

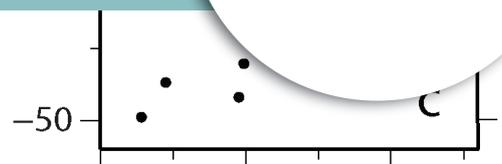
QUADERNI di GEOFISICA

La sismicità del Montefeltro
(Appennino settentrionale, Italia centrale)
nel periodo 2005-2017



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

157



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
Barbara ANGIONI

redazionecen@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

La sismicità del Montefeltro
(Appennino settentrionale, Italia centrale)
nel periodo 2005-2017

*Seismicity of the Montefeltro area
(northern Apennines, central Italy)
in the period 2005-2017*

Antonella Megna¹, Giovanni Battista Cimini², Alessandro Marchetti² e Stefano Santini³

¹INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Sismologia e Tettonofisica

²INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Nazionale Terremoti

³Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo" | Dipartimento di Scienze Pure e Applicate

Accettato 4 settembre 2019 | Accepted 4 September 2019

Come citare | How to cite Megna A. et al., (2019). La sismicità del Montefeltro (Appennino settentrionale, Italia centrale) nel periodo 2005-2017. Quad. Geofis., 157: 1-26.

In copertina Mappa delle sequenze riesaminate | Cover Map of the re-examined clusters

157

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	7
1. Il data set 2005-2017	9
2. Rilocalizzazione, distribuzione e caratteristiche principali della sismicità	10
3. Analisi delle sequenze	11
3.1 Declusterizzazione del <i>data set</i>	11
3.2 Andamento vs tempo delle sequenze 2005 e 2006	18
3.3 <i>b-value</i>	20
4. Note conclusive e futuri sviluppi	21
Ringraziamenti	22
Bibliografia	22

La sismicità del Montefeltro (Appennino settentrionale, Italia centrale) nel periodo 2005-2017

In questo articolo viene esaminata la sismicità del Montefeltro, una regione storica dell'Appennino settentrionale, nell'Italia centrale. L'analisi si concentra sull'attività sismica avvenuta nel periodo 2005-2017, periodo durante il quale la Rete Sismica Nazionale (RSN) ha avuto nella regione un sostanziale miglioramento. Il *data set* selezionato consiste di 402 eventi per un totale di circa 7000 tempi di arrivo di fasi P e S. Gli eventi sono stati integrati con nuove letture e rilocalizzati con il programma Hypoellipse. I risultati mostrano una sismicità di fondo sporadica, sebbene piuttosto diffusa nell'area, contrassegnata da tre piccole sequenze fortemente *clusterizzate* nel tempo e nello spazio. Le più importanti sono avvenute nel settembre-ottobre 2005 (magnitudo massima $M_L=3.2$) e nell'agosto-settembre 2006 (magnitudo massima $M_L=3.7$), rispettivamente nei dintorni dei comuni di Macerata Feltria e Casteldelci. L'evoluzione spazio-temporale di questi due episodi evidenzia un rilascio di energia tipico degli sciame sismici. Un'altra peculiare caratteristica del *pattern* di sismicità è rappresentata dall'occorrenza di eventi anche nella crosta inferiore e nel mantello superiore fino a profondità di almeno 50 km.

Seismicity of the Montefeltro area (northern Apennines, central Italy) in the period 2005-2017

In this paper we examine the seismicity of Montefeltro, an historical region of northern Apennines in central Italy. The analysis focuses on the seismic activity occurred in the period 2005-2017 to exploit the substantial improvement of the National Seismic Network (RSN) in the region. We collected P and S phases from 402 earthquakes for a total of about 7000 arrival times. Earthquakes were integrated with new pickings and relocated using the Hypoellipse code. The results show a sporadic, rather diffuse background seismicity marked by three small seismic sequences strongly clustered in time and space. The most important occurred in September-October 2005 ($M_L=3.2$) and August-September 2006 ($M_L=3.7$), in the neighbourhood of the towns of Macerata Feltria and Casteldelci, respectively. The spatio-temporal evolution of these main episodes highlights an energy release consistent with swarm-like activity. Another major feature of the seismicity pattern is represented by the occurrence of events even in the lower crust and in the upper mantle down to at least 50 km depth.

Introduzione

Il territorio del Montefeltro comprende la parte occidentale dell'attuale provincia di Rimini, in Emilia-Romagna, e la parte settentrionale della provincia di Pesaro-Urbino, nelle Marche (Figura 1). Da un punto di vista amministrativo include i comuni che ricadono nelle parti medio-alte delle valli del Marecchia (Novafeltria, S. Agata Feltria, Casteldelci, etc.) e del Foglia

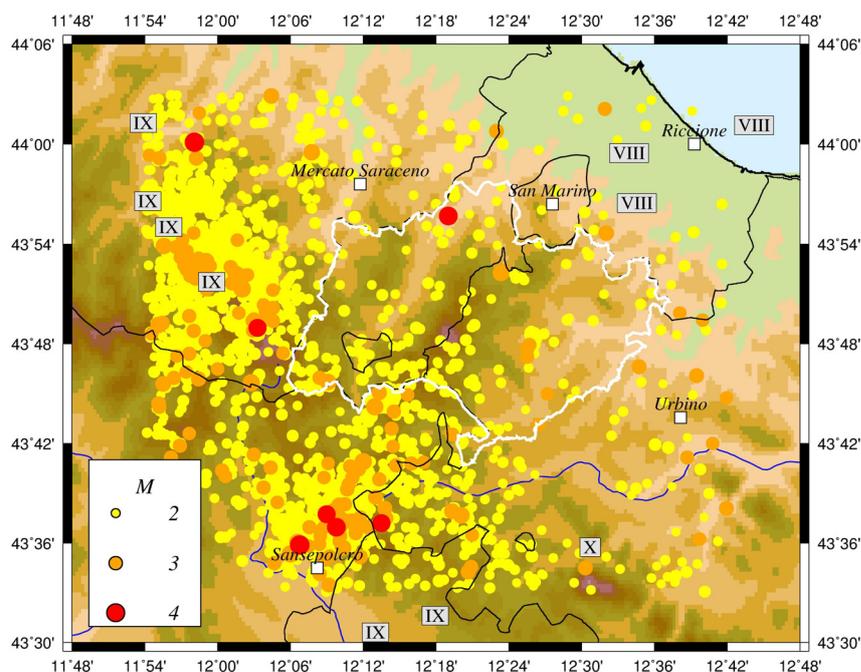


Figura 1 Sismicità del Montefeltro (area delimitata in bianco) e zone limitrofe dal 1/1/1985 al 31/12/2017 [database ISIDe - <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/>]. Sono mostrati gli eventi di magnitudo $M \geq 2$. Il colore e la dimensione dei cerchi enfatizzano le magnitudo osservate. I rettangoli mostrano la sismicità storica con $I_0 \geq VIII$ [catalogo CPTI15, Rovida et al., 2016].

Figure 1 Seismicity of the Montefeltro region (white bounded area) and surrounding zones from January 1, 1985 to December 31, 2017 [ISIDe database - <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/>]. Circles show $M \geq 2$ events. The dimension of the circles and the colour emphasize the observed magnitudes. Rectangles display historical seismicity ($I_0 \geq VIII$) from the CPTI15 Parametric Catalogue of Italian Earthquakes [Rovida et al., 2016].

(Tavoletto, Macerata Feltria, Sassocorvaro, etc.). La sismicità di questa regione dell'Appennino settentrionale è fortemente concentrata, come in altri settori della dorsale, al disotto della catena stessa, con la maggior parte degli eventi localizzati tra 5 e 15 km di profondità. Tra la catena e la costa adriatica delle due province la sismicità è piuttosto diffusa e, salvo alcune fasi di attività più intensa, sporadica nel tempo. La Figura 1 mostra la sismicità rilevata dalla Rete Sismica Nazionale (RSN) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel periodo gennaio 1985 - dicembre 2017. Sono raffigurati oltre 2000 terremoti di magnitudo maggiore o uguale a 2 avvenuti nel Montefeltro (la regione delimitata in bianco) e zone limitrofe. Come si può osservare, le magnitudo sinora riscontrate sono sostanzialmente medio-basse, con quella degli eventi più forti inferiore a 4.5. Tra questi, l'unico con epicentro nel Montefeltro, a circa 5 km a nord-est di Novafeltria, è quello del primo agosto 2000 di magnitudo 4.2 [database ISIDe - ISIDe working group 2016 - <http://iside.rm.ingv.it>]. La pericolosità sismica della regione è classificata medio-alta (zona 2), corrispondentemente a valori dell'accelerazione massima - con probabilità di superamento del 10% in 50 anni - compresi tra 0.175g e 0.200g [Mappa di pericolosità sismica, 2006 - <http://zonesismiche.mi.ingv.it>]. Un altro elemento che caratterizza il *pattern* di sismicità è l'osservazione di terremoti subcrostali che si estendono nel mantello superiore fino ad una profondità di circa 70 km e con epicentri che seguono la curvatura dell'arco Appenninico settentrionale (es. Figura 2.5 in Cimini and Marchetti, [2006]). La presenza di questa zona sismogenetica profonda è stata collegata alla parte più superficiale della litosfera Adriatica in

Data	Località	Lat (N)	Lon (E)	IO	Mw
1918-11-10	Appennino Forlivese	43.917	11.933	IX	6.0
1916-08-16	Riminese	44.019	12.737	VIII	5.8
1789-09-30	Alta Val Tiberina	43.510	12.217	IX	5.9
1786-12-25	Riminese	43.991	12.565	VIII	5.7
1781-06-03	Cagliese	43.596	12.512	X	6.5
1768-10-19	Appennino Forlivese	43.943	11.904	IX	6.0
1672-04-14	Riminese	43.941	12.576	VIII	5.6
1661-03-22	Appennino Forlivese	44.021	11.898	IX	6.1
1584-09-10	Appennino Forlivese	43.862	11.992	IX	6.0
1389-10-18	Alta Val Tiberina	43.527	12.299	IX	6.0

Tabella 1 Parametri della sismicità storica mostrata in Figura 1.

