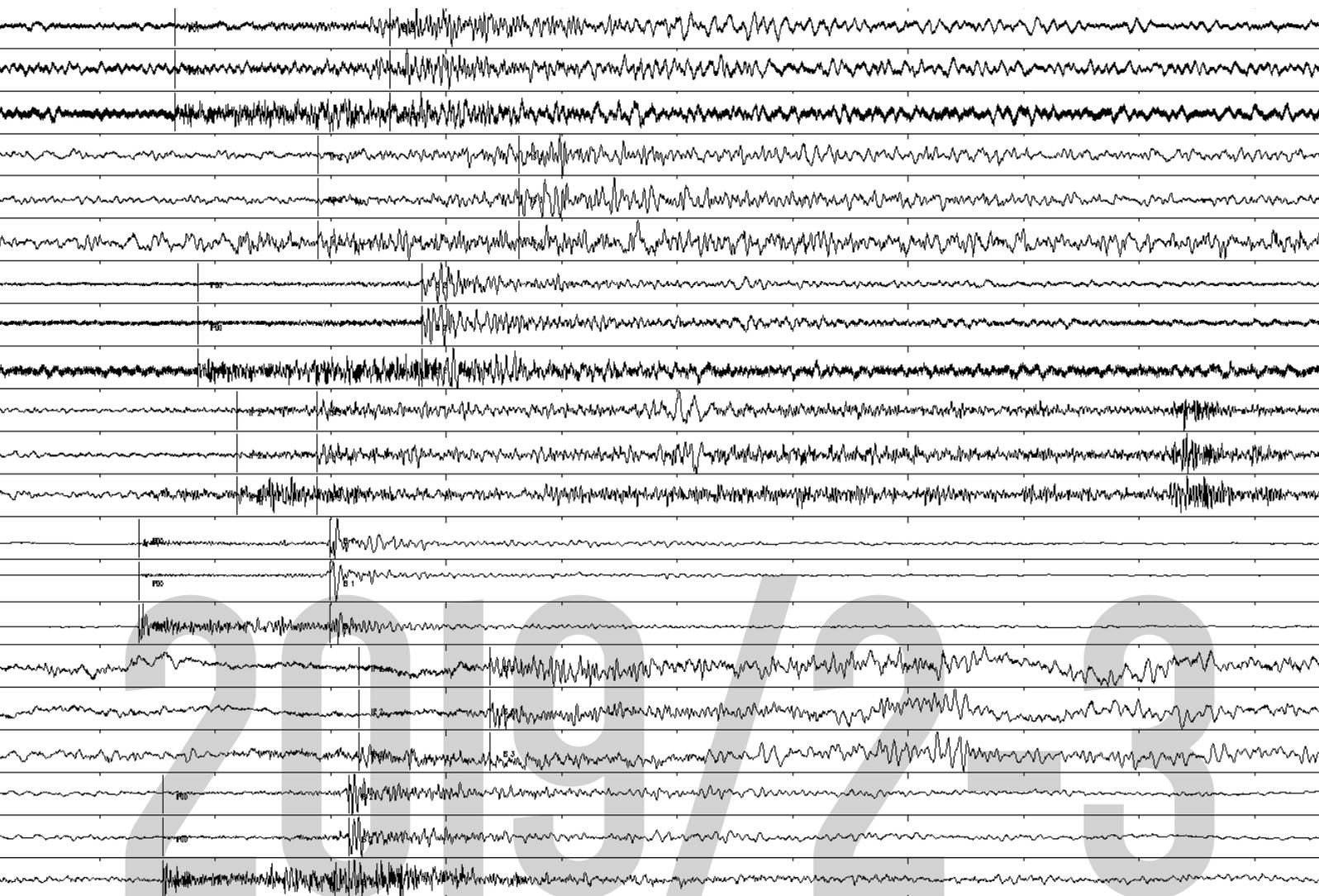


MiSE DGS UNMIG/Società Padana Energia S.p.A./RER/Assomineraria
Protocollo Operativo – Applicazione in via sperimentale degli Indirizzi e Linee Guida
per il monitoraggio della concessione di coltivazione idrocarburi “Mirandola”

RELAZIONE TRIMESTRALE 2019/2 e 3

Mario Anselmi, Irene Munafò, Licia Faenza, Lucia Zaccarelli



indice

1_Introduzione	3
2_Inquadramento geologico	3
3_Rete di monitoraggio sismico	5
4_Dati sismici del secondo e terzo trimestre 2019	6
5_Monitoraggio delle pressioni di poro	9
6_Conclusioni	9
Appendice A	10
A1_Caratteristiche tecniche della rete di monitoraggio sismico	10
A2_Analisi dei dati del secondo trimestre	10
A3_Analisi dei dati del terzo trimestre	12
A4_Analisi conclusive	13
Glossario	16
Bibliografia	16

MiSE DGS UNMIG/Società Padana Energia S.p.A./RER/Assomineraria

Protocollo Operativo – Applicazione in via sperimentale degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della concessione di coltivazione idrocarburi “Mirandola”

Relazione trimestrale 2019/2 e 3 Aprile-Settembre

Mario Anselmi¹, Irene Munafò², Licia Faenza¹, Lucia Zaccarelli³

¹ INGV, Sezione ONT, Roma, Italia; ² INGV, Sezione di Roma 1, Italia; ³ INGV, Sezione di Bologna, Italia

Bologna, 19 dicembre 2019

1_Introduzione

Illustriamo qui le analisi della sismicità registrata nella concessione di coltivazione idrocarburi “Mirandola” nel periodo aprile-settembre 2019. Questa attività viene svolta dall’INGV, in qualità di Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM), nell’ambito della sperimentazione degli Indirizzi e Linee Guida (ILG, 2014) in quest’area. Gli aspetti tecnici e le descrizioni dettagliate delle analisi dei dati del monitoraggio del secondo e terzo trimestre 2019 vengono illustrati nell’Appendice A.

La sperimentazione riguarda l’analisi dei dati provenienti dai sistemi di monitoraggio attivi nell’area circostante il centro olio Cavone (la centrale di raccolta e trattamento operativa all’interno della concessione idrocarburi “Mirandola”), considerando le stazioni di rilevamento messe in funzione direttamente dal Concessionario e la loro integrazione con le stazioni della rete sismica nazionale gestita dall’INGV. Ad oggi il monitoraggio è volto unicamente a registrare e catalogare gli eventi sismici locali. Il monitoraggio delle deformazioni del suolo si baserà sul primo anno di dati GPS raccolti dalla stazione installata dal concessionario (Società Padana Energia S.p.A.) in data 19/12/2018, oltre che dalle analisi InSAR, e sarà parte integrante della relazione di fine anno.

Da notare che la Società Padana Energia, di concerto con il MiSE-DGS, RER e Assomineraria, ha istituito nel 2014 il Laboratorio di monitoraggio Cavone con lo scopo di analizzare i dati del monitoraggio e di divulgarne i risultati tramite sito web dedicato: labcavone.it.

In questa relazione riportiamo quindi i nostri risultati (INGV-SPM) confrontandoli con quelli di LabCavone.

2_Inquadramento geologico

L’area del giacimento di Cavone si inserisce all’interno dell’Arco Ferrarese, appartenente al sistema esterno a pieghe e sovrascorrimenti dell’Appennino settentrionale (Figura 1a).

