

1.4 Rete di monitoraggio sismica integrata

Le stazioni sismiche che compongono la rete integrata di monitoraggio dell'area in esame sono il risultato dell'unione di una parte della Rete Sismica Nazionale (RSN), gestita da INGV, e della rete microsismica "Minerbio Stoccaggio", gestita dal Concessionario.

In particolare, per la RSN sono state selezionate tutte le stazioni con distanza da Minerbio entro un raggio di 55 km: entro tale distanza ricadono 13 stazioni sismiche.

Inoltre, considerando che entro tale distanza erano presenti due stazioni sismiche INGV dedicate al progetto AlpArray (AlpArray, 2016), di cui l'istituto è membro, è stato chiesto ed ottenuto il permesso di utilizzare i dati di queste due stazioni, utili anche per meglio definire la localizzazione degli eventi e per il calcolo della magnitudo durante il progetto di sperimentazione degli ILG.

Queste 2 stazioni sono equipaggiate con sensori velocimetrici very broad band (Trillium-120C, prodotto da Nanometrics) con risposta piatta in velocità da 120s a oltre 100 Hz, permettendo quindi di effettuare un confronto con i sensori con frequenza propria 1 Hz e dimostrare come anche i sensori a 1 Hz siano assolutamente adatti agli scopi del monitoraggio sismico dei siti di stoccaggio gas.

Come descritto nel precedente paragrafo e illustrato in Fig. 8b, all'inizio del progetto le stazioni delle rete microsismica "Minerbio Stoccaggio", tutte installate nell'area del Dominio Interno di rilevazione, erano 4.

Negli ILG (par. 3 pag. 8) *"si raccomanda che le nuove infrastrutture di monitoraggio siano progettate anche tenendo in considerazione un principio di valorizzazione dell'esistente, quindi, di prevedere, a seguito di opportuna valutazione, l'eventuale adeguamento di infrastrutture già operanti per ottenere le prestazioni richieste"*.

La parte iniziale della Convenzione è stata dedicata alla progettazione della rete sismica, avendo ben presente il concetto di valorizzazione dell'esistente.

Le 4 stazioni già installate rispondono appieno, a partire dal punto di vista del posizionamento, alle indicazioni previste negli ILG. La stazione centrale (MI04) è posizionata al centro del campo di stoccaggio e, opportunamente, in un pozzetto a 100 m per ridurre il disturbo antropico.

Nel corso del progetto il sito MI04 è stato utilizzato per ospitare anche un accelerometro, come richiesto da ILG.

Le altre 3 stazioni in superficie (MI01, MI02, MI03) sono poste entro 3.2 km di distanza dalla stazione centrale e sono disposte a una distanza angolare di circa 120° una dall'altra, racchiudendo in maniera ideale la zona di stoccaggio.

Per progettare l'adeguamento della rete sismica, valutando come migliorare la detezione del DI e del DE di rilevazione, sono state effettuate delle simulazioni utilizzando differenti configurazioni.

Le analisi di detezione sono state effettuate considerando la rete microsismica installata nella concessione "Minerbio Stoccaggio" fino a Marzo 2018 (che comprende le 4 stazioni sopra indicate, rete denominata in Tab. 4 con RO) e un'implementazione della RO (definita in Tab. 4 RP2017) comprendente fino a 11 stazioni di cui 5 con sensore in pozzetto (1 a 100 m e 4 a 150 m di profondità).

I risultati delle analisi di detezione presentati nella Relazione N.01 del Protocollo Operativo (INGV-MI, 2017) mostrano ad esempio che, anche in condizioni di rumore ambientale particolarmente sfavorevoli, la RP2017 consente di localizzare con buona precisione eventi sismici di magnitudo fino a 0.9 alla base del Dominio Interno.

In un'ottica di gradualità di sviluppo della rete microsismica e in accordo con quanto previsto dal Protocollo Operativo, a partire dal secondo trimestre 2018 il Concessionario ha installato nell'area della concessione, una versione sperimentale della RP2017 (definita in Tab. 3 RP2018), che comprende 8 stazioni di cui 4 con sensore in pozzetto (1 a 100 m e 3 a 150 m di profondità).

L'analisi effettuata è descritta in dettaglio nella Relazione Trimestrale 2018-02 (pagine 9-25).

