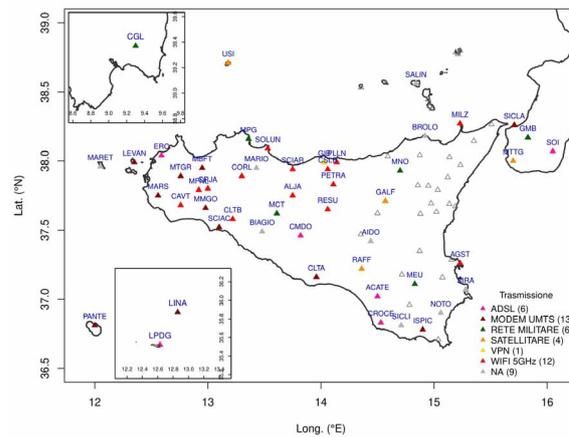


Figura 18 Rete sismica dell'INGV-ONT in Sicilia. I triangoli colorati indicano le varie tipologie di trasmissione dati adottati per ogni sito di stazione. NA: non applicabile; sistema di trasmissione non ancora installato in siti già programmati.

Figure 18 Seismic network managed by INGV-ONT in Sicily. The colored triangles indicate the various types of data transmission system at each site. NA: not applicable; transmission not yet installed in planned sites.

Le reti di monitoraggio a scala urbana sono strumenti adatti a fronteggiare prontamente un'emergenza sismica in quanto permettono di valutare rapidamente e con accuratezza gli effetti di un forte terremoto su un centro abitato. Grazie alla rapida mappatura di dettaglio dello scuotimento generato dal terremoto (*shake map*), e alla formulazione di modelli predittivi di scenari di danno, le reti sismiche urbane possono fornire utili informazioni per una gestione ottimale degli interventi di soccorso da parte delle autorità competenti.

Le reti di monitoraggio a scala di edificio sono essenzialmente finalizzate alla verifica continua dello "stato di salute", inteso come integrità strutturale e capacità di svolgere la propria funzione portante, della costruzione stessa. Quando a essere sottoposto a monitoraggio è un edificio strategico (ospedale, scuola, caserma, municipio, o qualsiasi altra struttura di rilevanza pubblica) o un edificio di interesse storico-artistico, allora il suo monitoraggio diventa essenziale per la salvaguardia delle sue funzioni, del valore culturale e per supportare le azioni di conservazione e di adeguamento sismico.

Queste microreti, denominate anche "Osservatori Sismici Urbani" (OSU), sono in fase di sviluppo nelle città di Catania, Messina, Ragusa, Acireale, Santa Ninfa, Noto e Siracusa, centri abitati che ricadono in aree ad alta pericolosità sismica (Figura 19). In futuro, gli OSU potranno diventare infrastrutture di monitoraggio integrabili con la RSN per potenziarne le capacità di rilevamento oltre alle normali attività di sorveglianza a scala nazionale [D'Alessandro et al., 2019a]. La realizzazione degli OSU è il risultato di diverse fasi di sviluppo che hanno riguardato i test sui sensori MEMS [D'Alessandro and D'Anna, 2013; D'Alessandro et al., 2017], lo sviluppo della stazione di monitoraggio [D'Alessandro et al. 2019b; 2020b] e l'installazione dei prototipi [D'Alessandro et al., 2019a; 2020c].

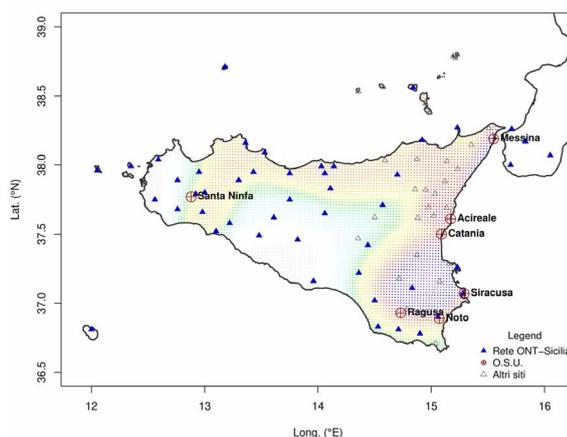


Figura 19 Osservatori Sismici Urbani (OSU) in Sicilia; i triangoli indicano le stazioni della Rete Sismica Nazionale dell'INGV-ONT. I punti colorati sullo sfondo rappresentano la pericolosità sismica in termini di accelerazione massima attesa con valori crescenti dall'azzurro al viola [Stucchi et al., 2004].

Figure 19 Urban Seismic Observatories (OSU) in Sicily; the triangles indicate the stations of the Italian Seismic Network. The colored dots in the background represent the seismic hazard in terms of expected ground acceleration with increasing values from light blue to purple [Stucchi et al., 2004].

3.2. Rete fiduciaria c/o stazioni dei Carabinieri

L'Arma dei Carabinieri (CC), a seguito di un accordo sottoscritto con l'INGV nel 2019, si è impegnata a fornire supporto logistico per l'installazione di stazioni sismiche presso le proprie caserme (Figura 20). Pertanto, l'ONT-Sicilia ha presentato una proposta progettuale alla Protezione Civile Regione Sicilia che nel futuro prevederà la creazione di una rete fiduciaria presso le stazioni dell'Arma dei Carabinieri, con l'obiettivo di costituire un sistema ridondante che possa garantire la sorveglianza sismica anche in caso di importanti sequenze sismiche che possano mettere in crisi l'infrastruttura primaria dell'INGV. La rete fiduciaria dovrà operare con criteri di efficacia e di efficienza tenendo conto delle necessità del monitoraggio sismico e delle finalità di protezione civile.