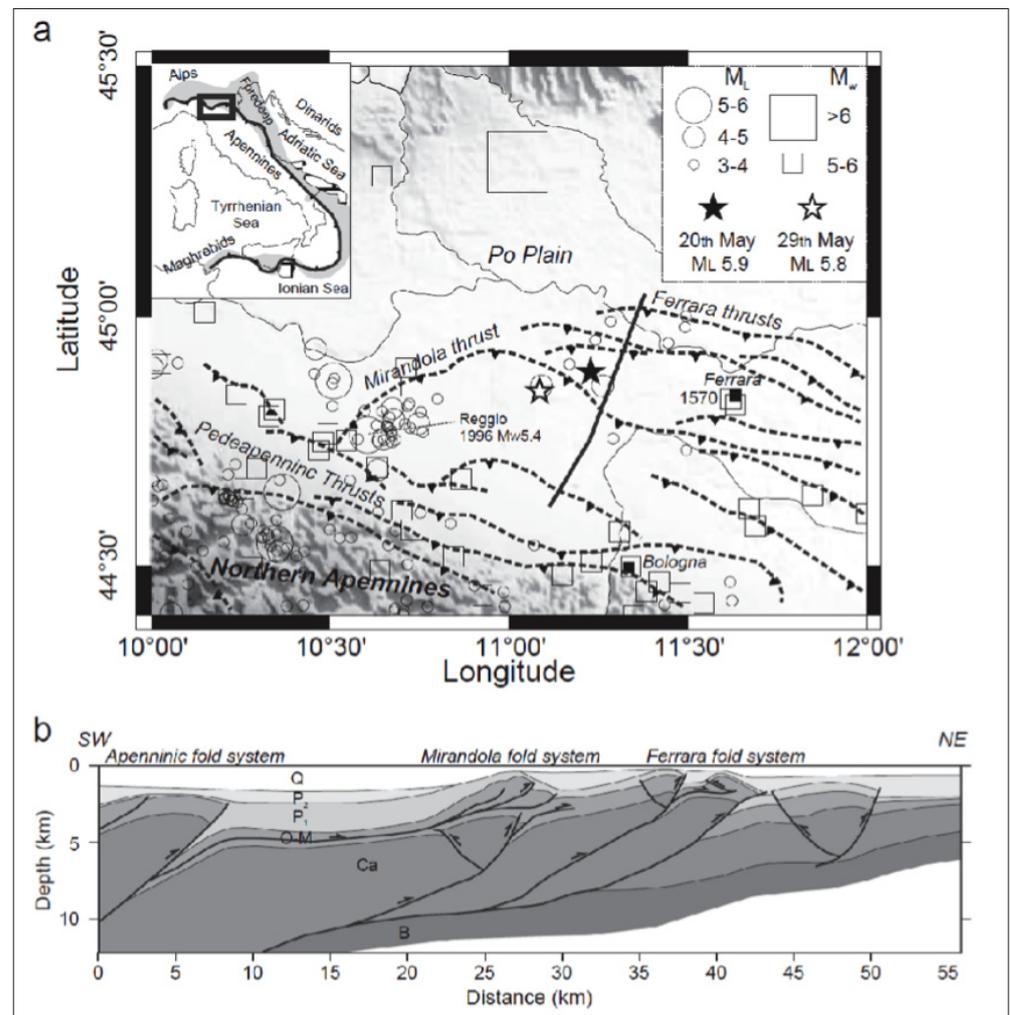
La Catena, vergente verso nord-est, si è sviluppata durante il Neogene ed il Quaternario con la collisione tra il margine continentale europeo e la microplacca Adria (Reutter et al., 1980). Il sistema a pieghe e sovrascorrimenti, seppellito completamente sotto una spessa copertura sedimentaria rappresentata dai sedimenti quaternari della Pianura Padana, è costituito da sovrascorrimenti ciechi e pieghe relative ad essi, che coinvolgono la principale successione sedimentaria costituita da evaporiti triassiche, carbonati mesozoici e basso-terziari e successioni clastiche Oligo-mioceniche (Carminati et al., 2010; Fantoni e Franciosi, 2010). Le unità mesozoiche giacciono sui depositi clastici Permo-Triassici e sul basamento cristallino Paleozoico. Le unità mioceniche sono coperte invece da depositi terrigeni Plio-Pleistocenici di natura sintettonica, principalmente caratterizzati da torbiditi e sabbie marine. Lo spessore di tali depositi varia dai 7000–8000 m nella parte delle sinclinali più profonde ai circa 150 m nelle parti al di sopra delle anticlinali legate ai sovrascorrimenti (Figura 1b).

Il giacimento ad olio Cavone, scoperto nel 1972, ricade nella concessione Mirandola che è ubicata prevalentemente in Emilia-Romagna nella provincia di Modena, e in parte in Lombardia, in provincia di Mantova; ha un'estensione di 121.96 km² ed è di titolarità di Società Padana Energia.

L'area mineralizzata (ossia l'area vera e propria del giacimento) è di circa 15 km²; le rocce serbatoio sono costituite da Calcari Grigi di Noriglio, calcare Oolitico e Breccie di Cavone, mentre le rocce di copertura sono costituite dalle Marne del Cerro. Il giacimento si trova ad una profondità di circa 2900 m. La trappola è costituita da un'anticlinale allungata in direzione est-ovest e fagliata sia longitudinalmente che trasversalmente.

Figura 1.

(a) Mappa strutturale semplificata della zona emiliana, raffigurante le principali linee di sovrascorrimento dell'Appennino settentrionale. **(b)** Sezione geologica tracciata lungo la linea nera della Figura 1a (modificata da Carminati et al., 2010): Q—depositi marini e continentali quaternari, P2—depositi marini terrigeni (Pliocene medio-superiore), P1—depositi terrigeni ed evaporitici (tardo Miocene-basso Pliocene), O-M—depositi calcareo-marnosi e terrigeni (Oligocene-Miocene), Ca—carbonati (Mesozoico-Eocene), B—Basamento Paleozoico.



Il fluido estratto dal giacimento è composto da olio, gas metano ed acqua di strato (ossia l'acqua fossile caratterizzata da un elevato contenuto di sali).

Nel campo sono presenti 11 pozzi, di cui 1 dedicato alla reiniezione (Cavone 14); l'acqua di strato viene infatti almeno in parte reiniettata all'interno del giacimento dal quale è stata estratta insieme all'olio e al gas.

3_Rete di monitoraggio sismico

La rete sismica di Cavone nella sua configurazione attuale, è stata installata nel dicembre 1992 ed è tuttora operativa. Si compone di quattro stazioni dotate di sismometro triassiale (in grado cioè di registrare i movimenti del suolo nelle direzioni verticale, nord-sud ed est-ovest). I nomi e le coordinate delle stazioni sono riportate nella Tabella 1, mentre la loro localizzazione rispetto al giacimento è visibile nella mappa di Figura 2. Tutte le stazioni sono ampiamente comprese nel cosiddetto Dominio Interno (DI, vedi Glossario). Dal 18 dicembre 2018 gli acquisitori sono stati sostituiti con dei Dymas 24 prodotti dalla SolGeo (e sono conseguentemente stati cambiati i sistemi di alimentazione e trasmissione dati) in modo da avere una registrazione dei dati in continuo e una sincronizzazione temporale tramite GPS.

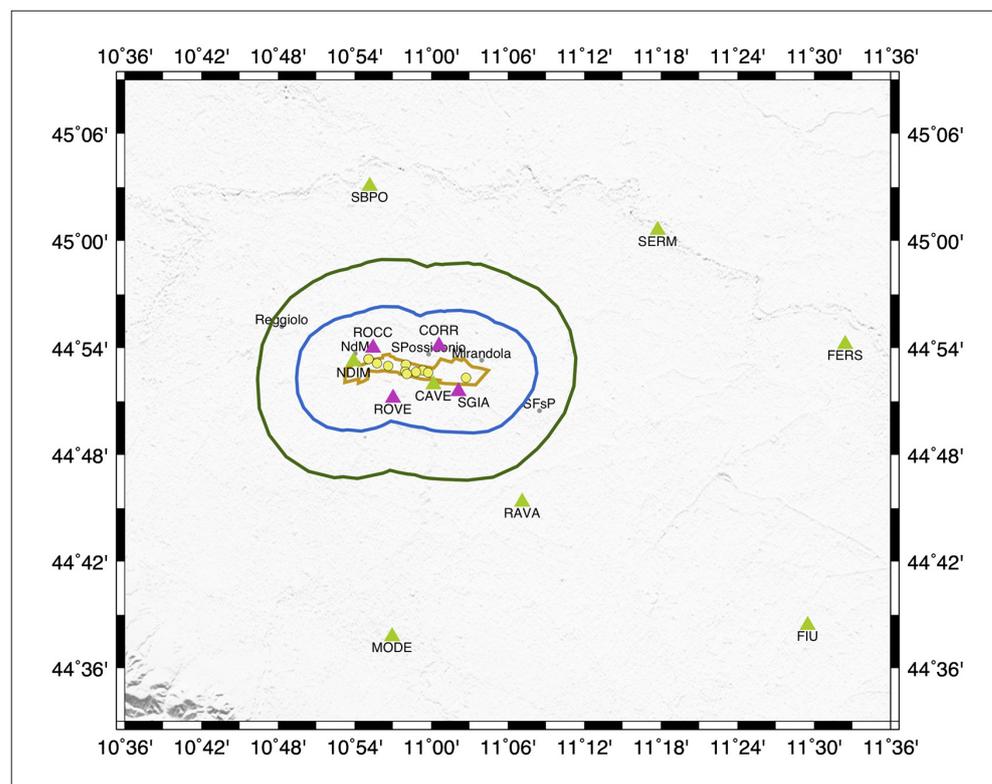
Tabella 1.