I risultati, in sintesi, rilevano che nella parte di Dominio Esteso non compresa in DI, la RP2018 risulta leggermente meno sensibile della RP2017, ma con differenze per le soglie di localizzazione che generalmente risultano essere intorno al decimo (0.1) di magnitudo ML.

Si tratta quindi di differenze assolutamente trascurabili che ricadono nell'intervallo di incertezza delle stime di questo parametro, generalmente pari a 0.2 – 0.3.

L'analisi della distribuzione areale dei valori di soglia mostra inoltre che la mancata installazione di alcune stazioni modifica la distribuzione areale della sensibilità della rete, aumentando leggermente la soglia di localizzazione ad Est e a Sud del reservoir, senza tuttavia compromettere la sensibilità media della rete.

Questo leggero miglioramento non giustifica l'installazione di ulteriori stazioni, come vedremo meglio e con maggior dettaglio nel paragrafo dedicato alle analisi di detezione e in cui verrà effettuato, come previsto da ILG, il controllo del livello di soglia raggiunto dalla Rete Sismica installata dal Concessionario, dalla Rete Sismica Integrata (stazioni RSN INGV con le stazioni del Concessionario) e il miglioramento rispetto alla situazione di riferimento, rappresentata unicamente dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale.

La Rete Sismica Integrata (costituita quindi dalle stazioni del Concessionario e dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale INGV) è mostrata in Fig. 10.

Rete	Configurazione			Stazione	Latitudine N [°]	Longitudine E [°]	Quota [m]	Profondità [m]	Località
MI	RO	RP2017	RP2018	MI01	44.64014	11.49142	9	0	Fondo Fiumicello (Minerbio)
MI	RO	RP2017	RP2018	MI02	44.60820	11.52558	9	0	San Martino in Soverzano (Minerbio)
MI	RO	RP2017	RP2018	MI03	44.60666	11.45678	15	0	Spettoleria (Minerbio)
MI	RO	RP2017	RP2018	MI04	44.61596	11.49631	11	100	Tintoria (Minerbio)
MI		RP2017	RP2018	MI05	44.64411	11.45093	9	150	Saletto (Minerbio)
MI		RP2017	RP2018	MI06	44.61623	11.40021	17	0	Santa Maria in Duno
MI		RP2017		MI07	44.56188	11.44420	22	150	Granarolo dell'Emilia
MI		RP2017	RP2018	MI08	44.55698	11.53678	18	150	Riccardina (Minerbio)
MI		RP2017		MI09	44.62196	11.57970	8	0	Budrio
MI		RP2017	RP2018	MI10	44.67853	11.53648	7	150	Boschi (Minerbio)
MI		RP2017		MI11	44.67707	11.43992	9	0	San Pietro in Casale

Tabella 3. Stazioni della Rete Microsismica Minerbio Stoccaggio e configurazione della rete nelle diverse implementazioni adottate o previste nell'ambito del Protocollo Operativo. RO: rete operativa fino a Marzo 2018; RP2017: rete pianificata nella fase iniziale del Protocollo Operativo; RP2018: scelta finale - rete operativa a partire dal secondo trimestre del 2018.

