

Il Catalogo CEDIT: dall'inventario degli effetti sismoindotti all'analisi di scenario

The CEDIT Catalogue: from inventorying of earthquake-induced ground effects to analysis of scenario

MARTINO Salvatore, CAPRARI Patrizia,
FIORUCCI Matteo, MARMONI Gian Marco

RIASSUNTO - Il Catalogo degli Effetti Deformativi al suolo Indotti da forti Terremoti in Italia (CEDIT) è un progetto a cura del Centro di Ricerca per i Rischi Geologici (CERI), nato a partire dal 1997 da una prima raccolta ed analisi delle fonti storiche e tecniche relative ai più forti terremoti italiani. Nella sua più recente versione il catalogo ha visto la nascita di un *database* di libera consultazione integrato a piattaforme *online* basate su servizi *Web-GIS* e *Web Map Service (WMS)*. Il CEDIT censisce effetti documentati dal 1117 d.C. al 2018, per un totale di 3989 effetti per 173 terremoti, orientati lungo le principali sorgenti sismogeniche della penisola, di cui larga parte di questi (56%) sono legati a frane. Dalle analisi di distribuzione spaziale sono state derivate curve di massima distanza di sismoinduzione attesa per magnitudo sismica, a specifica valenza nazionale. I dati contenuti all'interno del catalogo risultano di particolare interesse per la definizione e analisi di scenari di evento o come dato essenziale per la valutazione della propensione di un territorio all'insorgenza di frane sismoindotte. Per i recenti eventi sismici del 2016-2017 in Appennino centrale e del 16 Agosto 2018 in Molise, le informazioni del CEDIT sono state utilizzate per analisi quantitative degli scenari osservati che, nel primo caso, hanno dimostrato la dipendenza della distribuzione delle frane dalla posizione topografica e dalla presenza di tagli stradali, mentre, nel secondo caso, hanno messo in luce il ruolo predisponente di precipitazioni, quale fattore concomitante ad un sisma.

PAROLE CHIAVE: effetti sismoindotti, terremoti, catalogo, analisi di scenario, CEDIT, Italia

ABSTRACT - The Italian Catalogue of Earthquake-Induced Ground Failures (CEDIT) is a project by the Research Center for Geological Risks of Sapienza University of Rome (CERI) born since 1997 on a first collection and analysis of historical and technical sources related to the strongest Italian earthquakes. In its most recent release, the catalogue implemented a free consultation database integrated with online platforms based on Web-GIS and Web Map Service (WMS) services. The CEDIT catalogue records ground-effects documented since 1117 AD to 2018 for a total of 3989 effects induced by 173 earthquakes of which a large part (56%) are landslides, oriented along the main seismogenic sources of the peninsula. From the spatial distribution analyses, curves of maximum seismic induction distance expected for seismic magnitude, with specific national value, were derived. The data contained in the CEDIT catalogue are of particular interest for the definition and analysis of scenarios or as essential data for the assessment of the propensity of territory to the onset of earthquake-induced landslides. For the recent seismic events of 2016-2017 in the central Apennines and of 16 August 2018 in Molise, the CEDIT database was used for quantitative analysis of scenarios which, in the first case, demonstrated as the landslides distribution depends on both the topographic position and the presence of road cuts, while, in the second case, it demonstrated the predisposing role of concomitant rainfall with respect to the trigger produced by the seismic shaking.

KEYWORDS: earthquake-induced effects, earthquakes, catalogue, analysis of scenario, CEDIT, Italy

1. - INTRODUZIONE

Nella comune e più diffusa percezione umana, i terremoti sono visti come eventi responsabili di distruzione ad edifici ed opere e, come tali, causa di danni e vittime tra gli abitanti delle località colpite. Sin dalla tradizione letteraria più antica i terremoti sono, infatti, considerati delle catastrofi, ovvero momenti di completa distruzione e depressione sociale di intere comunità; come tali essi sono frequentemente citati o quali eventi estremi ed apocalittici (Apocalisse 6:12-17) o come eventi punitivi, come in molte rappresentazioni presenti nei cicli pittorici didascalico-allegorici medioevali o nelle iconografie del XVIII secolo (fig. 1). Tra queste ultime, vi sono le numerose e drammatiche rappresentazioni della distruzione di Lisbona, causata dal sisma del 2 Febbraio del 1703, che se da un lato ricevette una lettura punitiva in chiave religiosa dall'altro diede spazio all'attecchimento delle nuove idee razionaliste che percorsero le visioni illuministiche di fine secolo. Per secoli l'iconografia ha rappresentato questo comune sentire riferito ai terremoti, mentre rare sono state le citazioni letterarie o iconografiche che abbiano colto i possibili effetti dei sismi sul territorio. Tra queste, una famigerata citazione di Dante (XII Canto dell'Inferno - Divina Commedia - 4-6: *“Qual è quella ruina che nel fianco di qua da Trento l'Adige Percosse, o per tremoto o per sostegno manco che da cima del monte, onde si mosse, al piano è sì la roccia discoscorsa, ch'al-*