Elenco delle stazioni sismiche attive al centro olio Cavone: nomi e coordinate geografiche.

STAZIONE	LATITUDINE	LONGITUDINE	QUOTA (m)
CORR	44° 54' 07"	11° 00' 34"	12
ROCC	44° 54' 00"	10° 55' 27"	17
ROVE	44° 51' 11"	10° 56' 59"	21
SGIA	44° 51' 33"	11° 02' 09"	20

Figura 2.

Mappa dell'area interessata dalle attività del centro olio Cavone e delle stazioni sismiche presenti. I triangoli viola rappresentano le stazioni della rete locale di Cavone, i triangoli verdi le stazioni della rete nazionale INGV, i cerchi gialli i pozzi di produzione del campo. Il contorno ocra rappresenta l'estensione del giacimento Cavone. La linea blu delimita il limite del Dominio Interno (DI), mentre quella verde il Dominio Esteso (DE).



La trasmissione dei dati in tempo reale è funzionante (prima connessione eseguita dalla SPM in data 7 giugno 2019), ma per il momento continuiamo a utilizzare i dati off-line per maggiore affidabilità e completezza, mentre le procedure di analisi in tempo quasi reale sono in corso di validazione.

Prendiamo inoltre in considerazione le otto stazioni della rete sismica nazionale gestita dall'INGV che si trovano entro un raggio di 50 km dal comune di San Possidonio (il comune al centro del giacimento), a possibile integrazione della rete sismica locale. Nel caso cioè la rete di Cavone registri un evento, controlliamo se anche qualcuna di queste otto stazioni INGV ha potuto registrare il segnale. Principalmente si tratta di terremoti locali di bassissima energia che vengono registrati solo alle stazioni più prossime all'ipocentro, dato che già a distanze di qualche chilometro il segnale scompare all'interno del cosiddetto "rumore di fondo" (le normali oscillazioni della terra che si registrano abitualmente).

Le otto stazioni INGV sono mostrate nella mappa di Figura 2: due di queste sono ubicate all'interno del DI, in corrispondenza del giacimento (CAVE e NDIM), una si situa appena fuori dal DE verso sud-est (RAVA), mentre le restanti cinque stazioni (FIU, FERS, MODE, SBPO e SERM) sono esterne anche al DE, con distanze dal giacimento di ~30/50 km.

Complessivamente, la rete sismica utilizzata per l'analisi della microsismicità consta dunque di 4 sismometri gestiti dal concessionario e 8 della rete sismica nazionale INGV. La rete così composta non risponde appieno alle indicazioni degli ILG, ma rappresenta un passo nella direzione del potenziamento progressivo e graduale della rete di monitoraggio, secondo il principio di valorizzazione della struttura osservativa esistente (secondo raccomandazioni degli ILG) e permette di condurre una prima sperimentazione del monitoraggio per questa area.

4_Dati sismici del secondo e terzo trimestre 2019

Nel periodo aprile-settembre 2019 abbiamo identificato e localizzato 21 terremoti di bassa energia (19 di questi presenti nel catalogo LabCavone con M_l tra 0.9 e 2, e solo 3 presenti nel catalogo INGV - limitando la ricerca a un raggio di 30 km da San Possidonio -). L'unico evento comune a entrambi i cataloghi associati alle 2 reti sismiche prese separatamente è quello di magnitudo maggiore ($M_l = 2/2.1$ per LabCavone/INGV). Tramite l'analisi dei segnali sismici registrati alle 4 stazioni locali e alle stazioni INGV più vicine (generalmente si tratta di CAVE e NDIM, sporadicamente RAVA, e quasi unicamente per gli eventi del catalogo INGV le altre stazioni) è stato possibile ri-localizzare con maggiore precisione tutti i 21 eventi come mostrato nella mappa di Figura 4 e riportato in Tabella 2.

Tabella 2 (continua a pagina seguente).

Elenco degli eventi registrati nel periodo aprile-settembre 2019 e loro localizzazioni come calcolate nell'ambito della sperimentazione dall'INGV-SPM. Le celle scure evidenziano gli eventi localizzati dentro il DI.

N	DATA (aaaa-mm-gg)	ORA (UTC)	LAT	LON	DEPTH (km)	M _w	PGA (%g)	PGV (cm/s)
1	2019-05-04	23:01	11.2388	44.8622	14.94	2.24	0.061	0.011
2	2019-05-12	15:24	11.1203	44.8692	11.22	1.89	0.016	0.007
3	2019-05-28	20:07	11.0162	44.8808	5.78	1.78	0.046	0.006
4	2019-06-16	10:49	10.9987	44.8593	7.02	1.78	0.026	0.003
5	2019-06-18	00:57	11.0707	44.8282	12.10	1.79	0.156	0.008
6	2019-06-18	22:26	11.0212	44.8763	5.62	1.73	0.032	0.006
7	2019-06-30	17:49	11.0253	44.8755	4.97	2.25	0.235	0.049
8	2019-06-30	22:59	11.2050	45.1663	24.92	2.05	0.133	0.024

Tabella 2 (continua da pagina precedente).

N	DATA (aaaa-mm-gg)	ORA (UTC)	LAT	LON	DEPTH (km)	M _w	PGA (%g)	PGV (cm/s)
9	2019-07-13	04:18	10.9185	44.8918	5.17	1.79	0.03	0.008
10	2019-07-15	05:48	10.9558	44.8807	11.23	2.32	0.017	0.004
11	2019-07-18	00:13	10.6805	44.8252	12.81	2.09	0.007	0.002
12	2019-07-20	21:08	10.9303	44.8857	4.48	1.87	0.017	0.002
13	2019-07-27	11:11	10.9415	44.8873	5.95	2.22	0.079	0.008
14	2019-07-27	11:12	10.9443	44.8945	6.38	2.21	0.08	0.01
15	2019-07-31	22:49	11.0235	44.8205	8.78	1.98	0.007	0.001
16	2019-08-18	20:23	10.9725	44.8920	6.22	1.61	0.023	0.004
17	2019-08-26	04:01	10.7812	44.8492	12.16	1.87	0.032	0.005
18	2019-09-03	00:48	11.0020	44.8733	5.70	1.63	0.008	0.001
19	2019-09-03	02:49	11.0090	44.8778	6.24	1.97	0.039	0.003
20	2019-09-18	19:59	10.9062	44.8888	8.66	1.82	0.001	0.0003
21	2019-09-18	20:00	10.9057	44.8888	8.54	1.59	0.126	0.002

La magnitudo riportata in Tabella 2 è la magnitudo momento (M_w) stimata ad hoc per questa zona, grazie anche all'analisi di 250 eventi locali registrati dalla rete di Cavone tra il 2010 e il 2018 (con esclusione del periodo della sequenza sismica dell'Emilia del 2012 che ha causato guasti alla rete sismica), per eventi di bassa energia (Munafò et al., 2016). La magnitudo momento ha il vantaggio di essere più direttamente collegata all'energia sismica rilasciata dal terremoto rispetto alla stima di magnitudo locale (M_l).

Figura 3.