Table 1 Parameters of the historical seismicity shown in Figure 1.

subduzione sotto tale settore della catena lungo una direzione NE-SW [Carminati et al., 2002; Cimini and Marchetti, 2006]. Nella Figura 1 è rappresentata, inoltre, anche la sismicità storica più significativa i cui parametri, estratti dal recente catalogo CPTI15 [Rovida et al., 2016], sono riassunti nella Tabella 1. Nell'ambito del distretto sismico in oggetto va annoverata peraltro la sequenza sismica del maggio-giugno 2011, con epicentro nei comuni di Bagno di Romagna, S. Sofia e Sarsina della provincia di Forlì-Cesena [Moretti et al., 2011]

In questo Quaderno si presentano le caratteristiche di rilievo della sismicità del Montefeltro partendo dalle registrazioni acquisite dalla RSN nel periodo 2005-2017. Lo studio si articola sulla descrizione delle principali analisi sismologiche effettuate: costituzione del *data set* delle fasi sismiche, rilocalizzazione degli eventi e loro distribuzione spaziale, definizione ed evoluzione spazio-temporale dei *clusters*, calcolo del *b-value*. I risultati fanno emergere alcune fasi di attività sismica intensa, occorse nella zona di Macerata Feltria (PU) e di Casteldelci (RN) con magnitudo locale massima di 3.2 e 3.7, rispettivamente. Più a Nord-Est, verso l'Adriatico, essi confermano l'approfondimento dello strato sismogenetico, con nuclei di eventi osservati a cavallo della transizione crosta-mantello a profondità tra 30 e 50 km. La ricerca svolta è intesa essere propedeutica per future indagini volte ad ottenere un quadro sismotettonico più dettagliato per l'aria di interesse. A tal fine è considerata importante la necessità di incrementare ulteriormente il monitoraggio sismico della regione, attraverso l'installazione di nuove stazioni permanenti e/o di reti di rilevazione temporanee come nel lavoro si prospetta.

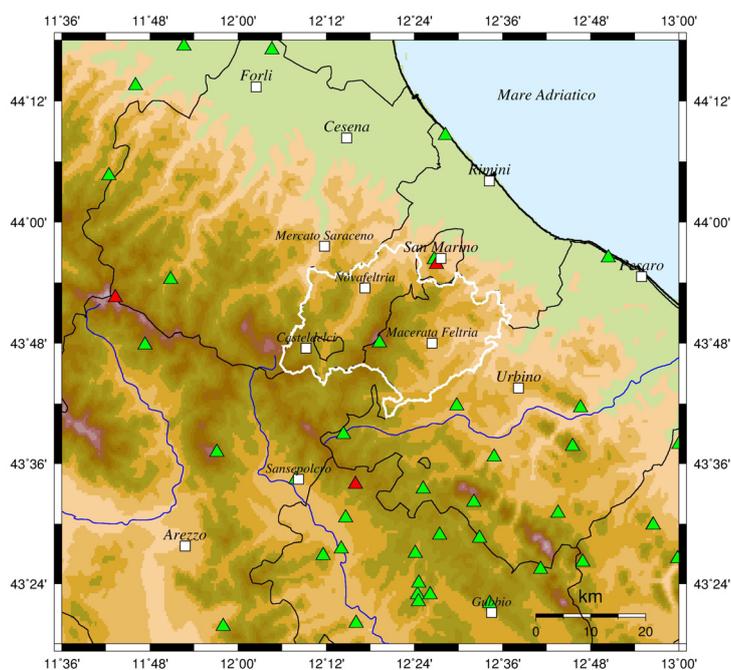
1. Il data set 2005-2017

A partire dal 2003, anno in cui furono installate le prime stazioni con sensori a banda estesa del tipo Lennartz LE3D/5s (FSSB-Fossombrone, PESA-Pesaro e PIEI-Cagli), la RSN nella regione che include il Montefeltro è stata modernizzata nella trasmissione dei dati e potenziata nella copertura dei siti con nuove stazioni permanenti anche a larga banda (alcuni esempi sono APEC-

Apecchio, Trillium 40s e RSM2-San Marino, Trillium 120s). Tale miglioramento, sebbene ancora non completamente realizzato, ha portato nel corso dell'intervallo temporale considerato ad una detezione sempre più alta della sismicità di fondo, con una soglia di magnitudo minima che, ad oggi, è pari all'incirca a 1.0. L'attuale configurazione della RSN nel settore dell'Appennino settentrionale in esame è mostrata nella Figura 2 e consta di 37 stazioni. Nella composizione del *data set* si è tenuto conto delle registrazioni acquisite entro 300 km dal centro di tale distribuzione (Lat 43.8°N, Lon 12.3°E). In base a questo criterio e con un numero minimo di fasi per evento posto uguale a 5 sono stati collezionati 445 terremoti, per un totale di oltre 7000 tempi di arrivo. L'area entro cui ricadono gli epicentri estratti comprende il Montefeltro, la parte delimitata in bianco nella Figura 2, e una fascia delle zone circostanti larga circa 10 km. Dopo un primo *run* del programma di localizzazione, l'insieme è stato integrato con un 5% circa di *picking* nuovi o rideterminati (essenzialmente fasi S), aggiunti per migliorare le soluzioni ipocentrali nei casi più difficili caratterizzati da una geometria della rete insufficiente e parametri focali mal vincolati. Questo procedimento è servito anche a selezionare il *data set* finale che, in definitiva, consta di 402 eventi, per un numero complessivo di arrivi pari a 6736, di cui 3826 di fasi P e 2910 di fasi S.

Figura 2 Stazioni della RSN (triangoli verdi) nell'area dell'Italia centrale che comprende il Montefeltro (area delimitata in bianco). I triangoli rossi indicano le stazioni che non sono più operative.

Figure 2 Seismic stations (green triangles) in the area of Central Italy including Montefeltro (white contoured area). Red triangles indicate closed stations.



2. Rilocalizzazione, distribuzione e caratteristiche principali della sismicità

La rilocalizzazione della sismicità del Montefeltro è stata eseguita con il codice di calcolo Hypoellipse [Lahr, 1999]. Questo programma è largamente utilizzato nella ricerca sismologica potendo determinare, oltre agli ipocentri e al tempo origine degli eventi, anche altri parametri quali il rapporto V_p/V_s , la magnitudo locale e i meccanismi focali tramite le polarità dei primi arrivi. Le soluzioni ipocentrali possono essere calcolate contemporaneamente con più modelli di velocità, sia comuni a tutte le stazioni, sia associati a gruppi di esse nel caso in cui la struttura crostale sottostante la rete sismica sia conosciuta con un certo dettaglio. Il suo utilizzo è particolarmente appropriato in regioni dove la profondità degli eventi varia dalla superficie a 100 km di profondità e oltre. Per ottimizzare la determinazione di tale parametro, Hypoellipse prevede una particolare opzione, chiamata *Global Option*, che attiva la ricerca del minimo globale

della funzione che descrive lo scarto quadratico medio dei residui (*root mean squared residual - rms*) con la profondità, una volta che le coordinate epicentrali rimangono stabili al proseguire del processo iterativo.

Il modello di velocità 1-D utilizzato nella presente ricerca si basa sullo studio di Santini et al. [2011] sui meccanismi focali delle Marche centro-settentrionali. I parametri che definiscono il profilo di velocità sono indicati nella Tabella 2. Lo strato tra 35 e 100 km, inserito per la sismicità subcrostale della zona, raccorda la struttura di velocità crostale con quella della parte più superficiale del mantello superiore così come definita nei modelli sferici globali tipo iasp91, ak135 [Kennett et al., 1995]. Tra i vari modelli testati, il modello descritto è quello che ha prodotto i migliori risultati in termini di qualità delle soluzioni e di *rms* medio.

Layer	Depth (km)	V _p (km/s)	V _p /V _s
1	0.0	5.7	1.78
2	12.0	6.0	1.78
3	18.0	6.2	1.78
4	26.0	6.7	1.78
5	35.0	7.5	1.78
6	100.0	8.0	1.78

Tabella 2 Modello di velocità 1-D usato per la rilocalizzazione dei terremoti.

Table 2 1-D velocity model used for earthquakes relocation.