cuna via darebbe a chi sù fosse: cotal di quel burrato era la scesa”) che fa riferimento alla frana detta dei “Lavini di Marco” (GENEVOIS *et alii*, 2002), non escludendone l'innescò per terremoto. E' alle prime cronache redatte dopo il “Terremoto delle Calabrie” del 1783 (successione di terremoti di magnitudo stimata superiore a 5.5 che ebbe inizio il 5 Febbraio protraendosi per quasi un intero anno, colpendo la “Calabria Ulteriore”) che si deve un primo tentativo di sistematizzare il censimento di effetti sul territorio, causati dalla severa sequenza sismica avvenuta, attraverso la redazione della “Carta Corografica della Calabria Ulteriore”, edita da Padre Eliseo della Concezione nel 1784. Le riprese fotografiche fanno il loro ingresso nella documentazione degli effetti sismoindotti in Italia a partire dall'inizio del XX secolo, ad esempio per il sisma di Reggio e Messina (1908), del Belice (1968) e dell'Irpinia (1980) vieppiù affiancati da *reportage* giornalistici e documentari filmati. Con i più recenti terremoti del XXI secolo quali L'Aquila (2009) e la sequenza sismica dell'Appennino Centrale (2016-2017) si afferma anche il censimento diretto e la documentazione indiretta degli effetti sul territorio indotti dai terremoti che viaggia su *internet* sotto forma di scambio di *news* sui canali *social* o sui *blog*.

L'esigenza di raccogliere ed aggiornare le fonti documentali inerenti effetti sismoindotti al suolo si è concretizzata nel progetto del catalogo CEDIT (Catalogo degli Effetti Deformativi al suolo Indotti da



Fig. 1. a) Affresco della Basilica Inferiore di S.Francesco ad Assisi che mostra i danni e le vittime di un terremoto (Scuola di Giotto, XIV secolo, Italia). b) La frana del Monte Paci innescata dal Terremoto delle Calabrie del 1783 in una pittura di Antonio Minasi. c) Censimento diretto e documentazione di uno degli effetti indotti dalla sequenza sismica in Appennino Centrale del 2016-2017.

- a) Fresco from the Lower Basilica of S. Francesco in Assisi showing the damage and victims of an earthquake (Giotto's School, 14th century, Italy). b) The landslide of Monte Paci triggered by the Calabrie earthquake of 1783 in a painting by Antonio Minasi. c) Direct inventorying and documentation of one of the effects induced by the 2016-2017 seismic sequence in Central Apennines.

forti Terremoti in Italia), la cui prima versione, risalente al 1997 (DELFINO & ROMEO, 1997), è preceduta da un primo tentativo di censimento di effetti indotti da terremoti sull'intero territorio nazionale da parte di ZECCHI (1987). Il CEDIT diviene fruibile in una versione consultabile *online* (http://www.ceri.uniroma1.it/index_cedit.html) a partire dal 2012 (MARTINO *et alii*, 2014), a cura del Centro di Ricerca per i Rischi Geologici (CERI) di Roma "Sapienza".