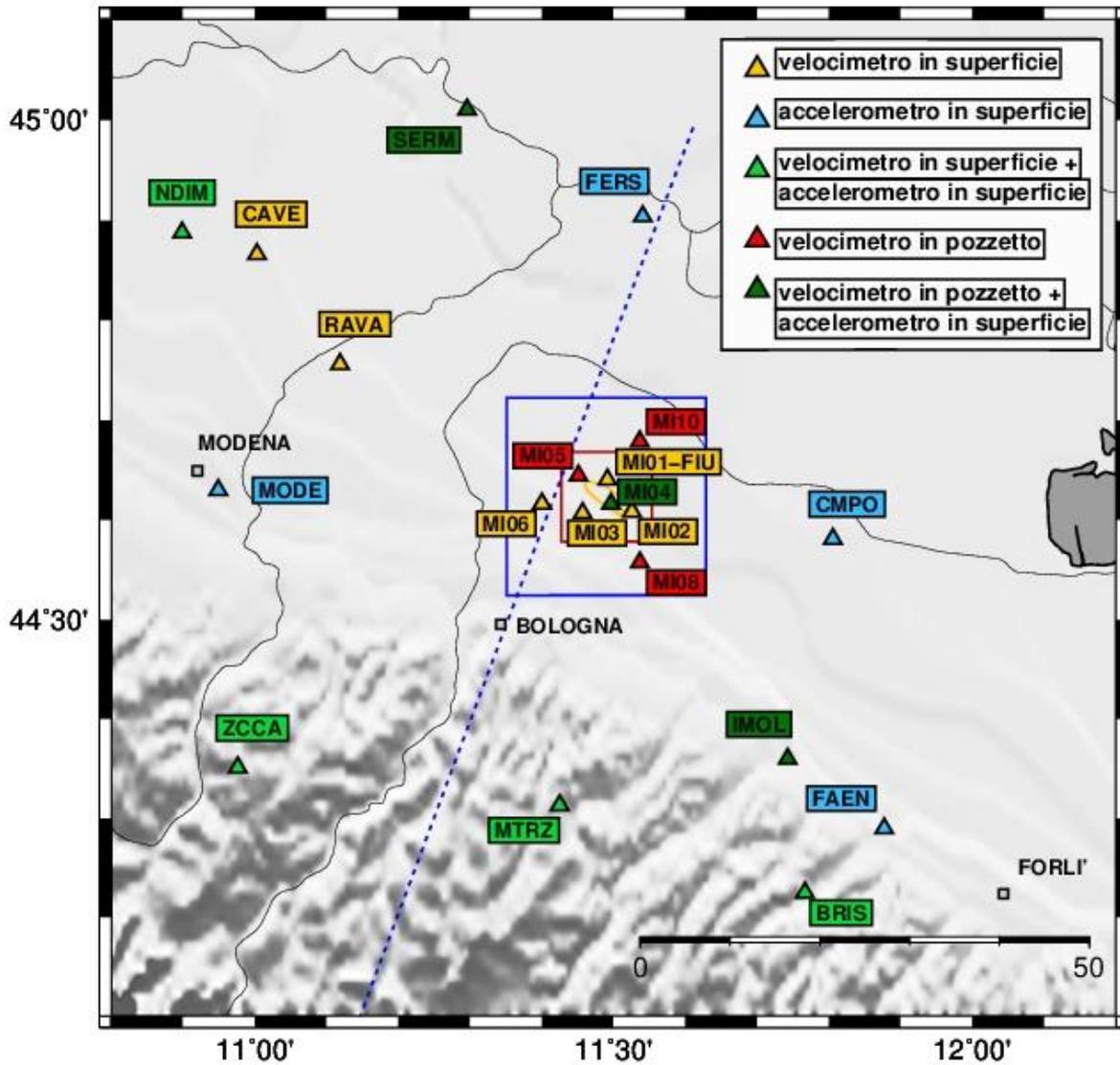


Figura 10. Configurazione della rete sismica integrata, costituita dalle stazioni della Rete Microsismica “Minerbio Stocaggio” e dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale INGV. Nella didascalia sono indicati i vari tipi di strumenti installati e la loro posizione.

1.5 Sistema di acquisizione

I criteri adottati per la scelta e la relativa configurazione di tutto il sistema di acquisizione e monitoraggio sono stati quelli di usare software, logiche e hardware già ampiamente collaudati presso INGV ed in particolare presso la sezione di Milano, poiché basati su criteri internazionali riconosciuti ed adottati dai più importanti centri di ricerca sismologica. Fortunatamente anche il Concessionario ha dimostrato di avere le capacità scientifiche e l'impianto tecnologico adatto per supportare lo schema di acquisizione previsto.

L'acquisizione in tempo reale dei dati registrati delle singole stazioni avviene utilizzando il software Seedlink (IRIS, 2016a) che, supportando il protocollo TCP/IP, crea i nodi di acquisizione dati. Questi ultimi, se opportunamente configurati, possono avere funzioni di server o di client di dati tra più nodi. Presso INGV-MI, è stato creato e configurato il nodo master dedicato all'acquisizione dati Seedlink, nel quale confluiscono direttamente i dati delle stazioni della RSN che compongono la rete integrata. In modo analogo, le stazioni della rete microsismica confluiscono direttamente al nodo Seedlink di acquisizione realizzato presso il Concessionario. Il nodo Seedlink del Concessionario confluisce direttamente nel nodo master INGV, in modo tale da avere su quest'ultimo tutte le stazioni che compongono la rete integrata.