La Tabella 3 fornisce un *summary* dell'applicazione di Hypoellipse al data set del Montefeltro. In essa, accanto alla qualità della soluzione, sono riportati il valore massimo dell'errore nella direzione meno vincolata (come definito nel programma) e il numero di eventi che nel nostro caso hanno soddisfatto tale condizione. SEH e SEZ danno una stima rispettivamente del maggiore dei semi-assi orizzontali e del semi-asse verticale dell'ellissoide dell'errore ipocentrale per un livello di confidenza del 68% [Lahr, 1999]. Il rapporto V_p/V_s è calcolato su tutte le coppie di fasi P e S disponibili e con errori associati ad entrambi gli arrivi. Gli errori in oggetto sono determinati dai pesi assegnati alle singole letture secondo lo schema riportato.

Qualità	Errore massimo tra SEH e SEZ	N
A	≤ 1.34	167
B	≤ 2.67	126
C	≤ 5.35	84
D	> 5.35	25
<i>rms</i> medio = 0.20s (402 eventi); V_p/V_s medio = 1.81 (363 eventi); <i>St. dev.</i> = 0.39		
Picking accuracy	Weight Code: 0 1 2 3	
	Standard Error (s): 0.1 0.25 0.50 1.00	

Tabella 3 Risultati della rilocalizzazione dei terremoti con Hypoellipse.

Table 3 Results of Hypoellipse earthquakes relocation.

La Figura 3 mostra la mappa dei nuovi epicentri unitamente alle tracce delle *cross-section* di cui alle successive Figure 4 e 5. In giallo è rappresentata la sismicità di fondo mentre gli altri colori evidenziano gli eventi associati alle fasi di maggiore attività. La sequenza di Macerata Feltria è marcata da tre scosse di magnitudo $M_L \geq 3.0$ (cerchi con il bordo in nero) ed appare più circoscritta nello spazio rispetto a quella di Casteldelci, contraddistinta invece da due scosse di rilievo ($M_L=2.8$ e $M_L=3.7$) registrate il 29 e il 30 agosto a poche ore l'una dall'altra. In entrambi i casi, comunque, gli eventi più forti (di magnitudo 3.2 e 3.7 rispettivamente) sono avvenuti nella fase intermedia degli episodi, come tipicamente accade negli sciami di terremoti [Fisher et al., 2014]. Nel caso poi di Macerata Feltria, il comportamento *swarm-like* del *cluster* è ulteriormente enfatizzato dalla sua evoluzione temporale che non presenta una scossa principale dominante ma piuttosto una serie di terremoti di magnitudo similari. Sciami sismici ricorrenti sono frequentemente osservati lungo gli Appennini [Frepoli et al., 2017], spesso concentrati nella crosta superiore in intervalli di profondità di alcuni chilometri, e generalmente associati a processi che coinvolgono la migrazione dei fluidi ivi presenti [Hainzl et al., 2012]. Le Figure 4 e 5 raffigurano la distribuzione in verticale degli eventi rilocalizzati. Nella Figura 4 sono mostrati i profili AA' e BB' attraverso il *cluster* di Macerata Feltria, mentre nella Figura 5 sono mostrati i profili CC' e DD' attraverso i *cluster* di Casteldelci. I diagrammi sono integrati con la topografia dell'Appennino settentrionale, le stazioni della RSN entro 25 km dalla traccia (triangoli verdi) e l'andamento della Moho dal modello EuCRUST-07 [Tesauro et al., 2008]. Come nella Figura 3, i cerchi con il bordo in nero indicano gli eventi di magnitudo $M_L \geq 3.0$ (5 eventi) avvenuti nel periodo in esame. La sismicità dei *clusters* appare concentrata in un volume di crosta che arealmente non supera i 50 km² ma che in verticale si estende per almeno 25 km, tra 5 e 30 km di profondità. Nelle due *cross-sections* anti-appenniniche (AA' e CC') si

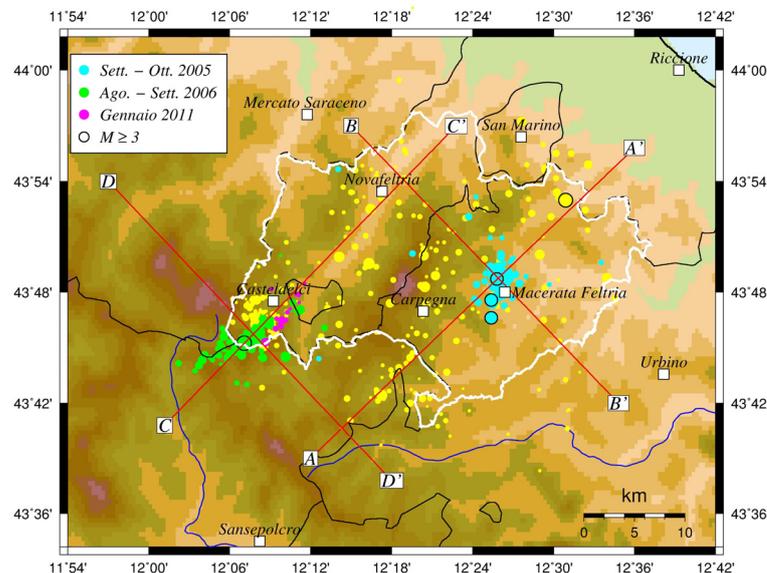


Figura 3 Sismicità di fondo (in giallo) e sequenze sismiche nel Montefeltro nel periodo 2005-2017. In celeste è raffigurata la sismicità rilevata nel periodo settembre–ottobre 2005 durante la sequenza di Macerata Feltria (PU), in verde quella del periodo agosto–settembre 2006 nel corso della sequenza di Casteldelci (RN), e in magenta il piccolo *burst* di eventi del 26-27 gennaio 2011, sempre nei dintorni di Casteldelci. I cerchi con il bordo in nero indicano gli eventi di magnitudo $M_L \geq 3.0$.

Figure 3 Background seismicity (yellow circles) and seismic sequences in the Montefeltro area in the period 2005-2017. In light blue and green the Macerata Feltria (September-October 2006) and the Casteldelci (August-September 2006) seismic sequences, respectively. In magenta the small *burst* occurred around Casteldelci between 26 and 27 January 2011. Black contoured circles are the events with $M_L \geq 3.0$.

osserva, inoltre, un evidente approfondimento degli ipocentri passando dal crinale della catena alle zone esterne verso l'Adriatico. In particolare, nella fascia tra il Montefeltro e San Marino, risultano localizzati quasi tutti gli eventi subcrostali del data set (*cross-section BB'*), fino ad una profondità massima di 50 km. Questo risultato conferma il differente comportamento nel rilascio sismico della regione tra il dominio orientale del settore appenninico in studio e le aree più interne dove la distribuzione degli eventi risulta confinata nei primi 10-15 km [Piccinini et al., 2009].

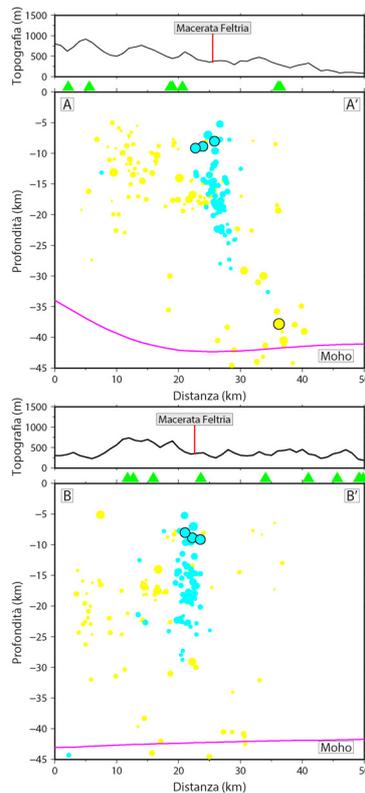


Figura 4 Sismicità del Montefeltro lungo i profili AA' e BB'. In celeste gli eventi del periodo dello sciame sismico del 2005. I cerchi con il bordo in nero indicano gli eventi di magnitudo $M_L \geq 3.0$.

Figure 4 Montefeltro seismicity along cross-sections AA' and BB'. The events recorded during the 2005 seismic swarm are displayed in light blue. Black contoured circles are the events with $M_L \geq 3.0$.

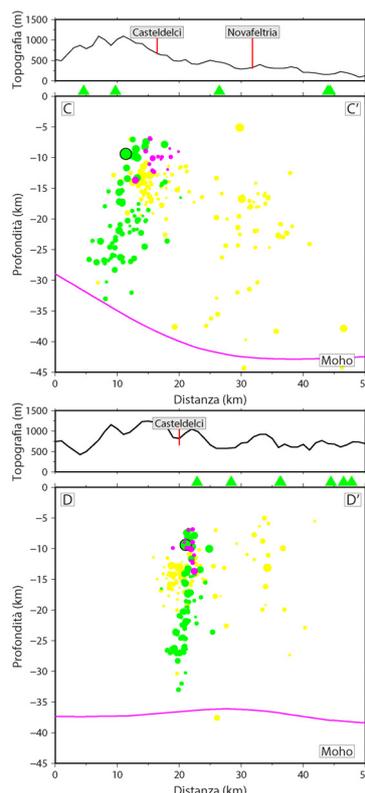


Figura 5 Sismicità del Montefeltro lungo i profili CC' e DD'. In verde gli eventi del periodo dello sciame sismico del 2006. In magenta il *burst* di eventi del gennaio 2011. I cerchi con il bordo in nero indicano gli eventi di magnitudo $M_L \geq 3.0$.