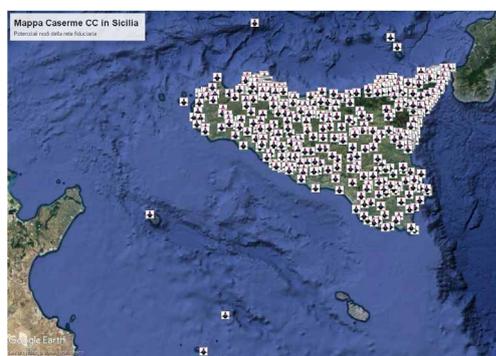


Figura 20 Ubicazione delle caserme dell'Arma dei Carabinieri sul territorio siciliano; queste rappresentano i potenziali siti di stazione della rete fiduciaria.

Figure 20 Location map of the Carabinieri's headquarters in Sicily; these represent the potential sites hosting the fiduciary network.

La rete fiduciaria dovrà avere una adeguata copertura territoriale, estendendosi su tutto il territorio regionale, e ancor di più nelle aree dove insistono le principali strutture sismogenetiche. La qualità della rete dovrà essere di livello sufficiente a garantire la continuità operativa per il Servizio di Sorveglianza Sismica in Sicilia nell'eventualità di gravi calamità naturali tali da compromettere la funzionalità dell'infrastruttura principale (RSN).

4. Considerazioni e conclusioni

La valutazione della capacità di detezione di una rete sismica si basa normalmente su tecniche numeriche che combinano la geometria della rete con altre informazioni a supporto, quali, ad esempio, la distribuzione della sismicità (storica e strumentale), del rumore sismico, delle incertezze sulla stima dei parametri ipocentrali, e anche informazioni di carattere geologico [D'Alessandro et al., 2011; Siino et al., 2020b; Scudero et al., *submitted*]. Tuttavia, per una valutazione semplificata, ma pur sempre rappresentativa, in grado di fornire una valutazione sulla capacità di monitoraggio di una rete si può ricorrere a tecniche di calcolo della densità spaziale. Una delle tecniche più utilizzate a tal fine è la stima *kernel* di densità (*kernel density estimation*). È un metodo che permette di stimare una funzione di densità "smussata" per una popolazione finita. Nel caso di un insieme di punti nel piano, è possibile calcolare una superficie di densità (numero di oggetti per unità di area) omogeneizzata su ogni punto. Questa superficie è il risultato della somma di singole funzioni centrate su ogni dato puntuale (i.e. le stazioni sismiche) e il contributo di ogni singolo punto è quindi esteso nel suo intorno. Quanto questo contributo si estenda è funzione della forma della funzione di *kernel* e della sua larghezza, o "*bandwidth*". Quest'ultima in particolare controlla quanto "smussato" sia il risultato finale: con una *bandwidth* stretta soltanto i punti in prossimità della posizione considerata, o al limite il singolo punto stesso, peseranno sul calcolo della densità, viceversa, con una *bandwidth* larga, anche i punti più distanti contribuiranno alla stima.

In Figura 21 la densità delle stazioni della RSN in Sicilia è stata calcolata con una funzione *kernel* di tipo gaussiana e *bandwidth* secondo la regola di Scott [1992]. La funzione di densità è rappresentata da isolinee che suddividono l'intervallo di valori in 5 classi uguali. Risulta evidente l'evoluzione dell'infrastruttura di monitoraggio in Sicilia: gli interventi di densificazione già effettuati, e quelli programmati, hanno migliorato, e ancor più miglioreranno, la copertura e l'omogeneità della rete stessa (Figura 21).

Gli interventi di *upgrade* già effettuati hanno densificato la rete soprattutto in Sicilia occidentale e sud-orientale, aree sorgenti di importanti terremoti storici (Tabella 1). Gli interventi programmati per la prossima fase di *upgrade* insisteranno per lo più nelle medesime aree; è prevista inoltre l'estensione della rete verso il mare con l'installazione di nuovi siti sulle isole minori (Figura 21 e Figura 22).

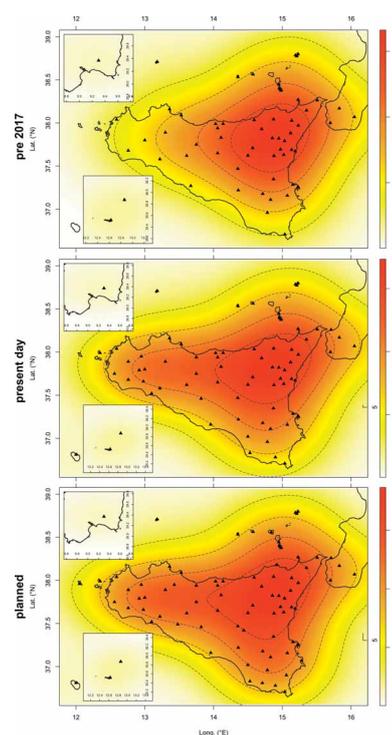
Come detto, la scelta preliminare di un nuovo sito di stazione si basa su criteri geologico-geofisici, su considerazioni riguardo alla geometria di rete già esistente, e in base anche ad esigenze tecnico-logistiche. Inoltre, la valutazione del rumore sismico è una verifica propedeutica essenziale alla selezione definitiva del sito candidato. Si è precedentemente discusso come parte del rumore possa essere attenuata ricorrendo a installazioni tipo *borehole* o *posthole*. Il rumore sismico ambientale è il risultato della sovrapposizione degli effetti di numerose sorgenti con caratteristiche diverse (Tabella 4). Mentre alcune sorgenti sono strettamente legate al sito, altre (quelle a più bassa frequenza) dipendono da variabili geologiche e geografiche a grande scala e pertanto possono essere modellabili. In futuro, per la scelta di un nuovo sito, si potrebbero fare valutazioni preliminari sulla base di mappe della distribuzione del livello di rumore o ricorrendo ad apposite relazioni empiriche [D'Alessandro et al., *submitted*]. La Figura 23 mostra la distribuzione della potenza media del rumore sismico nelle quattro bande di Tabella 4. Le mappe