Il CEDIT (CAPRARI *et alii*, 2018) si allinea ad ulteriori cataloghi (<http://istituto.ingv.it/it/risorse-e-servizi/archivi-e-banche-dati.html>), già precedentemente redatti, tra i quali il CFTI5, il CPTI15Med, il DBMI15, il DISS 3.2.1, l'ITC ver2. Per l'aggiornamento agli effetti sismoindotti da terremoti contemporanei, il CEDIT può avvalersi di segnalazioni fornite da personale tecnico operativo sul territorio come anche da osservatori e/o abitanti locali (*community-based reporting*), come già avvenuto nella sequenza sismica che ha interessato l'Italia Centrale nel 2016-2017. Queste segnalazioni, una volta validate, possono essere inserite nel catalogo con le specifiche indicazioni della testimonianza diretta e corredate dai metadati necessari per la loro catalogazione. Le finalità del CEDIT possono essere riferite ai seguenti obiettivi, che saranno di seguito più estesamente esemplificati: i) realizzazione di un *database* funzionale ad analisi statistiche sui dati inventariati ed alla deduzione di relazioni empiriche per la valutazione della pericolosità da effetti sismoindotti e/o per l'aspettativa della loro distribuzione spaziale; ii) analisi di scenario, volte alla comprensione delle relazioni (con-)causali tra fattori predisponenti e di innesco di fenomeni sismoindotti; iii) analisi di previsione (*forward analysis*), mediante la costruzione di scenari di sismoinduzione attesi che possono essere validati a partire dalla riproduzione ammissibile di scenari già osservati e basati sui dati inventariati (*back analysis*).

2. - IL CATALOGO CEDIT: STRUTTURAZIONE E CONTENUTI

Il Catalogo italiano degli Effetti Deformativi del suolo Indotti da forti Terremoti (CEDIT) è una

banca dati di libera consultazione che archivia ad oggi gli effetti sismoindotti al suolo censiti in Italia dal 1117 d.C.

Nella prima versione del catalogo (DELFINO & ROMEO, 1997) sono stati inventariati gli effetti sismoindotti dai terremoti verificatisi fino al 1980 (PRESTININZI & ROMEO, 2000); tale versione ha subito due significativi aggiornamenti: i) il primo nel 2012, che ha consentito di includere gli effetti indotti al suolo fino al terremoto de L'Aquila nel 2009 (FORTUNATO *et alii*, 2012) e dell'Emilia nel 2012 (MARTINO *et alii*, 2014); ii) il secondo nel 2018, che ha incluso gli effetti sismoindotti dalla sequenza sismica dell'Appennino Centrale del 2016-2017 e dal sisma M_w 4.0 di Casamicciola Terme (NA) del 21 Agosto 2017 (CAPRARI *et alii*, 2018).

Il CEDIT è un *geodatabase* relazionale che associa ad un singolo evento sismico registrato sul territorio nazionale, i molteplici effetti da esso indotti al suolo, che possono essere censiti sia da fonti bibliografiche (come avvenuto per i terremoti storici) oppure essere rilevati direttamente sul terreno, come effettuato dal gruppo di lavoro afferente al Centro di Ricerca CERI nei giorni immediatamente successivi al sisma che li ha innescati, su un'area di centinaia di km adottando procedure *standard* di censimento e catalogazione (MARTINO *et alii*, 2017). Il catalogo è strutturato in 5 tabelle principali. La tabella "Terremoti" raccoglie tutte le informazioni sismologiche sugli eventi, ordinati cronologicamente, a cui sono associati gli effetti sismoindotti sul terreno. Questi ultimi sono collezionati, per ogni terremoto, nella tabella "Effetti" ed estratti sia da fonti storiche sia rilevati direttamente sul terreno. Ad ogni effetto sono associate le coordinate geografiche, la tipologia espressa seguendo la codifica CEDIT, la distanza epicentrale, l'intensità macrosismica attribuita al sito e la litologia interessata. La tabella "Frase" riporta gli stralci delle frasi originali, tratte dalle fonti storiche, che descrivono gli effetti sul terreno prodotti dai sismi censiti. La tabella "Bibliografia", che associa ad ogni frase la fonte bibliografica sorgente. Per ultima la tabella "Rilievo" che, per gli effetti censiti direttamente sul terreno, fornisce informazioni sulla data del rilevamento, sul nome dei rilevatori e con-

tiene la fotografia dell'effetto. Le cinque tabelle principali sono connesse tra loro grazie all'ID del terremoto, replicato in ogni tabella ed associato a tutti gli effetti da esso indotti, che rappresenta la chiave primaria del *geodatabase* (CAPRARI *et alii*, 2018).