Figure 5 Montefeltro seismicity along cross-sections CC' and DD'. Green circles represent the events occurred during the 2006 seismic swarm. Magenta circles are the January 2011 earthquakes burst. Black contoured circles are the events with $M_L \geq 3.0$.

Per gli eventi con $M_L \geq 3.1$ si sono calcolati i meccanismi focali utilizzando il metodo delle polarità dei primi arrivi P tramite il programma FPFIT [Reasenberg and Oppenheimer, 1985]. In particolare vengono mostrati i risultati di tre eventi superficiali, di cui due tra quelli principali della sequenza del 2005 e l'unico evento principale della sequenza del 2005, ed un evento isolato avvenuto nel 2015 nella zona più a NE dell'area esaminata con una profondità subcrostale. Per i quattro terremoti esaminati i meccanismi focali sono di tipo *strike-slip* (Tab. 4), con un *rms* medio di 0.21s per la soluzione dei piani di faglia e con un range di incertezza minore di 20° per gli angoli di *strike*, *dip* e *rake*; inoltre i meccanismi ottenuti risultano perfettamente compatibili con quelli calcolati nella stessa zona da precedenti studi [Frepoli and Amato, 1997; Piccinini et al., 2009]. Per i due eventi della sequenza del 2005 entrambi gli assi *P* e *T* sono per lo più orizzontali (*plunge* minore di 20°) con una direzione SW e NW per l'asse principale, mentre per l'evento della sequenza del 2006 il *plunge* dell'asse *P* è circa 30° con direzione verso *E* ed il *plunge* dell'asse *T* è circa 2° con direzione *N*. Per l'evento più profondo l'asse di massimo stress (*P*) ha una direzione vicino al *N* con un *plunge* di circa 30°, mentre il *plunge* dell'asse *T* è quasi orizzontale (circa 10°). Ciò conferma il regime trascorrente dei quattro eventi presi in considerazione [Zoback, 1992].

data evento	meccanismo focale	Lon	Lat	prof. (km)	M_L	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	n. pol.	n. discre.	azimut/plunge (°)	
											P-asse	T-asse
18/09 /2005		12.442	43.780	8.8	3.1	295	85	-40	16	4	246/19	342/15
07/10 /2005		12.442	43.825	8.0	3.2	65	75	-160	12	5	287/15	197/2
30/08 /2006		12.129	43.756	9.4	3.7	125	60	-30	21	6	90/30	357/2
11/11 /2015		12.505	43.905	37.8	3.5	20	50	-20	43	8	330/28	247/10

Tabella 4 Meccanismi focali determinati tramite il codice FPFIT per gli eventi di magnitudo $M_L \geq 3.1$. Data degli eventi, meccanismi focali, longitudine, latitudine, profondità, magnitudo, *strike*, *dip* e *rake* dei primi piani nodali, numero di polarità, numero di discrepanze, azimut e *plunge* degli assi *P* e *T*.

Table 4 Focal mechanisms calculated with the FPFIT code for the events with $M_L \geq 3.1$. Date of the events, focal mechanisms, longitudes, latitudes, depths, magnitudes, strikes, dips and rakes of the first nodal planes, number of the polarities, number of the discrepant observations, azimuths and plunges of *P*- and *T*-axes.

3. Analisi delle sequenze

3.1 Declusterizzazione del data set

L'andamento del numero cumulativo degli eventi nell'area del Montefeltro in funzione del tempo evidenzia, oltre la presenza di due cospicui incrementi di sismicità alla fine sia del 2005 che del 2006 e di uno meno cospicuo all'inizio del 2011, una serie di piccoli incrementi (Figura 6)

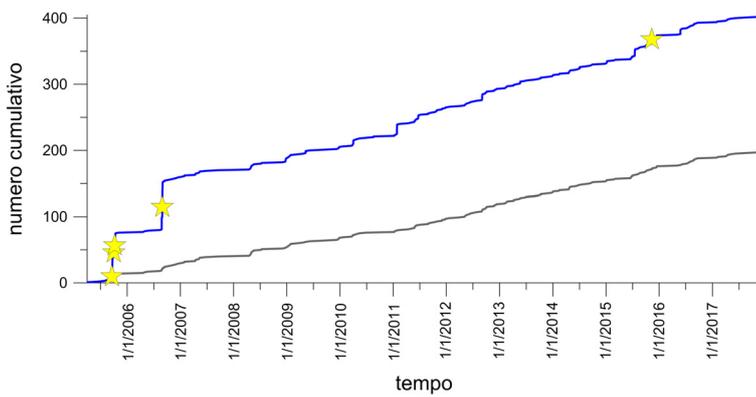


Figura 6 Numero cumulativo degli eventi in funzione del tempo per il catalogo rilocalizzato (linea blu) e il catalogo declusterizzato (linea grigia) nell'area del Montefeltro. Le stelle indicano gli eventi di magnitudo $M_L \geq 3.0$.

Figure 6 Cumulated number of the events versus time for the relocated catalogue (blu line) and for the declustered catalogue (grey line) in the area of Montefeltro. The stars are the events of magnitude $M_L \geq 3.0$.

suggerendo la presenza di possibili sequenze con un numero molto esiguo di eventi *clusterizzati*. Per l'individuazione anche delle sequenze più piccole è stato applicato il metodo di Reasenberg [1985] tramite il *software* ZMAP [Wiemer, 2001], scegliendo per i parametri degli opportuni valori iniziali e facendoli variare in determinati range di valori (Tab. 5). Per i parametri τ_{min} e τ_{max} , intervalli di tempo minimo e massimo di attesa nell'osservare un successivo evento con una certa probabilità P , si è scelto il valore *standard* di 1 giorno per il primo, mentre per il secondo si è considerato l'inverso del *rate* medio del catalogo (calcolato su tratti della cumulativa con gradiente costante e in seguito verificato su quella *declusterizzata* - linea grigia in Figura 6) da cui risulta il valore di circa 20 giorni. La scelta per il parametro R_{fact} , lunghezza di scala per individuare la zona in cui si considera un evento appartenente al *cluster*, è stata di 5 km. Gli errori orizzontali e verticali (ERH=1 km; ERZ=2 km) sono gli errori definiti dalla analisi di rilocalizzazione per gli eventi con qualità A. L'incremento in magnitudo di completezza x_k in presenza di una sequenza è stato imposto pari a 0, essendo sequenze con magnitudo molto basse la magnitudo di completezza x_{meff} non dovrebbe aumentare dal valore 1.4 determinato dal calcolo della Gutenberg-Richter del catalogo selezionato. Infine per la probabilità si è scelto il valore *standard* $P=0.95$. Da questi valori iniziali dei parametri si sono considerate diverse *declusterizzazioni* facendo variare questi parametri in determinati *range*, come indicato nella Tabella 5.

L'analisi della *declusterizzazione* ha messo in evidenza dai 17 ai 21 clusters tra sequenze principali, sottosequenze e coppie di eventi che avvengono a poche ore di distanza l'uno dall'altro e con ipocentri molto vicini, individuando dai 181 ai 206 eventi *clusterizzati*. In Tabella 6a viene mostrata l'uscita di ZMAP elencando solo le sequenze con almeno 6 eventi *clusterizzati*, avendo imposto ai parametri i valori con i quali è stato ottenuto il numero massimo di sequenze: $\tau_{min} = 1$, $\tau_{max} = 20$, $P = 0.95$, $x_k = 0.0$, $x_{meff} = 1.4$, $R_{fact} = 30$, ERH = 1.5 e ERZ = 2.0.

parametro	valore iniziale	valore minimo	valore massimo
τ_{min} (gg)	1	1	1
τ_{max} (gg)	20	10	20
P	0.95	0.90	0.99
x_k	0.0	0.0	0.5
x_{meff}	1.4	1.4	1.5
R_{fact} (km)	5	5	30
ERH (km)	1.0	1.0	2.0
ERZ (km)	2.0	2.5	5.0

Tabella 5 Valori iniziali e range di variazione dei parametri utilizzati nell'applicazione dell' algoritmo di Reasenberg sul catalogo dei terremoti rilocalizzato.

Table 5 Starting values and ranges of parameters used in applying the Reasenberg's algorithm on the relocated earthquakes catalogue.

Nelle prime righe del *summary* sono riportati il numero di eventi analizzati, il numero di sequenze individuate, il numero totale di eventi *clusterizzati* e i parametri utilizzati nell'analisi. Nelle righe successive, per ogni sequenza viene indicato il numero identificativo del *cluster*, la data del primo evento, la durata in giorni, il numero di eventi, le coordinate ipocentrali e magnitudo equivalenti (posizione media e momento cumulativo corrisponde del *cluster*), la data e la magnitudo dei due eventi più grandi, la differenza temporale in percentuale sull'intera durata del *cluster* tra l'evento principale e il *foreshock* (PCT). Quest'ultimo parametro permette di identificare se il *cluster* è composto da un evento principale con *foreshocks* e *aftershocks* (valori alti di PCT), oppure da un evento principale con *aftershocks*.