sono state calcolate interpolando i valori di *Power Spectral Density*, calcolati con il metodo di McNamara and Buland [2004], per i siti equipaggiati con sensore di periodo >40s nel periodo 2015-2018. Risulta immediatamente evidente un elevato livello di rumore nelle bande II e III riconducibile alla presenza dell'edificio vulcanico attivo dell'Etna; viceversa i rilievi montuosi della Sicilia settentrionale e sud-orientale sono generalmente settori a più basso livello di rumore. Le possibili frontiere nell'ambito della sismologia e del monitoraggio sismico sono la ricerca di precursori sismici (geofisici, geochimici, o altri) e lo sviluppo di sistemi di allerta rapida (*Early Warning System*). La possibilità di approfondire questi temi di ricerca e di sviluppo tecnologico passa attraverso l'ottimizzazione dei sistemi di monitoraggio esistenti. L'INGV dispone di un patrimonio infrastrutturale di reti di monitoraggio di assoluta rilevanza e tale patrimonio deve essere costantemente ammodernato, valorizzato e sfruttato per il perseguimento degli obiettivi della ricerca e della sorveglianza sismica. Per poter estendere il potenziale informativo di tali reti ai processi geologici e geofisici correlati al fenomeno sismico, senza tralasciare la fase pre-sismica e la fase post-sismica, è necessario implementare una rete di monitoraggio il più possibile multiparametrico a scala nazionale, o quanto meno in alcune macroregioni ritenute di prioritario interesse sulla base del rischio sismico associato. Soltanto la possibilità di disporre di lunghe serie temporali di osservazioni multiparametriche ad alta risoluzione consentirà nel futuro di verificare teorie e modelli oggi ampiamente proposti in letteratura ma ancora largamente da validare. L'approccio multiparametrico è stato già proposto dall'INGV per reti di monitoraggio sperimentale a piccola scala in zone di particolare interesse [e.g. Chiaraluce et al., 2014]. La rete che l'ONT sta sviluppando in Sicilia è il primo tentativo di estendere l'approccio multiparametrico a una scala regionale.

Si richiama inoltre l'importanza di garantire un livello di ridondanza dei sistemi di monitoraggio: sia duplicando alcuni siti strategici, che diversificando i sistemi di alimentazione e di trasmissione nei vari siti di stazione. Infine, si rimarca il valore dello sviluppo di sistemi di monitoraggio a piccola scala (urbana e di edificio) e secondo criteri di efficienza (*low-cost* e *low-power*) per la realizzazione di applicazioni specifiche quali la valutazione rapida dei danni, le stime di intensità sismica e l'implementazione di sistemi di *Early Warning* sismici in situ [D'Alessandro et al., 2019a, 2020b].

Figura 21 Mappe di densità della RSN in Sicilia prima (in alto) e dopo (al centro) gli interventi di upgrade effettuati nel periodo 2017-2019; mappa della copertura attesa dopo la prossima fase di upgrade (in basso). Le mappe sono calcolate con una funzione kernel di tipo gaussiano e bandwidth secondo la regola di Scott [1992]; le isolinee tratteggiate suddividono l'intervallo di densità in cinque classi uguali.

Figure 21 Density maps of the RSN in Sicily before (top) and after (centre) the upgrade carried out during 2017-2019, and map of the expected network coverage after next upgrade step (bottom). The maps are calculated with a gaussian kernel function and the bandwidth according to Scott [1992]; the dashed lines divide the density interval into five equally-spaced classes.



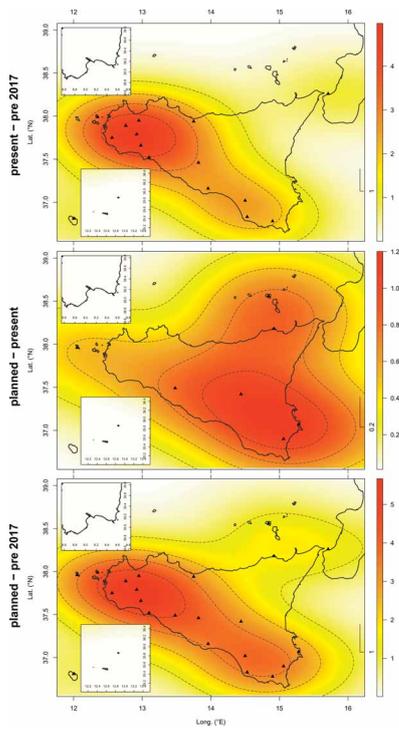


Figura 22 Mappe della differenza di densità della RSN in Sicilia a seguito degli interventi già effettuati (riga in alto), a seguito degli interventi in previsione (riga centrale) e cumulando le due fasi di upgrade (riga in basso). Le mappe sono calcolate con una funzione kernel di tipo gaussiana e bandwidth secondo la regola di Scott [1992]. Le isolinee tratteggiate suddividono l'intervallo di densità in cinque classi uguali.

Figure 22 Difference density maps of the RSN in Sicily after the upgrade actions already performed (upper row), after planned actions (central row), and summing both the upgrade phases (lower row). The maps are calculated with a gaussian kernel function and bandwidth according to Scott [1992]; the dashed lines divide the density interval into five equally-spaced classes.

	Banda	Limiti (Hz)	Sorgente tipica
I	Frequenze molto basse	0.025-0.12	Perturbazioni meteorologiche a grande scala
II	Frequenze basse	0.12-1.2	Impatto delle onde sulla costa
III	Frequenze intermedie	1.2-10	Fenomeni meteorologici locali
IV	Alte frequenze	10-30	Sorgenti antropiche

Tabella 4 Le quattro bande di frequenza in cui sono suddivise le mappe di rumore sismico in Figura 23; le sorgenti tipiche per ogni banda sono tratte da Bonnefoy-Claudet et al. [2006].