Per quanto riguarda la classificazione degli effetti sismoindotti, il CEDIT codifica 5 macro- categorie. In particolare: i) i movimenti franosi sia in roccia sia in terra; ii) le fratturazioni del terreno (*ground cracks*); iii) i fenomeni di liquefazione; iv) gli effetti di fagliazione superficiale del terreno ed, infine, v) gli effetti di cambiamento permanente del piano campagna (*ground changes*), quali fenomeni di subsidenza o di sprofondamento (fig. 2). Maggiori dettagli vengono poi dati al singolo effetto specificando, ad esempio, la tipologia di frana secondo VARNES (1978) o di *ground crack* (ossia se la fratturazione del terreno è relazionata ad uno scorrimento di una massa in frana o meno).

A partire dal rilevamento effettuato nel 2016-2017, a seguito della sequenza sismica dell'Appennino Centrale, ad ogni effetto sismoindotto sono state associate, in via preliminare e laddove possibile, ulteriori informazioni quali la classe volumetrica, la tipologia di versante (naturale o antropico) da cui esso si è generato e se l'effetto interferisce, o potrebbe potenzialmente interferire a seguito di riattivazione, con la rete viaria o con le strutture antropiche. Queste informazioni risultano di utilità nei casi in cui i dati collezionati all'interno del catalogo siano utilizzati per la validazione di analisi di scenario.

Il catalogo CEDIT, nella versione aggiornata, contiene dati relativi a 173 terremoti che sono distribuiti in più di 1575 località italiane per un totale di 3989 effetti sismoindotti censiti (fig. 2), di cui 2222 frane (pari al 56%), 903 fratturazioni del terreno (23%), 486 fenomeni di liquefazione (12%), 183 fagliazioni di superficie (4%) e 195 fenomeni di cambiamento permanente del piano campagna (5%; fig. 2).

Rispetto alla versione del catalogo CEDIT 2017, attualmente fruibile *online*, le statistiche ed i risultati presentati in questa memoria includono gli effetti al suolo sismoindotti dal terremoto del 16 Agosto 2018

di M_w 5.1 con epicentro a Montecilfone (CB), rappresentati da 84 frane e 4 fratturazioni del terreno. Inoltre, il catalogo ha subito un processo di revisione degli effetti al suolo indotti dal terremoto di Reggio e Messina del 1908 di M_w 7.1, che è stato effettuato in base ad una recente analisi della loro distribuzione ad opera di COMERCI *et alii* (2015). In particolare, rispetto ai 114 effetti già censiti dal CEDIT per il terremoto del 1908, sono stati integrati ulteriori 105 effetti sismoindotti al suolo (su terra emersa). Gli effetti integrati da COMERCI *et alii* (2015), hanno portato il CEDIT a contenere un totale di 219 effetti per il terremoto in questione (suddivisi in 114 frane, 55 fratturazioni del terreno, 12 fenomeni di liquefazione e 38 fenomeni di cambiamento permanente del piano campagna); tali effetti sono stati ricodificati secondo lo *standard* del *database* CEDIT, associando le frasi stralciate dalle fonti, o documenti storici, e corredati delle relative bibliografie. Il processo di revisione ha anche permesso di svolgere la verifica della localizzazione geografica di 87 effetti sismoindotti, sempre relativi al sisma del 1908, già riportati nel CEDIT e direttamente associabili a quelli presentati in COMERCI *et alii* (2015).

3. - IL CATALOGO CEDIT: SUPPORTO ALLA GESTIONE DEL RISCHIO ED ALLE ANALISI DI SCENARIO

Il CEDIT non nasce esclusivamente con una funzione di archivio, ovvero di una sistematica catalogazione di dati documentali atti a preservare la memoria storica di quanto accaduto in Passato, bensì vuole rappresentare nel Presente, un efficace strumento di validazione per analisi quantitative di scenari di effetti al suolo sismoindotti al fine di realizzare, in prospettiva per il Futuro, prodotti tecnico-scientifici funzionali alla gestione e mitigazione del *Multi-Hazard* (MARTINO, 2017). Gli effetti sismoindotti vanno visti, infatti, quale espressione sul contesto naturale di uno scenario di danneggiamento che si amplifica a seguito di un terremoto per un processo di concatenazione di effetti che possono arrivare ad interessare anche un vasto territorio,