La variazione dei parametri nel *range* di valori riportato in Tabella 5 ha messo in evidenza che il numero di eventi *clusterizzati* non cambia per alcune piccole sequenze come le n. 16, 21 e 23, mentre per le altre aumenta di una o due unità (n. 9, 11 e 20). Variazioni più significative si hanno per la sequenza del 2005 (n. 1) rispetto al parametro del raggio R_{fact} . Difatti, all'aumentare di tale valore, le sottosequenze individuate a differenti profondità vengono raggruppate in un'unica sequenza (come è riportato in Tabella 6b con $R_{fact} = 30$ km per la sequenza del 2005 -*cluster* 1) aumentando anche il numero totale di eventi *clusterizzati*. Valori più alti di x_k e x_{meff} portano, nel caso della sequenza del 2006 (n. 3, 5 e 6), da 4 a 2 sottosequenze variando di poche unità il numero totale degli eventi *clusterizzati*. Infine va anche sottolineato che l'aumento sia di R_{fact} che degli errori ERH e ERZ ha determinato una coppia di eventi come una ulteriore sequenza (non mostrata nelle tabelle).

Ogni sequenza è stata analizzata per includere eventuali eventi che non fossero stati associati alla sequenza tramite ZMAP e per evidenziare delle possibili peculiarità sull'andamento temporale degli eventi, della profondità e della magnitudo. Nella Figura 7 sono mostrate, oltre le tre sequenze principali riesaminate (2005, 2006 e 2011), anche tutte le altre sequenze identificate da ZMAP, con almeno 6 eventi dopo la fase di riesame. In tal modo il numero finale di sequenze da considerare aumenta da 8 a 11.

SUMMARY OF CLUSTERS
402 EARTHQUAKES TESTED - 21 CLUSTERS IDENTIFIED - 205 CLUSTERED EVENTS

N	1 ST EVENT	DUR (days)	NC	EQUIVALENT EVENT				1 ST LARGEST EVENT		2 ND LARGEST EVENT		PCT
1	2005 09 18 0044	24.726	62	43.812	12.435	15.81	3.79	2005 10 07 1647	3.2	2005 09 18 2154	3.1	79
3	2006 08 25 2047	5.121	51	43.755	12.118	20.03	3.84	2006 08 30 1001	3.7	2006 08 29 2254	2.8	88
5	2006 08 31 0442	0.969	6	43.746	12.085	25.6	2.14	2006 08 31 0442	1.7	2006 09 01 0154	1.6	0
6	2006 09 01 0143	0.813	6	43.758	12.128	11.5	2.74	2006 09 01 0143	2.4	2006 09 01 0144	2.4	0
9	2010 04 02 0455	0.886	6	43.769	12.151	12.63	2.48	2010 04 02 0455	2.4	2010 04 02 0458	1.7	0
11	2011 01 26 1630	0.996	15	43.782	12.169	10.08	2.49	2011 01 26 1630	2.2	2011 12 07 1626	1.8	0
16	2012 09 02 2248	0.086	6	43.780	12.124	13.92	2.83	2012 09 02 2248	2.8	2012 09 02 2250	1.6	0
20	2015 07 17 0511	1.391	10	43.791	12.134	15.65	2.46	2015 07 17 0511	2.3	2015 07 17 0638	1.7	0
21	2015 11 10 2301	0.750	6	43.847	12.362	17.08	1.71	2015 11 11 1042	1.3	2015 11 10 2301	1.2	64
23	2016 05 25 2012	0.274	7	43.782	12.143	13.9	1.54	2016 05 25 2012	1.2	2016 05 25 2259	0.9	0

a)

τ_{min} (gg)	τ_{max} (gg)	P	x_k	x_{meff}	R_{fac} (km)	ERH (km)	ERD (km)	n. sequenze	n. ev. clusterizzati	sequenza 2005	sequenza 2006	sequenza 2011	sequenza 2012	sequenza lug. 2015	sequenza nov. 2015	sequenza 2016
1	20	0.95	0.0	1.4	5	1	2	20	184	54 (2)	64 (4)	13	6	9	8 (2)	7
					10			19	191	55	66 (4)	14	6	10	8 (2)	7
						2.5	5	21	195	58 (3)	66 (4)	15	6	10	8 (2)	7
				1.5				20	185	55 (2)	63 (4)	13	6	9	8 (2)	7
			0.1					20	181	51 (2)	63 (4)	13	6	9	8 (2)	7
			0.5					18	188	55 (2)	66 (4)	13	6	9	8 (2)	7
		0.90						20	184	54 (2)	64 (4)	13	6	9	8 (2)	7
		0.99						20	181	51 (2)	63 (4)	13	6	9	8 (2)	7
	30							20	184	54 (2)	64 (4)	13	6	9	8 (2)	7
	10							20	184	54 (2)	64 (4)	13	6	9	8 (2)	7
					30	1.5	2	21	205	62	68 (4)	15	6	10	8 (2)	7

b)

Tabella 6 Risultati di ZMAP relativi all'individuazione dei clusters con almeno 6 eventi. a) output del programma imponendo $\tau_{min} = 1, \tau_{max} = 20, P = 0.95, x_k = 0.0, x_{meff} = 1.4, R_{fact} = 30, ERH = 1.5$ e $ERZ = 2.0$; b) alcuni test imponendo diversi valori dei parametri nei range mostrati in Tabella 5; il valore tra parentesi indica il numero di sottosequenze con cui il programma ha suddiviso la sequenza.

Table 6 ZMAP results relating to the identification of clusters with at least 6 events. a) output of the code with $\tau_{min} = 1, \tau_{max} = 20, P = 0.95, x_k = 0.0, x_{meff} = 1.4, R_{fact} = 30, ERH = 1.5$ e $ERZ = 2.0$; b) some tests by changing the parameters values in the ranges showed in Table 5; the value in brackets indicates the number of sub-sequences obtained by the program for the given sequence.

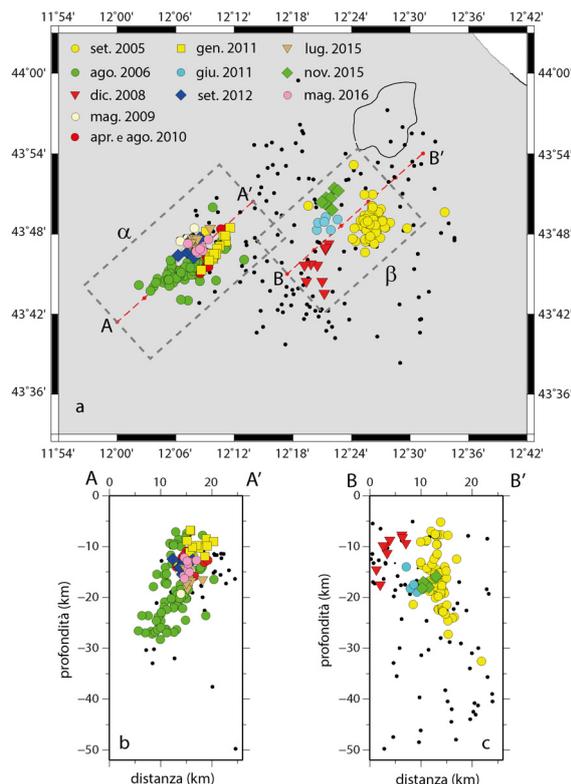


Figura 7 a) Mappa delle sequenze riesaminate con almeno 6 eventi; b) proiezione delle sequenze contenute nell'area tratteggiata in grigio α lungo la sezione AA'; c) proiezione delle sequenze contenute nell'area tratteggiata in grigio β lungo la sezione BB'. Gli eventi declusterizzati sono identificati con i punti neri.

Figure 7 a) Map of the re-examined clusters with at least 6 events; b) projection of the clusters located within the grey dashed area α along cross-section AA'; c) projection of the clusters located within the grey dashed area β along cross-section BB'. The declustered events are identified by the black dots.

3.2 Andamento vs tempo delle sequenze 2005 e 2006

La curva cumulativa della sequenza del 2005 (Fig. 8a) evidenzia tre incrementi di sismicità ognuno dei quali ha un andamento simile ad uno sciame con l'evento di magnitudo più elevata nella fase intermedia. La prima sottosequenza, che consta di 30 eventi evidenziati in blu nella Figura 8b, inizialmente è marcata da due eventi con magnitudo bassa (< 2) a profondità di circa 18 km e successivamente da due eventi di magnitudo 2.9 e 3.1 con profondità di circa 9 km. In seguito la sismicità avviene tra 18 e 30 km fino a quando si verifica un'altra sottosequenza con pochi eventi a varie profondità e con un evento di magnitudo 3.1 a profondità più superficiale (7 eventi evidenziati in verde nella Figura 8b). La sequenza prosegue con l'occorrenza di un altro gruppo di eventi, con profondità non superiore a 18 km, che caratterizza la terza sottosequenza (12 eventi evidenziati in arancione in Figura 8b). Anche in quest'ultimo caso l'evento principale ($M_L=3.2$) è nella crosta superiore a circa 8 km di profondità.