Table 4 The four frequency bands for the background seismic noise as shown in of Figure 23; the typical sources for each band are reported after Bonnefoy-Claudet et al. [2006].

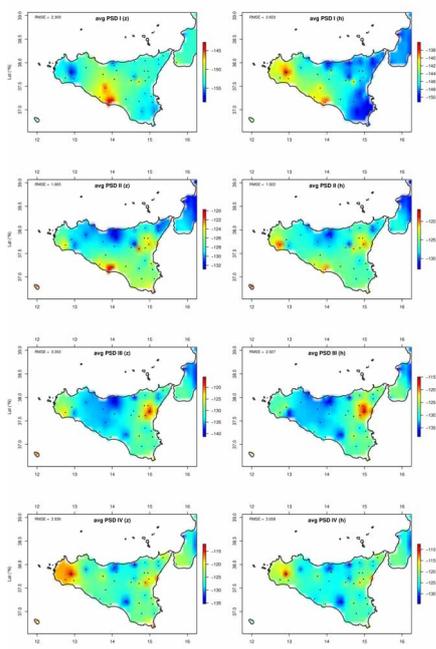


Figura 23 Distribuzione della potenza media del rumore sismico nelle quattro bande di Tabella 4 mostrate per la componente verticale (colonna a sinistra) e orizzontale (colonna a destra). I valori sono in dB (m/s²)²/Hz.

Figure 23 Distribution of the average seismic noise power in the four bands of Table 4 for the vertical (left column) and horizontal (right column) components. Values are in in dB (m/s²)²/Hz.

Bibliografia

- AA. VV., (2020). Progetto "Sale Operative Integrate e Reti di monitoraggio del futuro: l'INGV 2.0". Report finale. Editors: L. Margheriti, F. Cirillo, F. Guglielmino, M. Moretti. Misc. INGV, 57: 1186, <https://doi.org/10.13127/misc/57>
- Amato A., and Mele F., (2008). Performance of the INGV National Seismic Network from 1997 to 2007. *Annals of Geophysics*, 51(2/3), 417-431.
- Besoya M., Govil H., and Bhaumik P., (2020). A review on surface deformation evaluation using multitemporal SAR interferometry techniques. *Spatial Information Research*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s41324-020-00344-8>
- Bonnefoy-Claudet S., Cotton F., and Bard P.Y., (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79(3-4), 205-227.
- Cannelli V., Galli G., Rao S., Farroni S., Salvaterra L., and Piersanti A., (2020). La rete di monitoraggio radon IRON all'interno del Progetto "S.O.I.R. monitoraggio futuro": integrazione con la Rete Sismica Nazionale. In AA. VV., (2020). Progetto "Sale Operative Integrate e Reti di monitoraggio del futuro: l'INGV 2.0". Report finale. Editors: L. Margheriti, F. Cirillo, F. Guglielmino, M. Moretti. Misc. INGV, 57: 1-186, <https://doi.org/10.13127/misc/57>, 86-90.
- Cannelli V., Piersanti A., Galli G., and Melini D., (2018). Italian Radon mOnitoring Network (IRON): A permanent network for near real-time monitoring of soil radon emission in Italy. *Annals of Geophysics*, 61(4), SE444, <https://doi.org/10.4401/ag-7604>
- Cannelli V., Piersanti A., Spagnuolo E., and Galli G., (2016). Preliminary analysis of radon time series before the M_L=6 Amatrice earthquake: Possible implications for fluid migration. *Annals of Geophysics*, 59 (Fast Track 5), 1-7.
- Chiaraluce L., Amato A., Carannante S., Castelli V., Cattaneo M., Cocco M., Collettini C., D'Alema E., Di Stefano R., Latorre D., Marzorati S., Mirabella F., Monachesi G., Piccinini D., Nardi A., Piersanti A., Stramondo S., and Valoroso L., (2014). The Alto Tiberina Near Fault Observatory (northern Apennines, Italy). *Annals of Geophysics*, 57(3), S0327, doi:10.4401/ag6426.
- Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., and Crippa B., (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89.
- Crowley H., Colombi M., Borzi B., Faravelli M., Onida M., Lopez M., Polli D., Meroni F. and Pinho R., (2009). A comparison of seismic risk maps for Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(1), 149-180.
- D'Alessandro A., Greco L., Scudero S., and Lauciani V. Spectral characterization and spatiotemporal variability of the background seismic noise in Italy. *Earth and Space Science*, *submitted*.
- D'Alessandro A., and Vitale G., (2020). KRONOS: A low-cost data-logger for seismological applications. 24th IMEKO TC4 International Symposium and 22nd International Workshop on ADC and DAC Modelling and Testing, IMEKO TC-4 2020, September 14-16, 2020, Palermo, Italy, 446-450.
- D'Alessandro A., Scudero S., Siino M., Alessandro G., and Mineo R., (2020a). Long-term monitoring and characterization of soil radon emission in a seismically active area. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(7), e2020GC009061.
- D'Alessandro A., Scudero S., Vitale G., Di Beneditto A., and Lo Bosco G.L., (2020b). Optimization of Low-Cost Monitoring Systems for On-Site Earthquake Early-Warning of Critical Infrastructures. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12250 LNCS, 2020, 963-975. doi:10.1007/978-3-030-58802-1_69
- D'Alessandro A., Vitale G., and Scudero S., (2020c). MEMS-based system for structural health