I dati in continuo di tutte le stazioni sismiche sono acquisiti nel formato standard miniSEED (IRIS, 2016b). Il vantaggio di utilizzare questo software, oltre alla sua enorme diffusione nel mondo scientifico, con conseguente validazione, è la sua natura Open Source, basata su piattaforme Linux.

A valle del sistema di acquisizione è stato installato e configurato un sistema di analisi e di elaborazione dati in tempo reale basato su Earthworm (Earthworm Central, 2016). Anche questo software ha una natura Open Source basata su sistemi Linux ed è uno standard internazionale ampiamente diffuso presso i maggiori centri di monitoraggio sismico. Le funzioni principali di questo software sono: il riconoscimento automatico degli eventi sismici in tempo reale, il riconoscimento delle fasi sismiche e la localizzazione degli eventi, il calcolo della magnitudo e dei parametri di scuotimento del suolo quali PGA, PGV e PSD.

Le tracce di ogni evento riconosciuto vengono automaticamente tagliate e convertite nel formato internazionale SAC (IRIS, 2016c) per poter essere utilizzate in elaborazioni successive. Infatti, per la creazione del bollettino sismico, ogni evento processato automaticamente viene rivisto manualmente presso INGV-MI da un operatore qualificato, che ha il compito di effettuare la validazione finale comprendente il calcolo della magnitudo e dei parametri di localizzazione dell'evento.

La procedura che porta alla creazione del bollettino sismico è basata sui seguenti passi:

- (1) acquisizione in tempo reale delle stazioni della RSN;
- (2) acquisizione in tempo reale delle stazioni del Concessionario;
- (3) creazione di un archivio unico dei dati in continuo giornalieri di tutte le stazioni nel formato miniSEED;
- (4) riconoscimento automatico degli eventi sismici in tempo reale, riconoscimento delle diverse fasi sismiche, localizzazione automatica e calcolo della magnitudo;
- (5) taglio delle forme d'onda dell'evento e conversione dei dati nel formato SAC;
- (6) rilocalizzazione manuale dell'evento sismico, riconoscimento di eventuali falsi trigger e ricalcolo della magnitudo;
- (7) creazione del bollettino sismico.

Il Concessionario ha consegnato le forme d'onda nel formato miniSEED, registrate delle proprie stazioni, da quando ha attivo questo protocollo, permettendo quindi di disporre dei dati in tale formato anche per un periodo precedente alla formalizzazione della Convenzione.

E' stato quindi possibile creare un archivio integrato dei dati sismici registrati, a partire dal Maggio 2015, dalle reti IV, Z3 e MI presso il nodo master Seedlink di Milano.

A partire da Marzo 2018 tutti i segnali registrati dalle stazioni riportate in Tab.4 sono state acquisite in tempo reale su server dedicato presso INGV-MI.

Per tutte le stazioni sono state calibrate e rese disponibili le curve di risposta e le caratteristiche tecniche di sensori e acquisitori, consentendo così di determinare in unità fisiche (e non semplicemente in *counts*) accelerazione e velocità del moto del suolo oltre che i parametri spettrali

Come si vede dall'analisi della Tab. 5, la media della minima distanza inter-stazione della Rete MicroSismica di Minerbio è di circa 3,8 km.