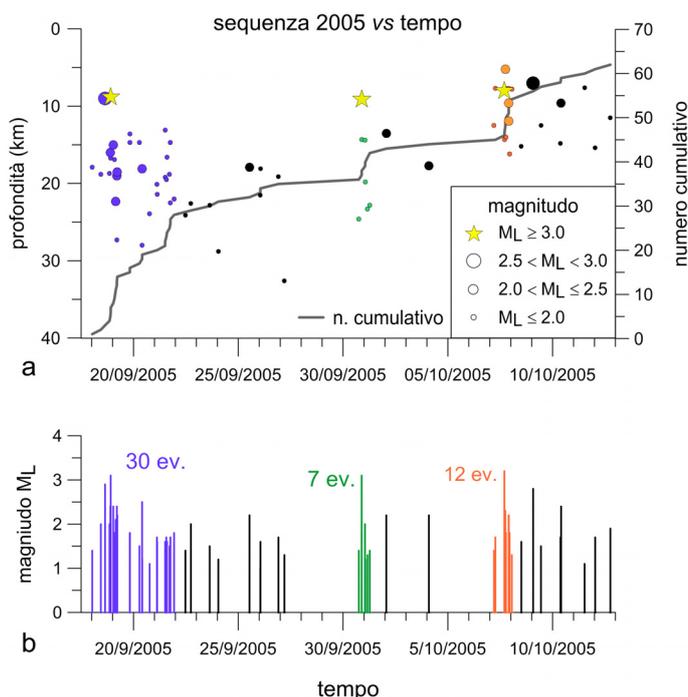
In pianta la sequenza è circoscritta in un'area molto piccola (Fig. 9a), mentre in profondità si estende fino a circa 30 km, mettendo in evidenza due principali intervalli di profondità in cui si addensano gli eventi, uno attorno ai 9 km e l'altro tra 10 e 20 km (Fig. 9b). L'andamento della sequenza inizia a profondità elevate, attivandosi parallelamente in una zona più superficiale, per poi proseguire in tre diverse profondità (seconda sottosequenza) e diventare infine più superficiale (Fig. 9b).

Anche per la sequenza del 2006 si evidenziano tre sottosequenze (Fig. 10). Nella prima avvengono 4 eventi di magnitudo molto bassa ($M_L = 1.0-1.6$) tra 14 km e i 22 km di profondità, per poi verificarsi un unico evento di magnitudo più alta ($M_L = 2.4$) a profondità più superficiale di 7.8 km; successivamente la sismicità ritorna a interessare le profondità iniziali. Dal 29 agosto al 31 agosto l'area è interessata dalla seconda sottosequenza i cui eventi avvengono in un range di profondità tra i 7.4 km e i 33 km; anche in questa sottosequenza i due eventi di magnitudo più alta ($M_L = 2.8$ e 3.7) avvengono ad una profondità di circa 10 km. Questo *cluster* rimarca ancora di più il consistente sviluppo verticale (almeno 25 km) che caratterizza la sismicità dell'area. L'ultima sottosequenza, avvenuta nell'arco di poche ore, si è concentrata a due profondità, una superficiale tra i 7 e i 10 km in cui ricadono i due eventi di magnitudo più alta ($M_L = 2.4$) avvenuti inizialmente e a pochi secondi l'una dall'altra, e l'altra più profonda a circa 25 km con eventi di magnitudo molto piccola e successivi ai due precedenti eventi. L'analisi in

Figura 8 Evoluzione temporale della sequenza del settembre-ottobre 2005:

- a) numero cumulativo di eventi e variazione delle profondità ipocentrali;
b) distribuzione delle magnitudo.

Figure 8 Time evolution of the september-october 2005 seismic sequence: a) cumulative number and hypocentral depths variation; b) magnitude distribution.



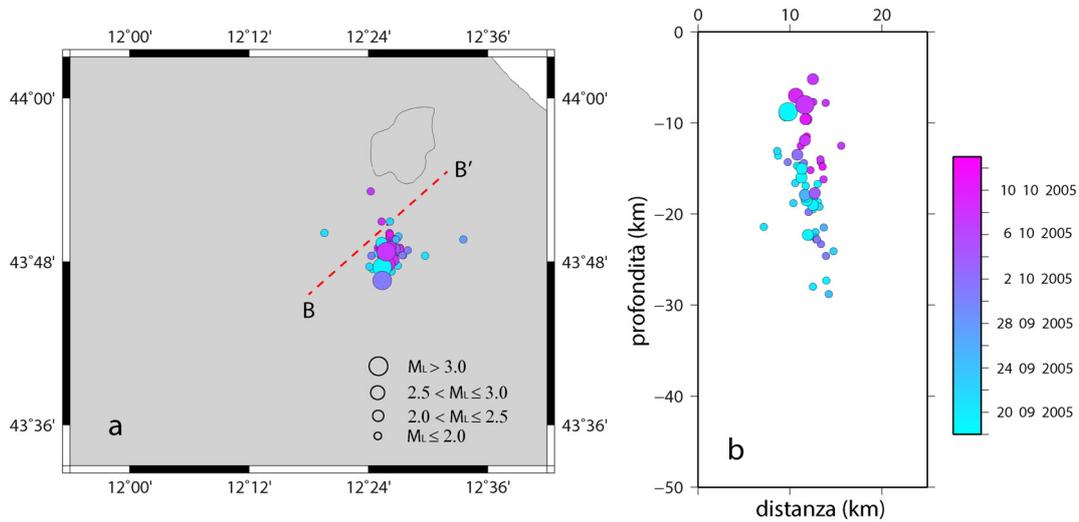


Figura 9 Andamento temporale della sequenza 2005 in pianta a) e lungo la sezione BB' della Figura 7.

Figure 9 Time evolution of the 2005 cluster in map a) and along BB' cross-section of the Figure 7.

profondità e in pianta di questa sequenza delinea un andamento differente rispetto alla sequenza del 2005 (Fig. 11); in questo caso la sequenza si estende in direzione antiappenninica, attivandosi prima nella parte a NE per poi migrare verso SW e interessando profondità sempre maggiori. In quest'area ricadono altre sequenze con almeno 6 eventi, precisamente quelle del 2010, gennaio 2011, 2012, gennaio 2015, luglio 2015 e 2016 (Fig. 7). Tutte queste sequenze avvengono a profondità equivalenti (posizione media del cluster) non superiori ai 16 km e sono spazialmente ben circoscritte in un'area molto piccola, ad eccezione della sequenza del gennaio 2011, con il maggior numero di eventi clusterizzati (15 eventi), che ha un allineamento antiappenninico in pianta. Va rilevato che con la dicitura sequenza del 2010 vengono considerate due sequenze avvenute una ad aprile e l'altra ad agosto, che, essendo spazialmente molto vicine e con profondità equivalenti simili, si è preferito accorparle.

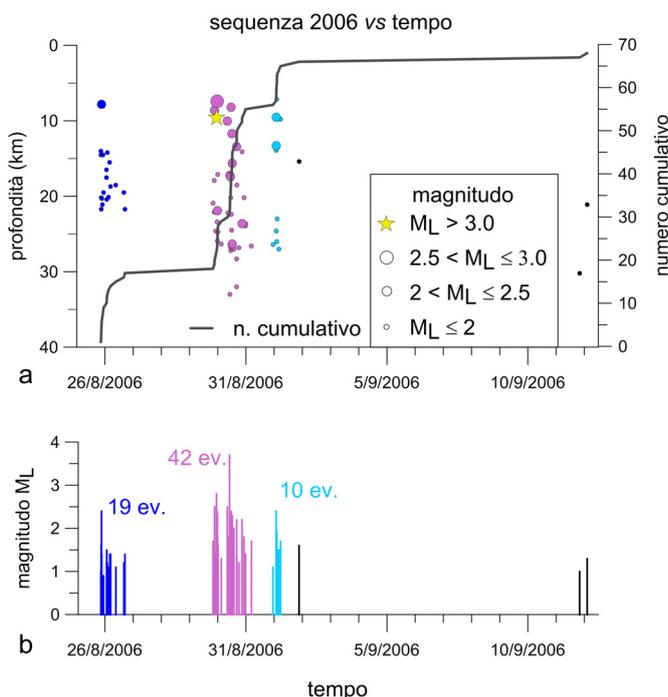


Figura 10 Evoluzione temporale della sequenza del settembre-ottobre 2006: a) numero cumulativo di eventi e variazione delle profondità ipocentrali; b) distribuzione delle magnitudo.

Figure 10 Time evolution of the september-october 2006 seismic sequence: a) cumulative number and hypocentral depths variation; b) magnitude distribution.

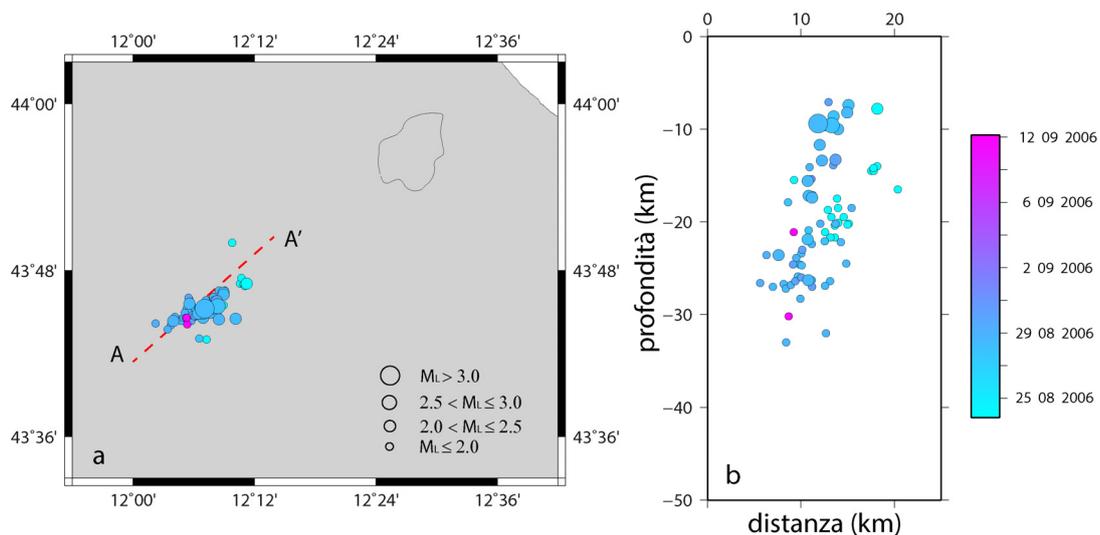


Figura 11 Andamento temporale della sequenza 2006 in pianta a) e lungo la sezione AA' della Figura 7

Figure 11 Time evolution of the 2006 cluster in map a) and along AA' cross-section of the Figure 7.