Mappa delle localizzazioni dei 21 eventi calcolate tramite questa analisi. Il poligono ocra rappresenta l'estensione del giacimento Cavone, la linea blu rappresenta il limite del DI, quella verde il DE. I triangoli viola rappresentano le stazioni della rete di Cavone, i triangoli verdi le stazioni della rete nazionale INGV. I cerchi neri mostrano gli epicentri degli eventi analizzati con associato il numero in ordine di occorrenza come da Tabella 2.

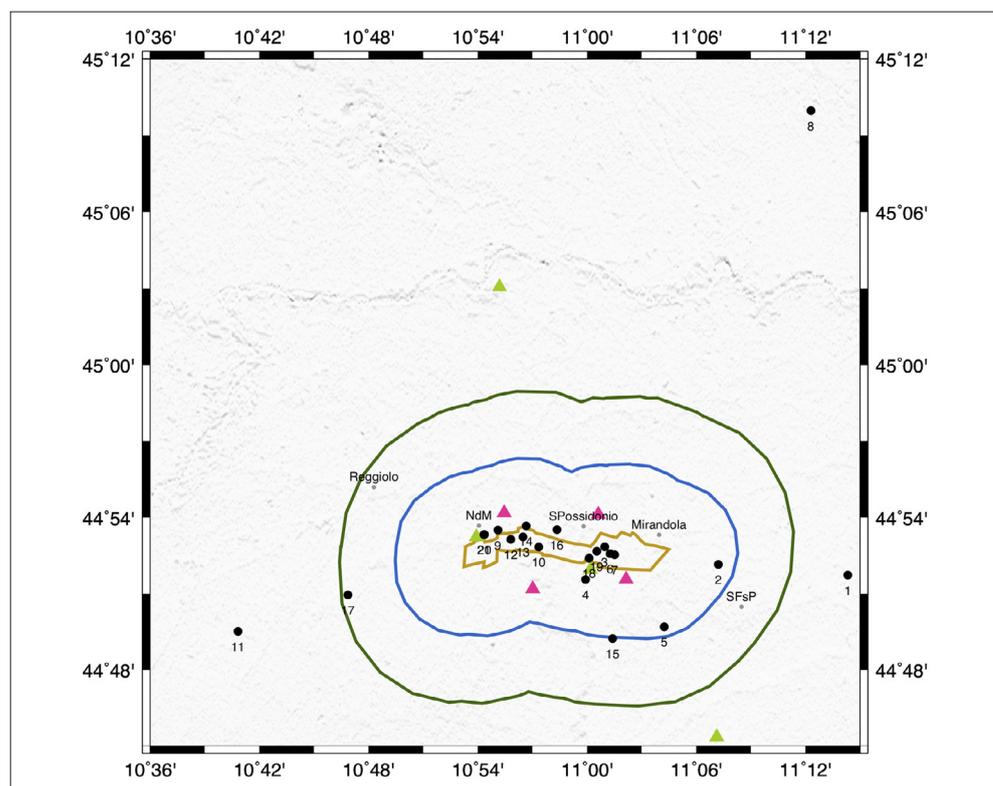
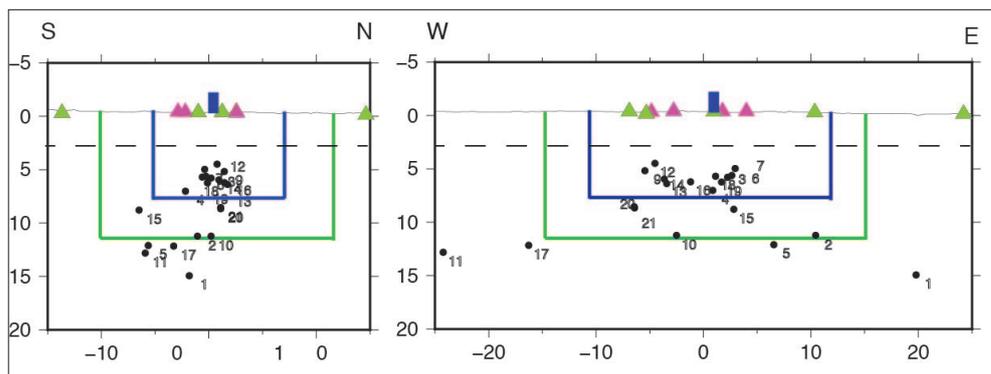


Figura 4.

Sezioni verticali sud-nord (S-N) e ovest-est (W-E) che mostra la localizzazione degli ipocentri dei 21 eventi registrati in questi due trimestri (cerchi neri). I triangoli indicano le stazioni (verde INGV e viola per quelle locali), i contorni blu e verde rappresentano i limiti dei due volumi DI e DE, il rettangolo blu indica la posizione del pozzo di reiniezione Cavone 14.



Abbiamo anche calcolato la PGA e la PGV osservate per tutti i 21 eventi, ma per le sole stazioni INGV (per una prima valutazione, essendo quelle gestite dalla SPM), riportiamo i valori massimi per ogni evento in Tabella 2.

Dei 21 eventi, 5 si localizzano esternamente ai domini di definizione, 5 ricadono nel volume del solo DE (fascia esterna al DI) e 11 eventi sono invece localizzati internamente al DI (come visibile dalle Figure 3 e 4, e riportato in Tabella 3), tutti questi hanno $M_w > 1.5$ e 3 di loro superano ulteriormente la soglia di 2.2. Una magnitudo superiore a queste soglie indicative riportate negli ILG (e in Figura 5 riportiamo la suddivisione nei livelli di attivazione con i valori indicativi) determinerebbe un innalzamento del livello di attivazione secondo il sistema decisionale di tipo a semaforo dall'ordinarietà (livello 0 - verde) all'attenzione (livello 1 - giallo), e dall'attenzione alla riduzione delle attività (livello 2 - arancione). I valori di PGA e PGV rimangono invece ampiamente sotto la soglia del livello di attenzione per tutti gli eventi. Questa mancanza di corrispondenza è sicuramente da tenere presente nella discussione delle soglie per i diversi livelli di attivazione che saranno da definire nel caso specifico di Cavone.

Tabella 3.

Tabella riassuntiva degli eventi analizzati e come ricadono all'interno dei due Domini definiti la concessione di Mirandola, nel primo trimestre (gennaio-marzo) del 2019.

DOMINIO	EVENTI
INTERNO (5 km dal giacimento)	11 - di cui 8 con $1.5 < M_w < 2.2$ e 3 con $2.2 < M_w < 3$
ESTESO (5-10 km dal giacimento)	5 con $1.59 < M_w < 2.32$

Si fa notare che le soglie definite negli ILG sono puramente indicative e «che i valori di soglia devono essere definiti ed esplicitati nel DGOM [Documento di Gestione Operativa del Monitoraggio, ndr] caso per caso per ogni concessione, anche in funzione delle caratteristiche sismotettoniche dell'area di attività e comunque dopo il periodo di monitoraggio previsto in condizioni non perturbate [...], in cui viene rilevata la sismicità di fondo» (ILG, 2014, cap. 9.4, p. 28). Nel caso di Cavone (in quanto sito già operativo all'inizio del monitoraggio) non essendo disponibile un'analisi della sismicità di fondo in condizioni non perturbate, ci riferiamo ai valori riportati nelle ILG durante la fase sperimentazione in atto. Sebbene gli ILG siano carenti di indicazioni riguardo la scala di magnitudo da prendere in considerazione: M_l e M_w mostrano valori sensibilmente diversi che non possono essere confrontati direttamente tra loro né tantomeno possono sottostare agli stessi valori di soglia (il confronto dei valori per ogni evento è riportato in Tabella A3).

Figura 5.

Definizione dei livelli di attivazione (pannello a) e dei valori indicativi per il passaggio da un livello al successivo (pannello b) come da ILG.