Network	Station Code	Lat. N (°)	Lon. E (°)	Elev. (m)	Depth (m)	Site	Distance (km)	Azimuth (°)	Digitizer	Sensor 1	Sensor 2	Start time	Ending time
MI	MI01	44.64014	11.49142	9	0	Minerbio - Fondo Fiumicello	1.9	3	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S	_	2015-121	_
MI	MI02	44.60820	11.52558	9	0	Minerbio - San Martino in Soverrano	3.3	120	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S	_	2015-121	_
MI	MI03	44.60666	11.45678	15	0	Minerbio - Spettolera	3.2	235	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S-MKIII	_	2015-121	_
MI	MI04	44.61596	11.49631	11	100	Minerbio - Tintoria	0.9	147	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-BH	SARA SA10 2G	2016-118	2018-178
										SARA SS10		2018-178	2019-117
										LE3D-BH		2019-117	2019-137
										SARA SS10		2019-137	_
MI	MI05	44.64411	11.45093	9	150	Bentivoglio - Saletto	3.9	307	Solgeo Dymas 24 Master	SARA SS10	_	2018-103	_
MI	MI06	44.61623	11.40021	17	0	Bentivoglio - Santa Maria in Duno	7.2	264	Solgeo Dymas 24 Master	SARA S02	LE3D-1S-MKIII	2018-103	_
MI	MI08	44.55698	11.53678	18	150	Budrio - Riccardina	8.2	153	Solgeo Dymas 24 Master	SARA SS10	_	2018-118	_
MI	MI10	44.67853	11.53648	7	150	Malalbergo- Boschi	7.2	31	Solgeo Dymas 24 Master	SARA SS10	_	2018-118	_
IV	BRIS	44.22454	11.76657	260	0	Brisighella	49.5	153	GAlA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	CAVE	44.86580	11.00310	18	0	Cavezzo	47.1	305	GAlA2	TRILLIUM-120S	_	2015-121	_
IV	CMPO	44.58080	11.80560	2	0	Campotto Po	25.5	100	GAlA2	_	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	FAEN	44.28950	11.87700	41	0	Faenza	48.2	140	GAlA2	_	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	FERS	44.90350	11.54060	3	0	Ferrara	31.4	7	GAlA2	_	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	IMOL	44.35955	11.74248	27	175	Imola	35.5	145	GAlA2	LE3D-BH	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	MODE	44.62972	10.94917	41	0	Modena	42.9	271	GAlA2	_	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	MTRZ	44.31280	11.42480	570	0	Monterenzio	34.9	188	TRIDENT	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	NDIM	44.88730	10.89870	19	0	Novi di Modena	55.3	302	GAlA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	RAVA	44.75587	11.11880	15	0	Ravarino	32.9	297	GAlA2	LE3D-5S	_	2015-121	_
IV	SERM	45.00997	11.29582	7	135	Sermide	45.7	340	GAlA2	LE3D-BH	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	ZCCA	44.35085	10.97650	700	0	Zocca	50.8	234	GAlA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	2015-121	_
Z3	A307A	44.66076	11.43631	9	0	Bentivoglio	6.0	315	REFTEK130	TRILLIUM-120C	_	2015-121	2019-110
Z3	A308A	44.58249	12.00568	-2	0	Longastrino	41.2	96	REFTEK130	TRILLIUM-120C	_	2015-121	2019-110

Tabella 4. Stazioni della Rete Microsismica Minerbio Stoccaggio gestita dal Concessionario (sigla rete "MI"), installate all'interno della proiezione superficiale del Dominio Esteso di rilevazione; stazioni della Rete Sismica Nazionale entro 110 km dal punto centrale del giacimento "Minerbio Stoccaggio" (sigla rete "IV") e stazioni del progetto AlpArray (sigla rete "Z3"). In particolare vengono riportate: codice rete e sigla stazione, coordinate geografiche, quota e profondità dei sensori velocimetrici, località, distanza e azimuth dal centro rete, tipo di acquisitore e sensori installati. Start time indica il giorno iniziale per il quale sono presenti sul server dedicato i segnali registrati alle varie stazioni, espresso come data ordinale (anno e numero del giorno dal 1 gennaio; es. 2015-121 equivale al 1 maggio 2015), end time indica il giorno finale.

	MI01	MI02	MI03	MI04	MI05	MI06	MI08	MI10
MI01		4.46	4.62	2.72	3.23	7.69	9.92	5.56
MI02	4.46		5.45	2.47	7.13	9.96	5.76	7.87
MI03	4.62	5.45		3.29	4.19	4.60	8.40	10.18
MI04	2.72	2.47	3.29		4.76	7.60	7.30	7.65
MI05	3.23	7.13	4.19	4.76		5.07	11.83	7.77
MI06	7.69	9.96	4.60	7.60	5.07		12.66	12.81
MI08	9.92	5.76	8.40	7.30	11.83	12.66		13.51
MI10	5.56	7.87	10.18	7.65	7.77	12.81	13.51	

Tabella 5. Inter-distanze (km) per le stazioni gestite dal Concessionario

1.6 Funzionamento sistema di acquisizione e trasmissione dati, strumentazione sismica

Per quanto concerne la trasmissione dati, la stabilità della connessione con le stazioni sismiche (e il funzionamento dei relativi server di acquisizione e di tutte le procedure attive per lo scambio dati in tempo reale) si è rilevata in generale particolarmente soddisfacente, come si può vedere nella Fig. 11. Occorre rimarcare che in tutto il periodo della sperimentazione c'è stato un dialogo continuo e una piena collaborazione tra ricercatori e tecnici INGV e del Concessionario per verificare che le tipologie di segnali trasmessi/ricevuti fossero in linea con i migliori standard internazionali e segnalare eventuali malfunzionamenti o modifiche apportate agli apparati di misura.