- monitoring and earthquake observation in Sicily. 10th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2020), July 6-9, 2020, Palermo, Italy. In P. Rizzo and A. Milazzo (Eds.): EWSHM 2020, Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE), 127, 1-7, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64594-6_10
- D'Alessandro A., Costanzo A., Ladina C., Buongiorno F., Cattaneo M., Falcone S., La Piana C., Marzorati S., Scudero S., Vitale G., Stramondo S., and Doglioni C., (2019a). Urban seismic networks, structural health and cultural heritage monitoring: The National Earthquakes Observatory (INGV, Italy) experience. *Frontiers in Built Environment*, 5, 127. doi:10.3389/fbuil.2019.00127
- D'Alessandro A., Greco L., Scudero S., Siino M., Vitale G., D'Anna R., Gangi F., Nicolosi D., Passafiume G., Speciale S., Catania M., Cosenza P., Foresta Martin L., Patanè D., Martorana R., Rao S., Stramondo S., (2019b). Sviluppo di una stazione sismica low-cost basata su tecnologia MEMS, *Quaderni di Geofisica*, 153, 60pp. <https://doi.org/10.13127/qdg/153>
- D'Alessandro A., Scudero S., and Vitale G., (2019c). A Review of the Capacitive MEMS for Seismology. *Sensors*, 19, 1-22. <https://doi.org/10.3390/s19143093>
- D'Alessandro A., Vitale G., Scudero S., D'Anna R., Costanza A., Fagiolini A., Greco L., (2017). Characterization of MEMS Accelerometer self-noise by means of PSD and Allan Variance analysis, 7th IEEE International Workshop on Advances in Sensor and Interface, June 15-16, 2017, Vieste, Italy, 6. doi:10.1109/IWASI.2017.7974238.
- D'Alessandro A., (2016). Tiny accelerometers create Europe's first urban seismic network, *Eos (United States)* 97(1), 16-20. doi:10.1029/2016eo048403
- D'Alessandro A., (2014). Monitoring of earthquakes using MEMS sensors, *Current Science*, 107(5), 2014, 733-734. <http://jstor.org/stable/i24105516>
- D'Alessandro A., Guerra I., D'Anna G., Gervasi A., Harabaglia P., Luzio D., and Stellato G., (2014). Integration of onshore and offshore seismic arrays to study the seismicity of the Calabrian Region: A two steps automatic procedure for the identification of the best stations geometry. *Advances in Geosciences*, 36, 69-75. doi:10.5194/adgeo-36-69-2014
- D'Alessandro A., and D'Anna G., (2013). Suitability of low-cost three-axis MEMS accelerometers in strong-motion seismology: Tests on the LIS331DLH (iPhone) accelerometer. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(5), 2906-2913.
- D'Alessandro A., Gervasi A., and Guerra I., (2013a). Evolution and strengthening of the Calabrian Regional Seismic Network. *Advances in Geosciences*, 36, 11-16. doi:10.5194/adgeo-36-11-2013.
- D'Alessandro A., Scarfi L., Scaltrito A., Di Prima S., and Rapisarda S., (2013b). Planning the improvement of a seismic network for monitoring active volcanic areas: The experience on Mt. Etna. *Advances in Geosciences*, 36, 39-47. doi:10.5194/adgeo-36-39-2013
- D'Alessandro A., Luzio D., D'Anna G., and Mangano G., (2011). Seismic network evaluation through simulation: An application to the Italian National Seismic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(3), 1213-1232.
- DISS Working Group, (2018). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1
- Ferretti A., Savio G., Barzaghi R., Borghi A., Musazzi S., Novali F., Prati C., and Rocca F., (2007). Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5), 1142-1153.
- Ghosh D., Deb A., and Sengupta R., (2009). Anomalous radon emission as precursor of earthquake. *Journal of Applied Geophysics*, 69(2), 67-81.
- Greig W., Spriggs N., and Bainbridge G., (2014). Comparison study between vault seismometers and posthole seismometer. *Proceedings of the 2nd European Conference of Earthquake*

Engineering and Seismology (ECEES), Istanbul, 25-29 August 2014, 1, 7429. ISBN: 978-1-5108-1021-1.

- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattori G., and Valensise G., (2018). CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), <http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/>
- Hayman M.B., (2014). Downhole Seismometers. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, 1-22.
- Hooper A., Bekaert D., Spaans K., and Arikani M., (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514-517, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- Hutt C.R., Ringler A.T., and Gee LS., (2017). Broadband Seismic Noise Attenuation versus Depth at the Albuquerque Seismological Laboratory. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3), 1402-1412.
- INGV Seismological Data Centre, (2006). Rete Sismica Nazionale (RSN). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Italy. <https://doi.org/10.13127/SD/X0FXNH7QFY>
- Margheriti L., et al., (2021). Seismic Surveillance and Earthquake Monitoring in Italy. *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220200380>
- McNamara D.E., and Buland R.P., (2004). Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(4), 1517-1527.
- Michellini A., Margheriti L., Cattaneo M., Cecere G., D'Anna G., Delladi A., Moretti M., Pintore S., Amato A., Basili A., Bono A., Casale P., Danecek P., Demartin M., Faenza L., Lauciani V., Mandiello A.G., Marchetti A., Marocco C., Mazza S., Mele F.M., Nardi A., Nostro C., Pignone M., Quintiliani M., Rao S., Scognamiglio L., and Selvaggi G., (2016). The Italian National Seismic Network and the earthquake and tsunami monitoring and surveillance systems. *Advances in Geosciences*, 43, 31-38. <http://doi.org/10.5194/adgeo-43-31-2016>
- Morales-Simfors N., Wyss R.A., and Bundschuh J., (2020). Recent progress in radon-based monitoring as seismic and volcanic precursor: A critical review. *Critical reviews in Environmental Science and Technology*, 50(10), 979-1012.
- Palano M., Ferranti L., Monaco C., Mattia M., Aloisi M., Bruno V., Cannavò F., and Siligato G., (2012). GPS velocity and strain fields in Sicily and southern Calabria, Italy: updated geodetic constraints on tectonic block interaction in the central Mediterranean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117, B07401. doi:10.1029/2012JB009254, 2012
- Piersanti A., Cannelli V., and Galli G., (2016). The Pollino 2012 seismic sequence: Clues from continuous radon monitoring. *Solid Earth*, 7(5), 1303-1316.
- Piersanti A., Cannelli V., and Galli G., (2015). Long term continuous radon monitoring in a seismically active area. *Annals of Geophysics*, 58(4), S0437, 1-16. doi:<https://doi.org/10.4401/ag-6735>
- Pondrelli S., Di Luccio F., Scognamiglio L., Molinari I., Salimbeni S., D'Alessandro A., and Danecek P., (2020). The First Very Broadband Mediterranean Network: 30 Yr of Data and Seismological Research. *Seismological Research Letters*, 81(2A), 787-802, doi:10.1785/0220190195.
- Protezione Civile, Presidenza del Consiglio dei Ministri, (2013). Censimento dei centri storici esposti al rischio sismico. <http://www.protezionecivile.gov.it/attivita-rischi/rischio-sismico/attivita/censimento-centri-storici>
- Rao S., Bignami C., Cannelli V., Cavaliere A., D'Alema E., D'Alessandro A., D'Anna R., Delladio A., Di Gangi F., Farroni S., Galli G., Giovani L., Iannarelli M., Martelli L., Massa M., Massucci A., Moretti M., Pantaleo D., Passafiume G., Perfetti M., Piccolini U., Piersanti A., Pietrantonio G., Salvaterra L., Scudero S., Speciale S., and Vitale G., (2020). La Rete multiparametrica dell'Osservatorio Nazionale Terremoti. In AA. VV., (2020). Progetto "Sale Operative Integrate e Reti di monitoraggio del futuro: l'INGV 2.0". Report finale. Editors: L. Margheriti, F. Cirillo, F. Guglielmino, M. Moretti. *Misc. INGV*, 57: 1-186. <https://doi.org/10.13127/misc/57>, 64-68.