(a)

Livello di attivazione	Stato corrispondente
0	Ordinarietà
1	Attenzione
2	Riduzione delle attività
3	Sospensione delle attività

(b)

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

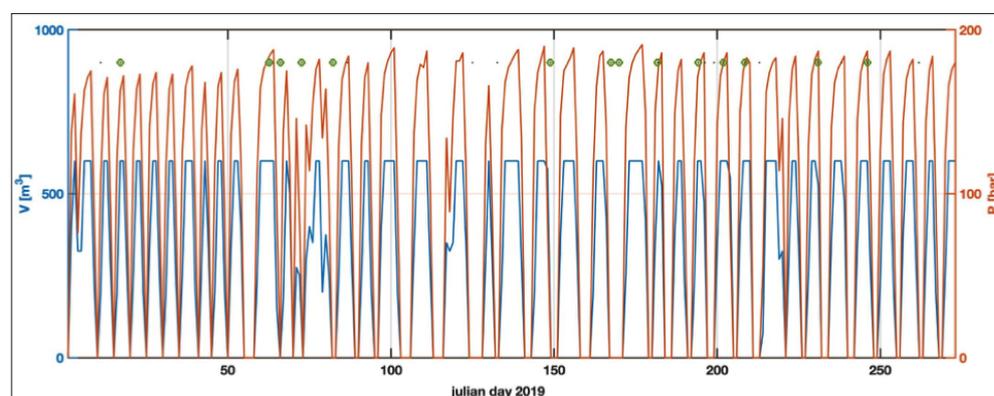
5_Monitoraggio delle pressioni di poro

Non è possibile eseguire un vero e proprio monitoraggio delle pressioni di poro dato che le pressioni di fondo pozzo vengono misurate una volta all'anno nel momento di fermo per manutenzione dell'impianto. Abbiamo però le informazioni relative al volume di acqua iniettata (in m³) e alla pressione di iniezione di testa pozzo di Cavone 14 (in bar), misurate con cadenza giornaliera da gennaio 2019 a settembre 2019.

Il grafico di Figura 6 mostra l'andamento di questi parametri confrontandolo con i tempi di occorrenza degli eventi rilevati alla rete sismica locale (punti neri), quelli evidenziati con un cerchio verde hanno localizzazioni interne al DI. Ad una ispezione visiva non sembra si possa rilevare alcun legame tra l'accadimento degli eventi e l'attività al pozzo re-iniettore.

Figura 6.

Andamento temporale dell'attività industriale al pozzo Cavone 14 di re-iniezione delle acque di scarto nel periodo gennaio-settembre 2019 (dal giorno giuliano 1 al 273 del 2019). In blu i volumi giornalieri di acqua iniettati e in rosso la pressione corrispondente. I punti neri indicano i tempi di occorrenza degli eventi sismici, quelli cerchiati in verde sono gli eventi localizzati all'interno del DI.



6_Conclusioni

La rete sismica usata per il monitoraggio della microsismicità nei domini definiti per la concessione di Mirandola si compone di 4 stazioni locali gestite dal concessionario e 8 stazioni INGV in un raggio (sovradimensionato) di 50 km intorno al comune di San Possidonio (sito grossomodo nel punto centrale della proiezione in superficie del giacimento). L'analisi della sismicità registrata nel secondo e terzo trimestre 2019 ha permesso di localizzare 21 eventi locali di magnitudo Mw comprese tra 1.59 e 2.32. Le stime di PGA e PGV mostrano valori massimi di 0.2 %g e 0.05 cm/s rispettivamente (ampiamente al di sotto delle soglie definite per il semaforo negli ILG). Si tratta comunque di una prima valutazione che ha tenuto conto delle sole stazioni INGV. Dei 21 eventi analizzati, 11 ricadono all'interno dell'area definita come Dominio Interno (DI) e tutti hanno magnitudo momento Mw superiore alla soglia (puramente indicativa) di 1.5 riportata negli ILG come valore utile per far passare al livello di attivazione n.1 (semaforo giallo). Se invece si considera la magnitudo locale ML, sono solo 3 gli eventi con valori tali da far scattare il livello di attivazione n.1, di attenzione.

La rete GPS si compone di una stazione installata dal concessionario in data 18 dicembre 2018. La trasmissione dei dati è già stata resa possibile ma per effettuare un'analisi affidabile abbiamo bisogno di almeno un anno di dati.

Le pressioni di poro di fondo pozzo sono misurate dal concessionario annualmente in occasione del fermo per manutenzione. Quelle di testa pozzo sono state passate alla SPM in formato di dato giornaliero il cui andamento temporale viene messo a confronto con l'occorrenza temporale degli eventi sismici localizzati internamente al DI in Figura 6. Non sembra sussistere nessuna correlazione tra i due processi, ci riserviamo di riesaminare l'esistenza di una correlazione in modo più quantitativo nel rapporto finale.

Appendice A

Concessione di coltivazione idrocarburi “Mirandola” Monitoraggio Sismico - Anno 2019, Relazione n. 2-3

A1_Caratteristiche tecniche della rete di monitoraggio sismico

La rete di monitoraggio sismico del centro olio Cavone si compone delle quattro stazioni CORR, ROCC, ROVE, e SGIA elencate in Tabella 1 e indicate con triangoli viola nella mappa di Figura 2. Sono tutte equipaggiate con strumenti di tipo Dymas 24 della SolGeo (che hanno sostituito i vecchi acquisitori Mars88 della Lennartz con l'aggiornamento delle rete effettuato il 18 dicembre 2018) e sismometro Lennartz LE3D-1s triassiale della Lennartz Electronic. La frequenza di campionamento è di 200 campioni al secondo (passo di 0.005 s) che consentono una risoluzione fino alla frequenza massima di 80 Hz. Con questa conformazione l'attuale rete sismica acquisisce in continuo dati che vengono sincronizzati temporalmente tramite il segnale GPS.

Le otto stazioni della rete sismica nazionale (INGV) che esaminiamo in caso di evento sismico, ad integrazione della rete locale, sono dotate di diversa strumentazione e spaziano dallo short-period (SP), al broad-band (BB), all'accelerometro (AC), qualche stazione si compone di due strumenti collocati, e nel caso della stazione SERM il sensore è posizionato in pozzo ad una profondità di 135 m. Le specifiche tecniche sono riassunte di seguito, ma ricordiamo che tutte le informazioni relative agli strumenti si possono trovare in rete sul sito <http://terremoti.ingv.it/instruments/network/IV>:

- (1) CAVE: BB - Nanometrics Triullium 120s
- (2) FIU: SP - Lennartz LE3D-5s
- (3) FERS: AC - Kinematics Episensor-FBA-ES-T-CL-2G-FS-40-VPP
- (4) MODE: AC - Kinematics Episensor-FBA-ES-T
- (5) NDIM: AC + BB - Kinematics Episensor-FBA-ES-T-CL-2G-FS-40-VPP + Nanometrics Triullium 40s
- (6) RAVA: SP - Lennartz LE3D-5s
- (7) SBPO: AC - Kinematics Episensor-FBA-ES-T-CL-2G-FS-40-VPP
- (8) SERM: AC + SP - Lennartz LE3D-1s — in pozzo: -135m.

A2_Analisi dei dati del secondo trimestre

Nel secondo trimestre del 2019 sono stati registrati e localizzati 8 terremoti locali, il sito LabCavone (<http://labcavone.it/>) riporta 7 eventi. Il bollettino sismico INGV (<http://cnt.rm.ingv.it/>), effettuando una ricerca degli eventi del secondo trimestre 2019 localizzati entro un raggio di 30 km intorno a San Possidonio (parametri concordati nel corso della riunione del tavolo operativo del 10/10/2018) riporta 1 solo evento (il primo del 4 maggio). Gli eventi sono stati

localizzati in base alle letture dei tempi di arrivo delle fasi P ed S effettuate sulle 4 stazioni locali (CORR, ROC, ROVE, SGIA) e principalmente su 3 delle stazioni INGV più vicine (CAVE, NDIM, e RAVA; SERM e SBPO sono state prese in considerazione solo per l'ultimo evento, n.8, localizzato molto più a nord). Il software utilizzato per la localizzazione 1-D della sismicità è HYPOELLIPSE (Lahr, 1999). Il modello di velocità 1-D impiegato è quello creato ad hoc per l'analisi dei dati della rete di monitoraggio del giacimento (Relazioni periodiche, 2017).