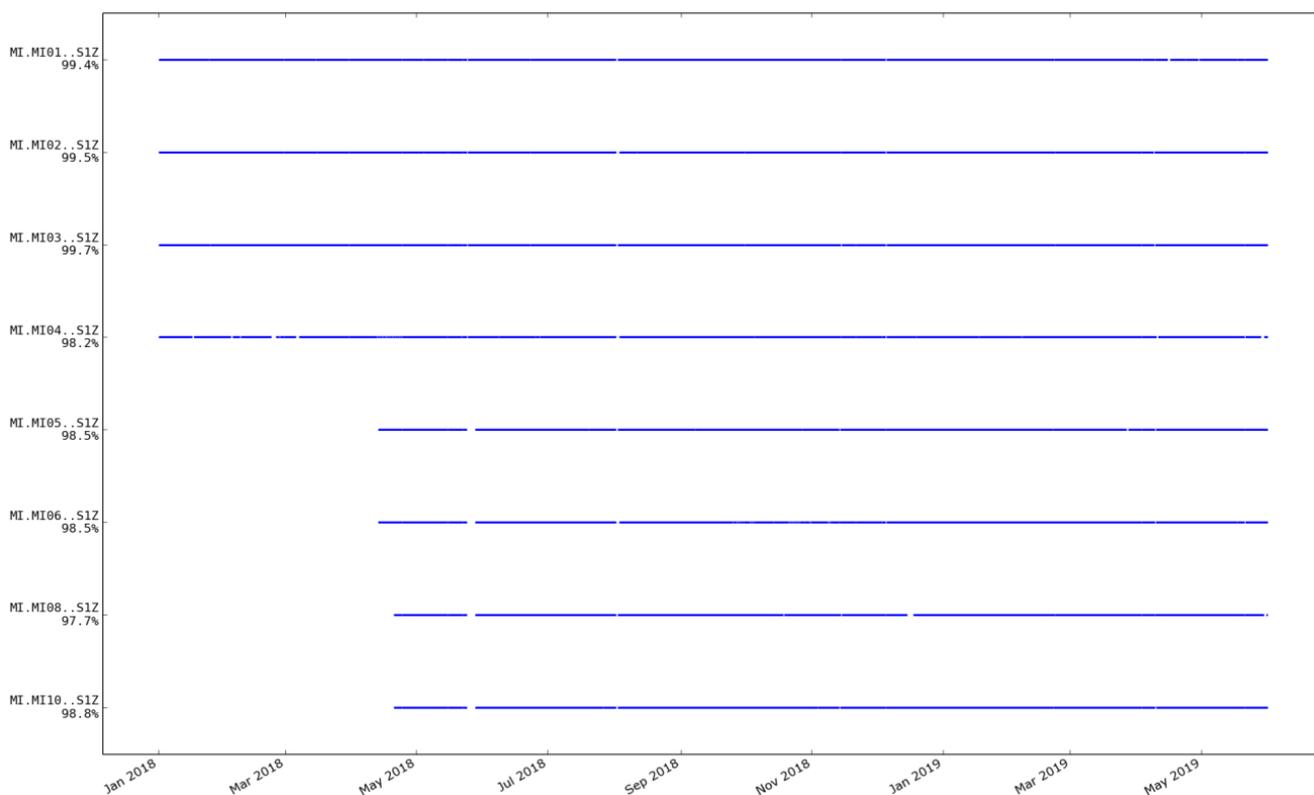


Figura 11. Statistiche relative alla percentuale di dati trasmessi in tempo reale al Centro Acquisizione della Sezione INGV di Milano per le stazioni sismiche velocimetriche gestite dal Concessionario

Come normalmente succede nella gestione di una rete sismica, alcune stazioni possono presentare in certi periodi problemi di funzionamento. In particolare la stazione MI04 è risultata particolarmente problematica, il Concessionario si è comunque sempre adoperato per risolvere al meglio le varie situazioni di guasto.