- Rao S., Salvaterra L. and Acerra C., (2010). Software per l'installazione e la configurazione della stazione sismica GAIA2. Rapporti Tecnici INGV, 130, 50pp.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., and Gasperini P. (eds), (2016). CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. <http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>
- Scott D.W., (1992). Multivariate density estimation: Theory, practice and visualization. The Course of Dimensionality and Dimension Reduction, John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9780470316849
- Scudero S., Marcocci C., and D'Alessandro A. Insights on the capability of seismic networks from the analysis of the location uncertainties: the case of the Italian National Seismic Network. *Journal of Seismology*, *submitted*.
- Scudero S., D'Alessandro A., Greco L., and Vitale G., (2018). MEMS technology in seismology: A short review. IEEE International Conference on Environmental Engineering, EE 2018, March 12-14, Milan, Italy, 1-5. doi:10.1109/EE1.2018.8385252
- Serpelloni E., Vannucci G., Pondrelli S., Argnani A., Casula G., Anzide, M., Baldi P., and Gasperini P., (2007). Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophysical Journal International*, 169, 1180-1200. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03367.x
- SgROI T., de Nardis R., and Lavecchia G., (2012). Crustal structure and seismotectonics of central Sicily (southern Italy): new constraints from instrumental seismicity. *Geophysical Journal International*, 189(3), 1237-1252.
- Siino M., Scudero S., and D'Alessandro A., (2020a). Stochastic models for radon daily time series: seasonality, stationarity, and long-range memory detection. *Frontiers in Earth Science*, 8:575001. doi:10.3389/feart.2020.575001
- Siino M., Scudero S., Greco L., and D'Alessandro A., (2020b). Spatial analysis for an evaluation of monitoring networks: examples from the Italian seismic and accelerometric networks. *Journal of Seismology*, 24(6), 1045-1061.
- Siino M., Scudero S., Cannelli V., Piersanti A., and D'Alessandro A., (2019). Multiple seasonality in soil radon time series. *Scientific reports*, 9(1), 1-13.
- Siino M., D'Alessandro A., Adelfio G., Scudero S., and Chiodi M., (2018). Multiscale processes to describe the eastern Sicily seismic sequences. *Annals of Geophysics*, 61(2), SE228. doi:10.441/ag-7711
- Solari L., Del Soldato M., Raspini F., Barra A., Bianchini S., Confuorto P., Casagli N., and Crosetto M., (2020). Review of satellite interferometry for landslide detection in Italy. *Remote Sensing*, 12(8), 1351. <https://doi.org/10.3390/rs12081351>
- Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., Akinci A., Faccioli E., Gasperini P., Malagnini L., and Valensise G., (2004). Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale MPS04 [Data set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/sh/mps04/ag>
- Toscano M., Messina D., Cirone S., Pappalardo A., and Civilletti V., (2013). Rapporto sull'abusivismo edilizio e sullo stato di definizione delle istanze di sanatoria edilizia. Regione Siciliana – Assessorato Territorio e Ambiente Dipartimento di Urbanistica, Osservatorio Regionale delle violazioni edilizie e delle sanatorie. <https://docplayer.it/68568663-Rapporto-sull-abusivismo-edilizio-e-sullo-stato-di-definizione-delle-istanze-di-sanatoria-edilizia.html>
- Vitale G., Greco L., D'Alessandro A., and Scudero S., (2018). Bandwidth extension of a 4.5 Hz geophone for seismic monitoring purpose, 2018 IEEE International Conference on Environmental Engineering, EE 2018, March 12-14, Milan, Italy, 1-5. doi:10.1109/EE1.2018.8385253
- Withers M.M., Aster R.C., Young C.J., and Chael E.P., (1996). High-frequency analysis of seismic background noise as a function of wind speed and shallow depth. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(5), 1507-1515.