3.3 *b*-value

Un altro aspetto interessante nell'analisi delle sequenze è lo studio del *b*-value essendo, come diversi lavori in letteratura hanno evidenziato, correlato a variazioni di stress locale o dello stato di frammentazione. Per le due principali sequenze (2005 e 2006) il valore del *b* non si può stimare poiché il numero di eventi con magnitudo maggiore o uguale alla magnitudo di completezza dell'area ($M_c = 1.4$) è troppo piccolo per ottenere un risultato affidabile. La magnitudo di completezza è stata determinata tramite il metodo della massima curvatura [Wyss et al., 1999]; M_c è il punto in cui la curva sperimentale del numero di eventi in funzione della magnitudo devia dall'andamento teorico. Per ottenere un numero maggiore di eventi si sono calcolati i valori di *b* per le aree α e β in cui sono avvenute le due principali sequenze (Fig. 7), aggiungendo nella stima anche le altre sequenze che ricadono in ogni singolo rettangolo sotto l'ipotesi che il meccanismo che le abbia generate era lo stesso. La stima del *b*-value è stata calcolata tramite tre metodi, il metodo dei minimi quadrati (LS), il metodo della massima verosimiglianza (ML) e il metodo statistico di Bender (BM) [Bender, 1983]. Quest'ultimo metodo rispetto agli altri due metodi tiene conto, nella stima dei parametri della Gutenberg-Richter, delle fluttuazioni che possono esserci in ogni classe rispetto alla magnitudo o al numero di eventi, nonché della considerazione che la curva in realtà è limitata superiormente dalla massima magnitudo storica avvenuta nell'area in esame (M_{max} storica = 6.1). Il *b*-value ottenuto è minore di 1 sia per le singole aree α e β che per l'unione delle due (Tab. 7; Fig. 12), mentre per il catalogo *declusterizzato*, considerando solo gli eventi crostali con profondità minore di 30 km, la stima è significativamente più alta (1.11 - 1.37). Il risultato del *b*-value per la sismicità di fondo è confrontabile con quello calcolato da Megna et al. [2000] (1.3 ± 0.1) in cui viene considerata la sismicità della regione Umbria-Marche da gennaio 1987 a maggio 1999 rimuovendo dall'analisi la sequenza Colfiorito 1997. La diminuzione del *b*-value durante le sequenze rispetto al valore della sismicità di fondo è attribuibile a un aumento dello stato di stress locale, come esperimenti di laboratorio [Amitrano, 2003] e studi sulla sismicità di un importante evento della California (Parkfield settembre 2004, $M=6$) [Schorlemmer and Wiemer, 2005] hanno evidenziato analizzando la possibile correlazione tra stress e il *b*-value.

area	n. eventi con $M_L \geq 1.4$	BM	LS	ML
α	73	0.85 ± 0.08	0.60 ± 0.31	0.59 ± 0.12
β	66	0.76 ± 0.08	0.70 ± 0.38	0.63 ± 0.11
$\alpha + \beta$	139	0.80 ± 0.08	0.82 ± 0.37	0.72 ± 0.08
declustered	64	1.37 ± 0.14	1.11 ± 0.31	1.26 ± 0.19

Tabella 7 *b-value* per le aree α e β , l'unione delle due aree, e per il catalogo *declusterizzato*, calcolati secondo il metodo statistico di Bender (BM), il metodo dei minimi quadrati (LS) e il metodo della massima verosimiglianza (ML).

Table 7 *b-values* for α and β areas, joining the two areas, and for the *declustered* catalog, computed by using the Bender statistical method (BM), least squares (LS), and maximum likelihood (ML).

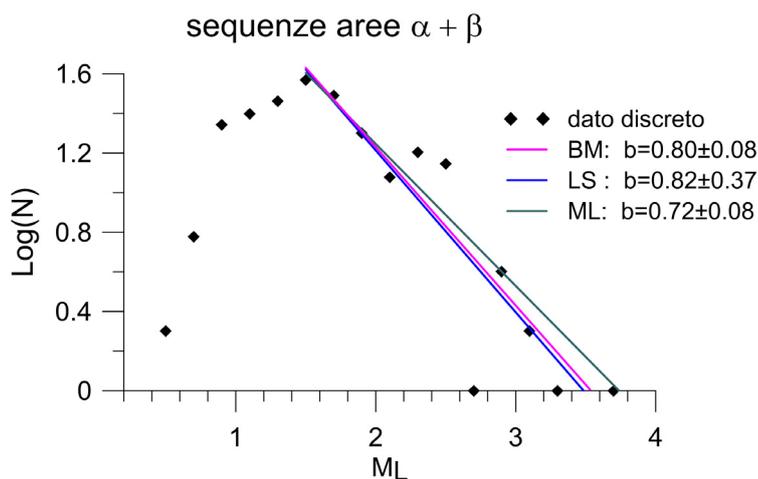


Figura 12 Distribuzione discreta magnitudo-frequenza ($\Delta M_L = 0.2$) per le sequenze che ricadono nelle aree α e β ; andamento della Gutenberg-Richter calcolata tramite il metodo di Bender (BM), il metodo dei minimi quadrati (LS) e metodo della massima verosimiglianza (ML) con magnitudo di soglia 1.4.

Figure 12 Magnitude-frequency discrete distribution ($\Delta M_L = 0.2$) for the sequences within α e β areas; Gutenberg-Richter curves computed by Bender statistical method (BM), least squares (LS), and maximum likelihood (ML) with threshold magnitude 1.4.

4. Note conclusive e futuri sviluppi

L'analisi effettuata evidenzia tre brevi sequenze sismiche occorse nella zona di Macerata Feltria (PU), nel settembre-ottobre 2005, e di Casteldelci (RN) nell'agosto-settembre 2006 e novembre 2011. Le prime due sono contraddistinte da magnitudo massime di 3.2 e 3.7, rispettivamente, e presentano un comportamento nel rilascio energetico tipico degli sciami sismici. Questo modello di *seismic release*, caratterizzato da *burst* di terremoti molto circoscritti nello spazio e nel tempo, unitamente al verificarsi di sequenze con medio-bassa magnitudo, risulta comune ad altri settori della dorsale appenninica, quali ad esempio l'area del bacino di Gubbio [Marzorati et al., 2014], il Pollino [Passarelli et al., 2015] e l'area Sorano-Marsicana [Frepoli et al., 2017],

come è stato anche osservato nelle Alpi Occidentali [Godano et al., 2013]. Riguardo tuttavia all'evoluzione spazio-temporale della sismicità esaminata, essa risulta piuttosto articolata, essendo caratterizzata, soprattutto durante gli sciame, da vari impulsi dell'attività e profondità di enucleazione che raggiungono anche i 20-25 km (Figg. 4 e 5). Lungo tali estensioni verticali, paragonabili a quelle rilevate negli sciame della Boemia occidentale [Fischer et al., 2014], si osserva una notevole migrazione degli ipocentri (Figg. 9b e 11b), suggerendo come possibile meccanismo di generazione della microsismicità la risalita di fluidi ad alta pressione dagli strati inferiori. Il *pattern* di sismicità è complementare, infine, a quegli eventi, non infrequenti, localizzati a profondità maggiori di 30 km e che risultano concentrati nella fascia più esterna dell'Appennino settentrionale. Tali osservazioni evidenziano una sismogenesi che nell'area studiata interessa, nel complesso, tutto lo spessore crostale e parte del mantello superiore almeno fino a 50 km di profondità (Fig. 8b).

La regione che comprende il Montefeltro è purtroppo ancora oggi non adeguatamente monitorata e ciò limita l'analisi di dettaglio della sismicità di fondo, il calcolo dei meccanismi focali per gli eventi di bassa magnitudo e una stima più attendibile del *b-value*. Per meglio definire tali parametri è in fase di realizzazione una rete sismica temporanea, costituita da stazioni mobili ad alta dinamica, ad integrazione della copertura strumentale fornita dalla RSN (Fig. 2). Allo stato attuale, la campagna di acquisizione dati (esperimento Montefeltro) è attiva con due stazioni e sono stati definiti i siti per altri tre nuovi punti di osservazione.

Ringraziamenti

Si ringrazia Vincenzo Convertito per la lettura critica e per gli utili suggerimenti forniti che hanno permesso di migliorare il manoscritto originale.