In Tabella A1 sono riportati i risultati delle nostre localizzazioni per gli otto eventi disponibili per questo periodo con gli errori corrispondenti. Le localizzazioni degli epicentri sono mostrate in mappa in Figura A1 e nelle sezioni di Figura A2, a confronto con le localizzazioni riportate da LabCavone e dall'INGV.

Tabella A1.

Lista degli 8 eventi registrati e localizzati nel primo trimestre 2019. Le colonne riportano numero dell'evento, data, ora, latitudine, longitudine, profondità, errore orizzontale, errore verticale ed errore quadratico medio.

N	DATA (aaaa-mm-gg)	ORA (UTC)	LAT	LON	DEPTH (km)	ERH	ERZ	RMS
1	2019-05-04	23:01	11.2388	44.8622	14.94	0.7	2.2	0.2114
2	2019-05-12	15:24	11.1203	44.8692	11.22	9.8	5.5	0.1541
3	2019-05-28	20:07	11.0162	44.8808	5.78	0.7	0.4	0.0205
4	2019-06-16	10:49	10.9987	44.8593	7.02	0.3	0.5	0.0594
5	2019-06-18	00:57	11.0707	44.8282	12.10	99	99	0.4555
6	2019-06-18	22:26	11.0212	44.8763	5.62	0.2	0.3	0.0606
7	2019-06-30	17:49	11.0253	44.8755	4.97	0.7	0.5	0.0549
8	2019-06-30	22:59	11.2050	45.1663	24.92	7.7	99	0.3776

Figura A1.

Mappa degli eventi localizzati nel secondo trimestre del 2019. I triangoli viola e verdi identificano le stazioni sismiche della rete locale di Cavone e dell'INGV rispettivamente. I cerchi neri mostrano gli epicentri come calcolati dall'INGV-SPM (Tabella A1), mentre i cerchi rossi o blu rappresentano gli epicentri degli stessi eventi come riportati da LabCavone o nel bollettino INGV. Il contorno blu delimita l'estensione del DI, mentre quello in verde l'estensione del DE, il giacimento è delineato in ocra.

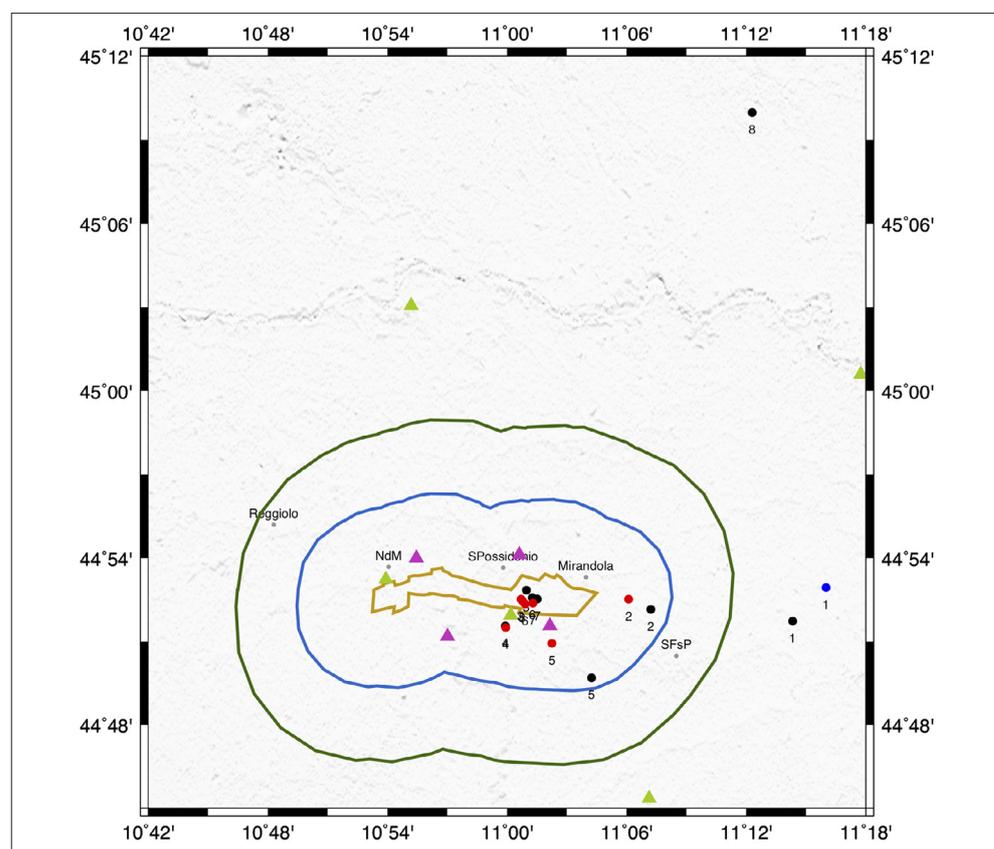
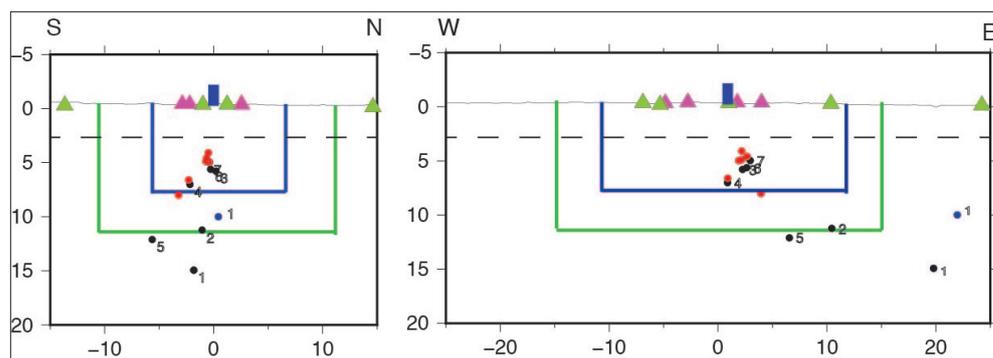


Figura A2.

Sezioni verticali della sismicità localizzata. I cerchi neri rappresentano gli ipocentri calcolati dall'INGV-SPM. I cerchi rossi e blu rappresentano gli ipocentri degli stessi eventi come riportati in LabCavone e INGV rispettivamente. La linea continua orizzontale delinea la superficie del terreno, quella tratteggiata la profondità del giacimento. La linea blu schematizza il contorno del DI, mentre la linea verde schematizza il DE.



Si nota come in genere gli ipocentri corrispondenti allo stesso evento cadano vicini con differenze dettate probabilmente dal diverso software utilizzato e/o dalle inevitabili differenze nelle letture delle fasi P e S. La localizzazione effettuata dall'INGV-SPM e mostrata in questa relazione è probabilmente più accurata grazie all'aggiunta di dati provenienti dalle stazioni della rete nazionale che aiutano a migliorare la soluzione, soprattutto nella determinazione della profondità. Quattro di questi otto eventi ricadono, secondo le nostre localizzazioni, all'interno del DI (Tabella A1, celle ombreggiate; Figure A1 e A2).

A3_Analisi dei dati del terzo trimestre

Nel terzo trimestre del 2019 sono stati registrati e localizzati 13 terremoti locali, il sito LabCavone (<http://labcavone.it/>) riporta 12 eventi. Il bollettino sismico INGV (<http://cnt.rm.ingv.it/>), effettuando una ricerca degli eventi del secondo trimestre 2019 localizzati entro un raggio di 30 km intorno a San Possidonio (parametri concordati nel corso della riunione del tavolo operativo del 10/10/2018) riporta 2 soli eventi (avvenuti il 15 e il 18 luglio). I terremoti sono stati localizzati in base alle letture dei tempi di arrivo delle fasi

Tabella A2.

Lista degli eventi registrati nel terzo trimestre 2019, con i risultati della localizzazione, e gli errori associati, calcolata attraverso l'analisi della SPM. Le celle scure evidenziano gli eventi localizzati dentro il DI.