- Woith H., (2015). Radon earthquake precursor: A short review. *The European Physical Journal Special Topics*, 224(4), 611-627.
- Zebker H.A., Amelung F., and Jonsson S., (2000). Remote sensing of volcano surface and internal processes using radar interferometry. In *Remote sensing of active volcanism*, Geophysical Monograph Series 116, 179-205. Eds Mougini-Mark, P.J., Crisp, J.A., Fink, J.H. <https://doi.org/10.1029/GM116p0179>

APPENDICE

ID	Sigla	Nome	Lat.	Lon.	Quota	Note	Velocimetro	Acquisit.	Trasmissione	Alimentazione	Accelerom.	GPS	Rn	C. R.
1	ACATE	Acate	37.02	14.50	210	post-2017	LE3D-5s	GAIA2	ADSL	Provincia RG 220V	Titan		yes	yes
2	AGST	Augusta	37.26	15.23	70	pre-2017	LE3D-5s	GAIA2	WIFI 5GHz	INGV 220V				
3	ALJA	Alia	37.75	13.75	700	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	WIFI 5GHz	INGV 220V				
4	CAVT	Castelvetrano	37.68	12.76	158	pre-2017	CMG-3EX-120s	GAIA2	WIFI 5GHz	Pannelli 12V				
5	CGL	Punta Serpeddi	39.37	9.30	1050	pre-2017	LE3D-20s	GAIA2	Rete militare	Militari 220V				
6	CLTA	Licata	37.16	13.96	246	post-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	Modem UMTS	Pannelli 12V				
7	CLTB	Caltabellotta (MedNet)	37.58	13.22	949	pre-2017	TRILLIUM-120s	GAIA2	WIFI 5GHz	INGV 220V				
8	CMDO	Montedoro	37.46	13.82	571	post-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	ADSL	Comune 220V			yes	
9	CORL	Corleone	37.89	13.30	660	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	WIFI 5GHz	Curia 220V		yes		
10	CRJA	Costa Raja	37.80	13.00	560	pre-2017	CMG-3EX-120s	GAIA2	WIFI 5GHz	Pannelli 12V				
11	CROCE	Santa Croce Camerina	36.83	14.53	112	post-2017	LE3D-20s	GAIA2	ADSL	Provincia RG 220V	Titan		yes	yes
12	CSLB	Castelbuono	37.94	14.06	583	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	WIFI 5GHz	INGV 220V				
13	ERC	Erice	38.04	12.59	776	pre-2017	LE3D-5s	GAIA2	ADSL	Majorana 220V				
14	FAVR	Favara	37.27	13.67	289	pre-2017, fino al 2019								
15	GALF	Gagliano Castelferrato	37.71	14.57	740	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	Satellitare	INGV 220V	Episensor	yes		
16	GIB	Gibilmanna	37.99	14.03	1020	pre-2017	TRILLIUM-120s	GAIA2	VPN	INGV 380V		yes		
17	GMB	Gambarie	38.17	15.83	1300	pre-2017	LE3D-20s	GAIA2	Rete militare	Militari 200V				
18	ISPIC	Ispica	36.78	14.90	260	post-2017	LE3D-5s	GAIA2	Modem UMTS	Provincia RG 220V	Titan		yes	yes
19	LEVAN	Levanzo, Isola di	37.99	12.35	73	post-2017	LE3D-1s	GAIA2	Modem UMTS	Pannelli 12V			yes	yes
20	LINA	Linosa, Isola di	35.87	12.86	63	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	Modem UMTS	INGV 220V				
21	LPDG	Lampedusa	35.52	12.63	50	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	ADSL	ENEA 220V				
22	MARS	Marsala	37.75	12.56	65	nel 2017	LE3D-5s	GAIA2	Modem UMTS	Pannelli 12V				
23	MBFT	Monte Bonifato	37.95	12.95	520	post-2017	TRILLIUM-120s	GAIA2	Modem UMTS	Pannelli 12V	Episensor	yes	yes	
24	MCT	Monte Cammarata	37.62	13.61	1558	pre-2017	LE3D-20s	GAIA2	Rete militare	Militari 220V				
25	MEU	Monte Lauro	37.11	14.83	986	pre-2017	L-4C-1s	GAIA2	Rete militare	Militari 220V				
26	MFNL	Monte Finestrelle	37.79	12.92	677	nel 2017	CMG-3EX-120s	GAIA2	WIFI 5GHz	Pannelli 12V				
27	MILZ	Milazzo	38.27	15.23	0	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	WIFI 5GHz	INGV 220V		yes		
28	MMGO	Monte Magaggiaro	37.66	12.98	397	nel 2017	CMG-3EX-120s	GAIA2	Modem UMTS	Pannelli 12V				
29	MNO	Monte Soro	37.93	14.70	1830	pre-2017	LE3D-5s	GAIA2	Rete militare	Militari 220V				
30	MPG	Monte Pellegrino	38.16	13.36	600	pre-2017	LE3D-20s	GAIA2	Rete militare	Militari 220V				
31	MTGR	Montagna Grande	37.89	12.76	751	post-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	Modem UMTS	Pannelli 12V				
32	MTTG	Motta San Giovanni	38.00	15.70	484	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	Satellitare	INGV 220V		yes		
33	PANTE	Pantelleria	36.81	12.00	111	post-2017	LE3D-20s	GAIA2	Modem UMTS	Curia 220V				
34	PETRA	Petralia Soprana	37.83	14.11	1547	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	WIFI 5GHz	Pannelli 12V				
35	PLLN	Pollina	37.99	14.14	787	pre-2017	LE3D-5s	GAIA2	WIFI 5GHz	INGV 220V				

36	RAFF	Raffo Rosso	37.22	14.36	310	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	Satellitare	INGV 220V		yes	yes	
37	RESU	Resuttano	37.65	14.06	785	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	WIFI 5GHz	Pannelli 12V		yes		
38	SCIAC	Sciacca	37.52	13.10	181	post-2017	LE3D-20s	GAIA2	Modem UMTS	Pannelli 12V				
39	SCIAR	Sciara	37.94	13.75	490	post-2017	TRILLIUM-120s	GAIA2	WIFI 5GHz	INGV 220V	Episensor			
40	SICLA	Scilla	38.26	15.71	10	post-2017	LE3D-5s	GAIA2	Modem UMTS	INGV 220V				
41	SOI	Samo	38.07	16.05	305	pre-2017	LE3D-5s	GAIA2	ADSL	INGV 220V				
42	SOLUN	Solunto	38.09	13.53	190	nel 2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	WIFI 5GHz	Pannelli 12V				
43	USI	Ustica	38.71	13.18	285	pre-2017	TRILLIUM-40s	GAIA2	Satellitare	Aeronautica 220V		yes		

Tabella A1 Elenco dei siti di stazione della RSN dell'INGV-ONT in Sicilia (al 31/12/2020). Il sito FAVR, non più attivo, è stato considerato esclusivamente nelle mappe di densità delle Figure 21 e 22 per il periodo in cui è stato attivo.