Bibliografia

- Amitrano D., (2003). *Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b value*. J. Geophys. Res., 108(B1), 2044. doi:10.1029/2001JB000680.
- Bender B., (1983). *Maximum likelihood estimation of b values for magnitude grouped data*. Bull. Seismol. Soc. Am, 73, 831-851.
- Carminati E., Giardina F., Doglioni C., (2002). *Rheological control of subcrustal seismicity in the Apennines subduction (Italy)*. Geophys. Res. Lett., 29, 1882.
- Cimini G.B. and Marchetti A., (2006). *Deep structure of peninsular Italy from seismic tomography and subcrustal seismicity*. Annals of Geophysics, Supplement to Vol. 49, N. 1, 331-345.
- Fischer T., Horálek J., Hrubcová P., Vavryčuk V., Bräuer K., Kämpf H., (2014). *Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review*. Tectonophysics, 611, 1-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.001>.
- Frepoli A., Amato A., (1997). *Contemporaneous extension and compression in the Northern Apennines from earthquake fault plane solutions*. Geophysical Journal International, 129, 368-388.
- Frepoli A., Cimini G. B., De Gori P., De Luca G., Marchetti A., Monna S., Montuori C., Pagliuca N.M., (2017). *Seismic sequences and swarms in the Latium-Abruzzi-Molise Apennines (Central Italy): new observations and analysis from a dense monitoring of the recent activity*. Tectonophysics, 712-713, 312-329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2017.05.026>.
- Godano M., Larroque C., Bertrand E., Courboux F., Deschamps A., Salichon J., Bland-Guerry C., Fourteau L., Charléty J., Deshayes P., (2013). *The October–November 2010 earthquake swarm near Sampeyre (Piedmont region, Italy): A complex multicluster sequence*. Tectonophysics, 608, 97-111.
- Hainzl S., Fischer T., Dahm T., (2012). *Seismicity-based estimation of the driving fluid pressure in the case of*

- swarm activity in Western Bohemia. *Geophys. J. Int.*, 191 (1), 271–281.
- ISIDe working group (2016). Version 1.0, doi: 10.13127/ISIDe. <http://iside.rm.ingv.it>.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R., (1995). *Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times*. *Geophys. J. Int.*, 122, 108–124.
- Lahr J.C., (1999). *Revised 2012, HYPOELLIPSE: a computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern*. USGS Open-File Report, 99–23, version 1.1, 119 pp.
- Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale (riferimento: Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n.3519, All. 1b) (2006). <http://zonesismiche.mi.ingv.it>
- Marzorati S., Massa M., Cattaneo M., Monachesi G., Frapiccini M., (2014). *Very detailed seismic pattern and migration inferred from the April 2010 Pietralunga (northern Italian Apennines) micro-earthquake sequence*. *Tectonophysics*, 610, 91–109.
- Megna A., Barba S., Santini S., Vetrano F., (2000). *Space-time variations of the Umbria-Marche region instrumental seismicity*. *Annali di Geofisica*, 43, 921-937. <http://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/3675/3737>.
- Moretti, Antonioli A., Braun T., Cattaneo M., Chiaraluce L., Fiaschi A., Govoni A., Lauciani V., Marcocci C., Margheriti L., Matassoni L., Mazza S., Mele F., Morelli M., Moschillo R., Piccinini D., Pignone M., Pintore S., Quintiliani M., Saccorotti G., (2011). *La sequenza sismica nel Montefeltro (Forlì – Cesena): l'intervento della rete sismica mobile*. Rapporti Tecnici INGV, N. 202, 34 pp.
- Passarelli L., Hainzl S., Cesca S., Maccaferri F., Mucciarelli M., Roessler D., Corbi F., Dahm T., Rivalta E., (2015). *Aseismic transient forcing driving the swarm-like seismic sequence in the Pollino range, Southern Italy*. *Geophys. J. Int.*, doi:10.1093/gji/ggv111.
- Piccinini D., Piana Agostinetti N., Roselli P., Ibs-von Seht M., Braun T., (2009). *Analysis of small magnitude seismic sequences along the Northern Apennines (Italy)*. *Tectonophysics*, 476, 136-144. doi:/10.1016/j.tecto.2009.04.005.
- Reasenber E.A., (1985). *Second-order moment of central California seismicity*. *J. Geophys. Res.*, 90, 5479-5495.
- Reasenber P., Oppenheimer D., (1985). *FPPFIT, FPLOT and FPPAGE: FORTRAN computer programs for calculating and dis-playing earthquake fault-plane solutions*. U.S. Geol. Surv. Open FileRept., 85-739.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), (2016). *CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>
- Santini S., Saggese F., Megna A., Mazzoli S., (2011). *A note on central-northern Marche seismicity: new focal mechanisms for events recorded in years 2003-2009*. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 52, 639-649, doi 10.4430/bgta0025.
- Schorlemmer D., Wiemer S., (2005). *Microseismicity data forecast rupture area*. *Nature*, 434, 1086.
- Tesauro M., Kaban, M. K., Cloetingh S. A. P. L., (2008). *A new reference model for the European crust*. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05313, doi:10.1029/2007GL032244.
- Wiemer S., (2001). *A software package to analyze seismicity*. *ZMAP*. *Seism. Res. Lett.*, 72, 373-382.
- Wyss M., Hasegawa A., Wiemer S., Umino N., (1999). *Quantitative mapping of precursory seismic quiescence before the 1989, M 7.1 off-Sanriku earthquake, Japan*. *Annali Di Geofisica*, 42, 851-869, doi.org/10.4401/ag-3765.
- Zoback M.L., (1992). *First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project*. *J. Geophys. Res.*, 97, 11703-11728.

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

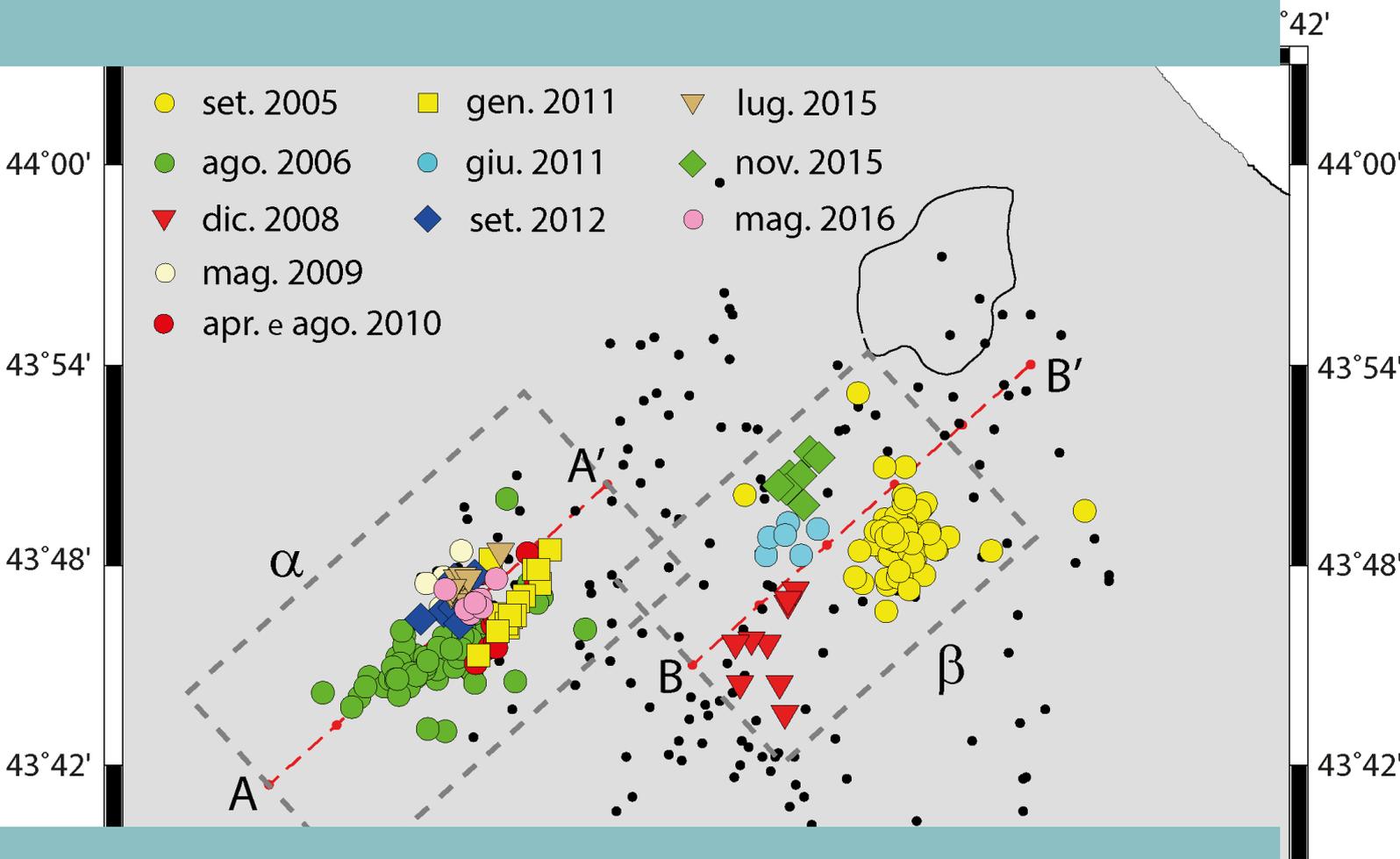
Francesca DI STEFANO, Rossella CELI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico e impaginazione

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2019
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