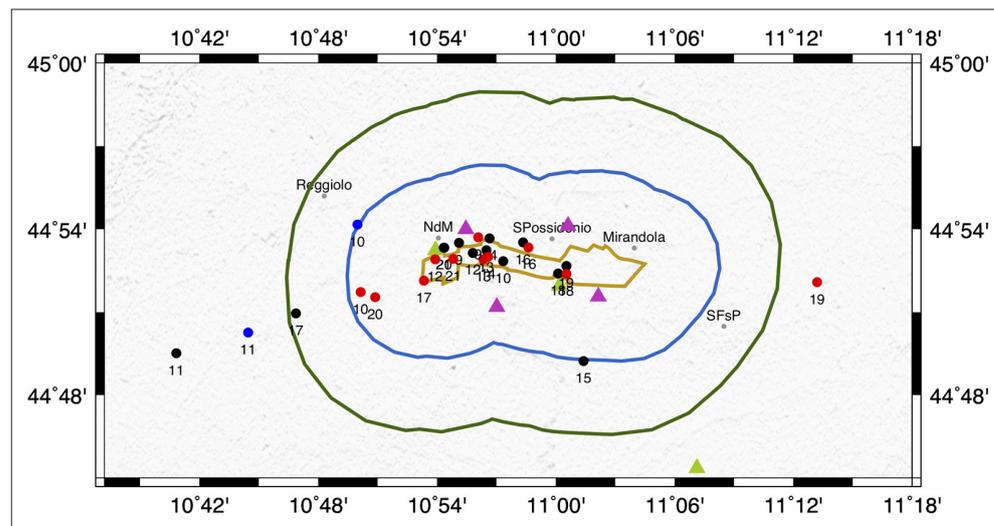
N	DATA (aaaa-mm-gg)	ORA (UTC)	LAT	LON	DEPTH (km)	ERH	ERZ	RMS
9	2019-07-13	04:18	10.9185	44.8918	5.17	0.9	0.6	0.0689
10	2019-07-15	05:48	10.9558	44.8807	11.23	3.1	3.4	0.2593
11	2019-07-18	00:13	10.6805	44.8252	12.81	6.6	99	0.1065
12	2019-07-20	21:08	10.9303	44.8857	4.48	0.3	0.4	0.0781
13	2019-07-27	11:11	10.9415	44.8873	5.95	0.2	0.4	0.0901
14	2019-07-27	11:12	10.9443	44.8945	6.38	0.2	0.4	0.0805
15	2019-07-31	22:49	11.0235	44.8205	8.78	0.3	0.6	0.1438
16	2019-08-18	20:23	10.9725	44.8920	6.22	0.2	0.7	0.0831
17	2019-08-26	04:01	10.7812	44.8492	12.16	99	99	0.4735
18	2019-09-03	00:48	11.0020	44.8733	5.70	0.3	0.3	0.0247
19	2019-09-03	02:49	11.0090	44.8778	6.24	1.3	0.5	0.1353
20	2019-09-18	19:59	10.9062	44.8888	8.66	99	99	0.0069
21	2019-09-18	20:00	10.9057	44.8888	8.54	99	99	0.0040

P ed S effettuate sulle 4 stazioni locali (CORR, ROC, ROVE, SGIA) e su 3 delle stazioni INGV più vicine (CAVE, NDIM, e RAVA). Il software utilizzato per la localizzazione 1-D della sismicità è HYPOELLIPSE (Lahr, 1999). Il modello di velocità 1-D impiegato è quello creato ad hoc per l'analisi dei dati della rete di monitoraggio del giacimento (Relazioni periodiche, 2017).

In Tabella A2 sono riportati i risultati delle nostre localizzazioni per i 13 eventi disponibili per questo periodo con gli errori corrispondenti. Le localizzazioni degli epicentri sono mostrate in mappa in Figura A3 e nelle sezioni di Figura A4, a confronto con le localizzazioni riportate da LabCavone e dall'INGV.

Figura A3.

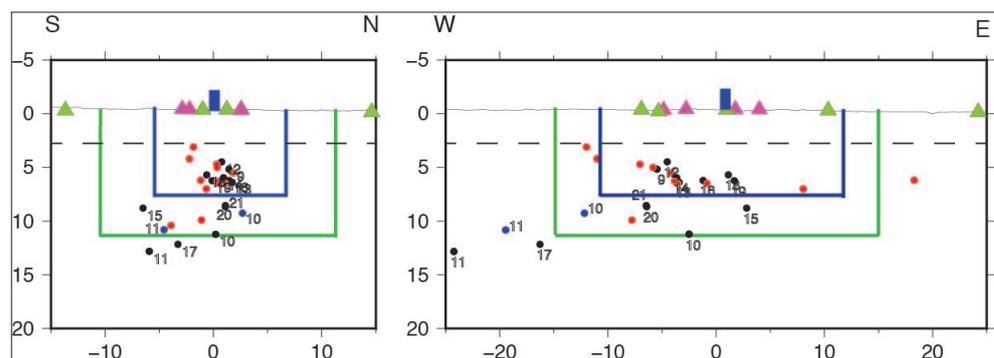
Mappa degli eventi localizzati nel terzo trimestre del 2019. I triangoli viola e verdi identificano le stazioni sismiche della rete locale di Cavone e dell'INGV rispettivamente. I cerchi neri mostrano gli epicentri come calcolati dall'INGV-SPM (Tabella A2), mentre i cerchi rossi e blu rappresentano gli epicentri degli stessi eventi come riportati in LabCavone o INGV. Il contorno blu delimita l'estensione del DI, mentre quello in verde l'estensione del DE. Il giacimento è in ocra.



Si nota come in genere gli ipocentri corrispondenti allo stesso evento cadano vicini con differenze dettate probabilmente dal diverso software utilizzato e/o dalle inevitabili differenze nelle letture delle fasi P e S. La localizzazione effettuata dall'INGV-SPM e mostrata in questa relazione è probabilmente più accurata grazie all'aggiunta di dati provenienti dalle stazioni della rete nazionale che aiutano a migliorare la soluzione, soprattutto nella determinazione della profondità. Sette di questi tredici eventi ricadono, secondo le nostre localizzazioni, all'interno del DI (Tabella A2, celle ombreggiate; Figure A1 e A2).

Figura A4.

Sezioni verticali della sismicità localizzata. I cerchi neri rappresentano gli ipocentri calcolati dall'INGV-SPM. I cerchi rossi e blu rappresentano gli ipocentri degli stessi eventi come riportati in LabCavone e INGV rispettivamente. La linea continua orizzontale delinea la superficie del terreno, quella tratteggiata la profondità del giacimento. La linea blu schematizza il contorno del DI, mentre la linea verde schematizza il DE.

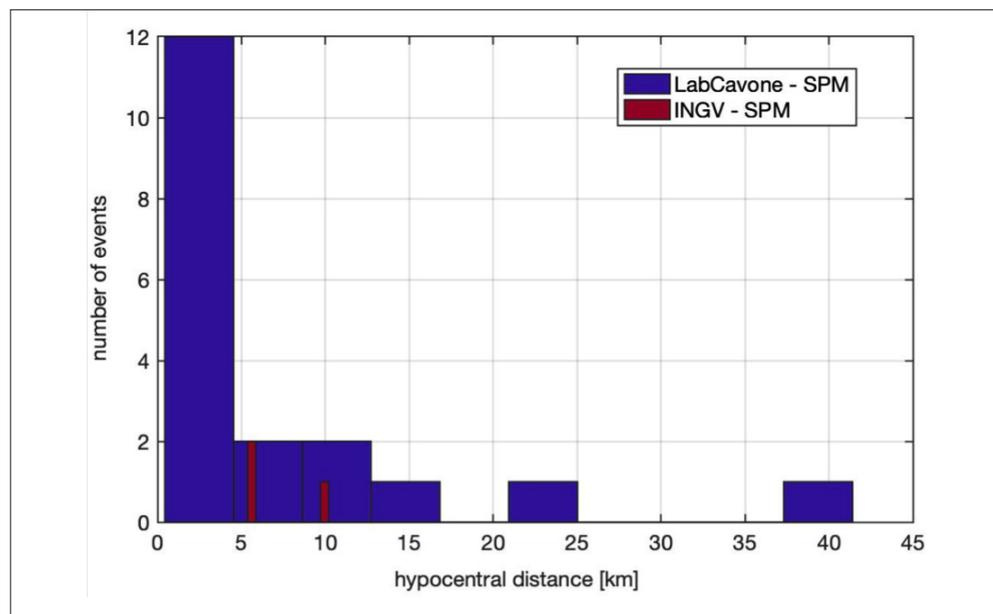


A4_Analisi conclusive

Nel complesso le differenze di localizzazione tra quelle ottenute separando (cataloghi LabCavone e INGV) o integrando (INGV-SPM) le reti sismiche (quella locale di Cavone con quella nazionale), sono minime, per la

Figura A5.