Table A1 List of the sites of the INGV seismic network in Sicily (until 31/12/2020). The site FAVR, no longer active, has been only considered in the density maps of Figg. 21 and 22 for its operating period.

ID	Sigla	Nome	Lat.	Lon.	Quota
1	AIDO	Aidone	37.42	14.44	NA
2	BIAGIO	San Biagio Platani	37.49	13.48	NA
3	BROLO	Brolo	38.18	14.92	NA
4	MARET	Marettimo	37.96	12.05	18
5	MARIO	Marineo	37.95	13.43	683
6	NOTO	Noto	36.90	15.06	NA
7	SALIN	Salina, Isola di	38.56	14.84	NA
8	SICLI	Scicli	36.81	14.71	145
9	SIRA	Siracusa	37.07	15.28	NA

Tabella A2 Elenco dei siti di stazione pianificati per l'estensione della RSN dell'INGV-ONT in Sicilia.

Table A2 List of the sites planned for the extension of the INGV seismic network in Sicily.

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

http://istituto.ingv.it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Francesca DI STEFANO, Rossella CELI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico e impaginazione

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

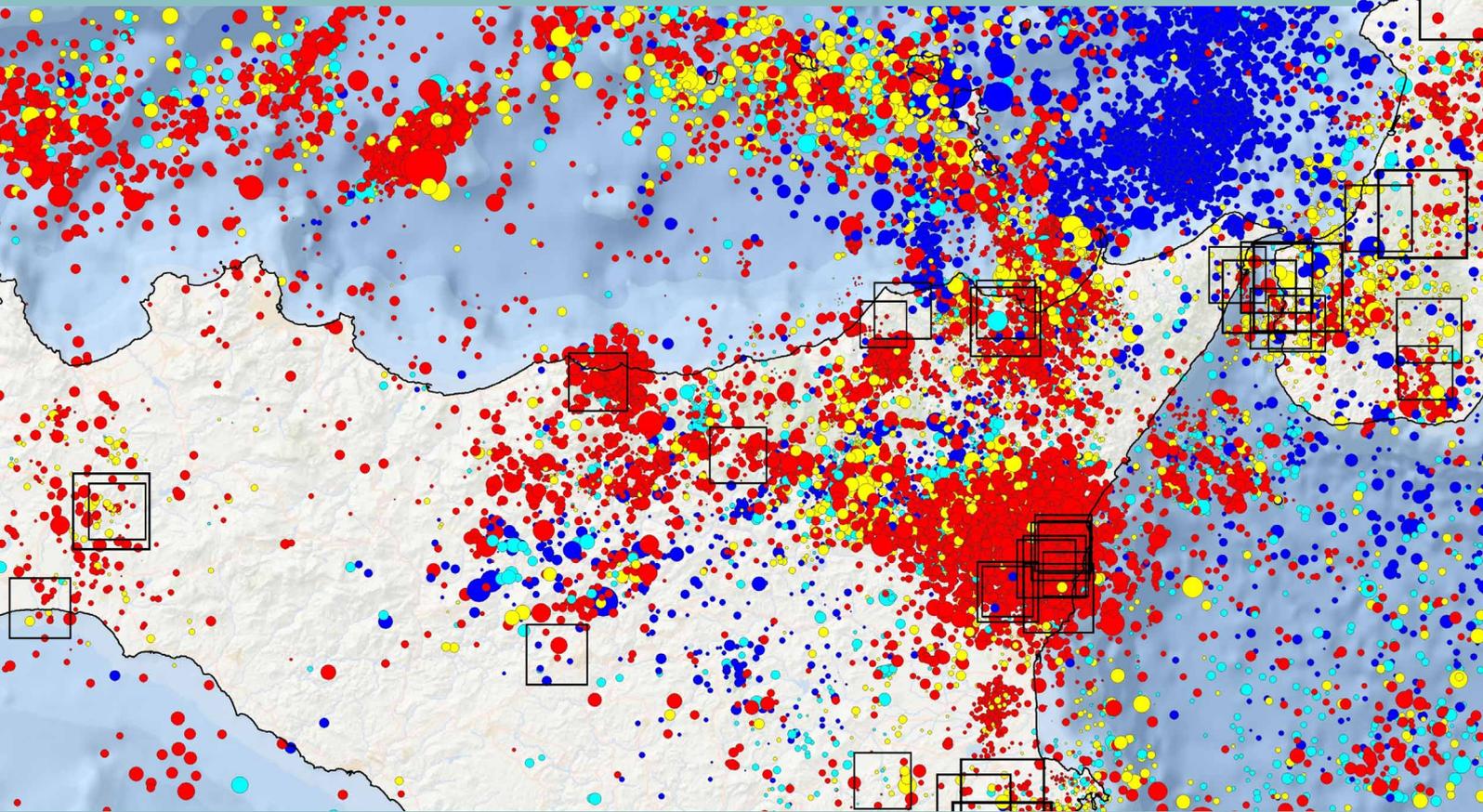
©2021

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