Ad esempio, dall'analisi delle curve di rumore si era evidenziato un malfunzionamento tra i giorni 2 giugno e 27 giugno 2018, per il sensore di tipo LE3D-BH che equipaggiava la stazione. In particolare il malfunzionamento risultava più evidente durante le ore meno energizzate dal noise, quelle notturne. A seguito del rilevamento del guasto, in data 27 giugno 2018 il Concessionario ha eseguito un intervento di manutenzione della stazione provvedendo a recuperare il sensore in pozzo esistente e a sostituirlo con un altro modello, il sensore SS10BHV, con frequenza propria uguale a quella del sensore precedente (1 Hz).

A partire dalla data dell'intervento la stazione aveva inizialmente ripreso il corretto funzionamento, mantenendo la variazione dei livelli di noise giorno/notte osservati nel primo trimestre 2018. E' importante osservare che in questa situazione è risultata vincente la scelta di utilizzare un modello di sensore in pozzo di tipo "recuperabile".

Un altro problema per la stessa stazione si è però verificato, per frequenze minori di circa 5 Hz, a partire dal 17/09/2018, riguardando in questo caso solo la componente verticale.

Le componenti orizzontali del sensore risultavano perfettamente funzionanti, permettendo il regolare utilizzo di questa stazione, in particolare per la rilevazione di eventi sismici e le successive analisi. Senza entrare nel dettaglio, sono state effettuati altri interventi per garantire il miglior funzionamento di questa stazione, senza dover obbligatoriamente provvedere all'operazione di recupero in pozzo per cambiare un'altra volta il sensore ma, a partire dal 07/02/2019 e persistendo il guasto, si è provveduto alla sostituzione del sensore con un altro della stessa tipologia.

Occorre comunque ricordare che al sito MI04 è collocato anche un sensore accelerometrico, e questo minimizza l'indisponibilità del dato velocimetrico nei periodi sopra menzionati.

Altre tipologie di interventi hanno riguardato la sincronizzazione temporale dei digitalizzatori e la verifica delle polarità nei sensori.

Alcuni digitalizzatori tengono infatti conto automaticamente del ritardo temporale dovuto all'azione del filtro digitale anti-alias, tale filtro agisce quando si riconduce al campionamento impostato (ad es 100 Hz) lo *stream* di dati che viene invece digitalizzato con *oversampling* (cioè a maggiore frequenza). Questo sfasamento temporale (il cosiddetto "*inherent time delay*") è pari (utilizzando a titolo di esempio i digitalizzatori M24 Lennartz) a 286 millisecondi operando con un campionamento finale di 100 campioni al secondo (100 Hz).

Questo sfasamento non crea particolari problemi quando si utilizza il medesimo digitalizzatore per tutte le stazioni della rete, come ad esempio per la rete gestita dal Concessionario, ma può portare a lievi imprecisioni quando si considerano vari tipi di acquisitore.

In data 6 aprile 2018 il Concessionario ha quindi provveduto a effettuare una correzione del firmware per allineare temporalmente i segnali, inviati in tempo reale, registrati dalla rete microsismica con quelli delle stazioni della RSN. L'operazione è stata poi ripetuta per le varie stazioni e la situazione si è completamente normalizzata a partire dal 24 aprile 2018. Nei precedenti periodi si era comunque già provveduto a tener conto dell'*inherent time delay* considerando, quando necessario nei vari software di elaborazione dati, la correzione temporale da assegnare alle tracce sismiche ricevute prima di sottoporle alle successive analisi.

Altri interventi sono stati effettuati, sempre in stretta collaborazione con il Concessionario, per verificare l'esatta assegnazione delle componenti (verticale, nord-sud, est-ovest) allo *stream* dei dati prodotti.

In data 22 maggio 2018 il Concessionario è intervenuto sul firmware per ovviare all'inversione dei canali (componente verticale assegnata a una delle orizzontali e viceversa) su alcune delle stazioni installate il mese precedente provvedendo a ridefinire la nomenclatura dei files miniSEED acquisiti. Nel periodo della Convenzione è sempre stata attiva una stretta collaborazione con i colleghi responsabili della gestione delle reti di monitoraggio, il Concessionario ha sempre preavvisato per

eventuali interventi programmati o variazioni nella configurazione (ad es. lo spostamento di pochi metri del posizionamento del sensore a MI03 effettuato in data 9 aprile 2019). Analogamente INGV ha provveduto a segnalare i rari casi di interruzione del collegamento o richiedere controlli in caso di malfunzionamento.