Istogramma delle distanze ipocentrali tra le localizzazioni degli eventi risultanti dai cataloghi LabCavone (barre blu) e INGV (barre rosse) rispetto all'analisi eseguita nella sperimentazione del monitoraggio (INGV-SPM).



maggior parte dei casi meno di 5 km (si vedano Figure A4 e A5). Il parametro che più di tutti è influenzato dal numero di stazioni sismiche prese in considerazione è la profondità ipocentrale che può variare notevolmente come nel caso dell'unico evento (avvenuto il 30/6/2019 alle 22:59) che mostra una distanza tra le diverse localizzazioni di oltre 40 km, 20 dei quali in profondità. Le differenze sono ascrivibili ai diversi metodi di localizzazione utilizzati, al picking delle fasi (altamente soggettivo), e al numero di stazioni sismiche considerate.

Per quanto concerne le magnitudo invece abbiamo differenze di valori dovuti alle diverse scale di magnitudo considerate che si basano su valutazioni indipendenti e non direttamente confrontabili (come accennato in precedenza e ben visibile in Tabella A3). La magnitudo locale M_L si basa infatti sull'ampiezza massima registrata, mentre la magnitudo momento M_w per eventi di bassa energia l'abbiamo calcolata sulla base dello spettro di frequenze con il metodo di Brune (Munafò et al., 2016).

Tabella A3 (continua a pagina seguente).

Elenco dei 21 terremoti locali registrati e analizzati con il confronto dei valori di M_w e M_L calcolati rispettivamente da INGV-SPM e LabCavone o INGV a seconda del catalogo di provenienza (indicato tra parentesi). Le celle ombreggiate evidenziano i terremoti localizzati all'interno del DI, mentre quelle colorate mostrano il corrispondente livello di attivazione del semaforo come da ILG (Figura 5).

N	DATA (aaaa-mm-gg)	ORA (UTC)	M_w	M_L
1	2019-05-04	23:01	2.24	1.9 (INGV)
2	2019-05-12	15:24	1.89	1.3 (LabCavone)
3	2019-05-28	20:07	1.78	1.2 (LabCavone)
4	2019-06-16	10:49	1.78	1.1 (LabCavone)
5	2019-06-18	00:57	1.79	1.2 (LabCavone)
6	2019-06-18	22:26	1.73	1.1 (LabCavone)
7	2019-06-30	17:49	2.25	1.9 (LabCavone)
8	2019-06-30	22:59	2.05	1.6 (LabCavone)
9	2019-07-13	04:18	1.79	1.2 (LabCavone)
10	2019-07-15	05:48	2.32	2.0 (LabCavone)
11	2019-07-18	00:13	2.09	1.7 (INGV)

Tabella A3 (continua da pagina precedente).

N	DATA (aaaa-mm-gg)	ORA (UTC)	Mw	MI
12	2019-07-20	21:08	1.87	1.3 (LabCavone)
13	2019-07-27	11:11	2.22	1.8 (LabCavone)
14	2019-07-27	11:12	2.21	1.8 (LabCavone)
15	2019-07-31	22:49	1.98	1.5 (LabCavone)
16	2019-08-18	20:23	1.61	0.9 (LabCavone)
17	2019-08-26	04:01	1.87	1.3 (LabCavone)
18	2019-09-03	00:48	1.63	0.9 (LabCavone)
19	2019-09-03	02:49	1.97	1.4 (LabCavone)
20	2019-09-18	19:59	1.82	1.2 (LabCavone)
21	2019-09-18	20:00	1.59	0.9 (LabCavone)

Dalla Tabella A3 si nota subito come i valori di Mw siano sensibilmente più elevati dei corrispondenti valori di MI, tanto da far scattare livelli di attivazione del semaforo differenti. La questione non è di semplice soluzione e va discussa e valutata attentamente in sede di definizione del DGOM.

La PGA e la PGV sono state calcolate dopo aver effettuato la correzione strumentale come il valore massimo in valore assoluto. Seguendo gli ILG abbiamo riportato in Tabella 2 il valore massimo registrato tra tutte le componenti (E, N, e Z). Si segnala però che gli ILG fanno riferimento ai valori usati per le *shakemap*, il cui codice nelle più recenti versioni prende in considerazione il valore massimo delle sole componenti orizzontali (come deducibile consultando una mappa sul sito <http://shakemap.rm.ingv.it/shake/23558121/intensity.html>), auspichiamo quindi un aggiornamento degli ILG in tale senso. Analizzando poi i valori registrati a tutti i sensori disponibili delle stazioni INGV, che in qualche caso ospitano sia velocimetro che accelerometro (si veda elenco in Appendice A1), abbiamo riscontrato che i valori di picco agli accelerometri potrebbero non essere affidabili per eventi di così bassa energia: ci riserviamo di analizzare meglio la questione in futuro. Per questo motivo qui riportiamo PGA e PGV stimate dai segnali dei velocimetri.

Glossario

MiSE:	Ministero dello Sviluppo Economico.
DGS:	Direzione Generale per la Sicurezza anche ambientale delle attività minerarie ed energetiche.
UNMIG:	Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse.
RER:	Regione Emilia-Romagna.
INGV:	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
ILG:	Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio.
SPM:	Struttura Preposta al Monitoraggio (nel caso di Cavone l'INGV, come da protocollo operativo firmato il 15/11/2016).
DI:	Dominio Interno di rilevazione definito nelle ILG come il volume che si estende fino in superficie incluso la zona mineralizzata (giacimento) e un'ulteriore fascia che si estende ai lati e sotto fino ad una distanza di 5 km del giacimento stesso (nel caso di Cavone in cui è prevista reiniezione all'interno del giacimento).
DE:	Dominio Esteso di rilevazione definito nelle ILG come il volume incluso tra 5 e 10 km dal bordo del DI.

Bibliografia

- Carminati, E., D. Scrocca, and C. Doglioni (2010). Compaction-induced stress variations with depth in an active anticline: Northern Apennines, Italy. *Journal of Geophysical Research*, 115 (B02401); <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006395>.
- Fantoni, R., and R. Franciosi (2010). Tectono-sedimentary setting of the Po Plain and Adriatic foreland. *Rendiconti Lincei - Scienze Fisiche e Naturali*, 21 (Suppl. 1), 197–209; <https://doi.org/10.1007/s12210-010-0102-4>.
- ILG (2014). Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche; <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/dettaglio-notizia.asp?id=238>.
- Lahr, J.C. (1999; revised 2012). HYPOELLIPSE: a computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern. U.S. Geological Survey Open-File Report 99–23, version 1.1, 119 p. and software, available at <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023/>.
- Munafò, I., L. Malagnini and L. Chiaraluce (2016). On the relationship between Mw and ML for small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(5), 2402–2408; doi:10.1785/0120160130.
- Relazioni periodiche (2017). Relazioni periodiche sui risultati del monitoraggio - Concessione di coltivazione "Mirandola" (Campo di Cavone) - Anno 2017.
- Reutter, K.J., P. Giese and H. Closs (1980). Lithospheric split in the descending plate: observations from the Northern Apennines. *Tectonophysics*, 64 (1–2), T1–T9; [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(80\)90254-1](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(80)90254-1).



CMS
CENTRO DI MONITORAGGIO
DELLE ATTIVITÀ DI SOTTOSUOLO