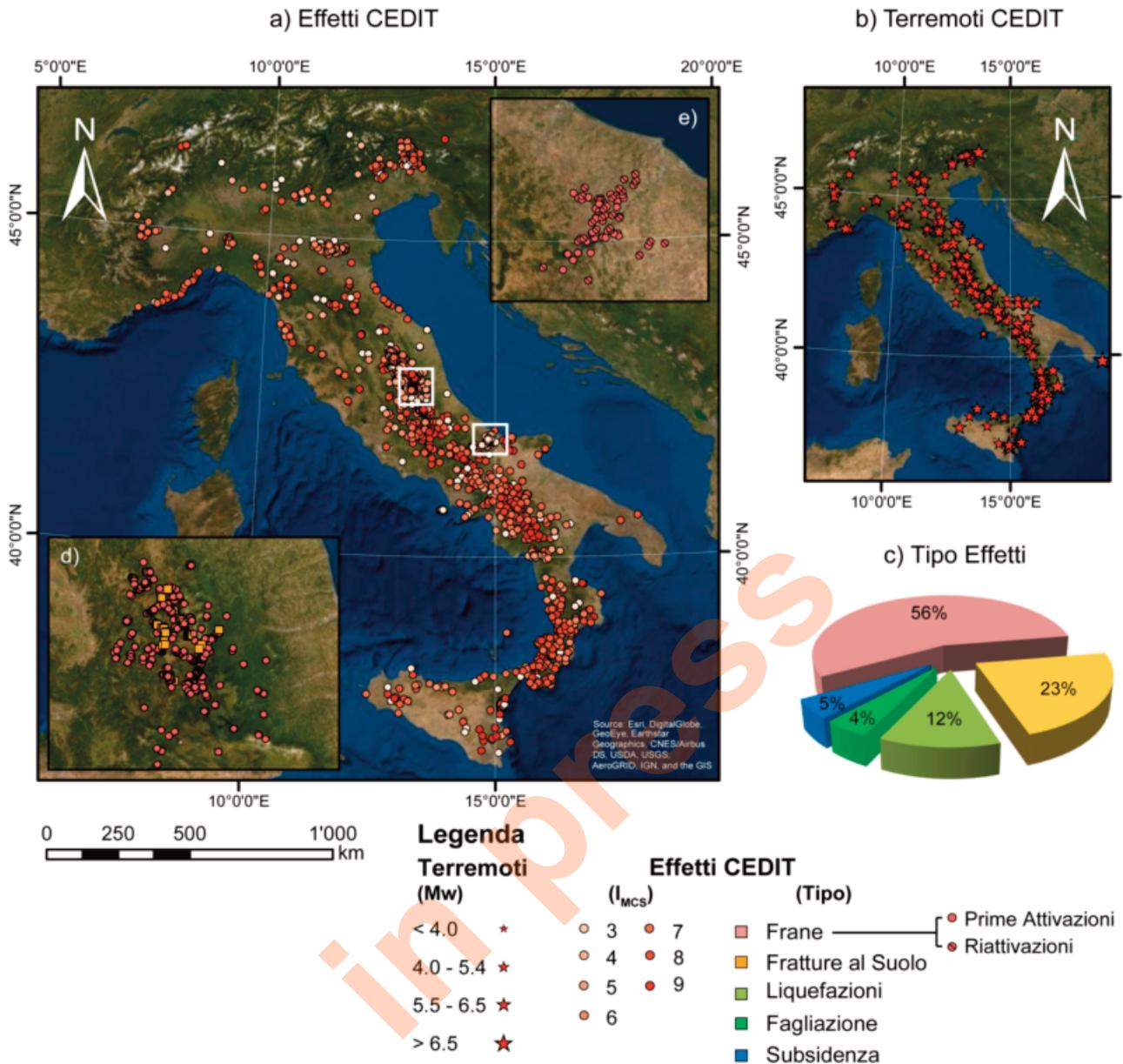


Fig. 2 - Localizzazione degli effetti sismoindotti censiti nel CEDIT (a) in relazione alle intensità MCS dedotte dai campi macrosismici dei terremoti innescanti (b). Percentuale delle tipologie di effetti censite nel catalogo (c). Dettagli della tipologia e della distribuzione spaziale degli effetti di frana e fratturazione superficiale relativi alla sequenza sismica in Appennino Centrale del 2016-2017 (d) e del Molise del 16 Agosto 2018 (e).

- Location of the earthquake-induced effects inventoried in the CEDIT (a) in relation to the MCS intensities deduced from the macroseismic fields of the triggering earthquakes (b). Percentage of the types of effects registered in the catalog (c). Details of the typology and spatial distribution of landslide and surface cracks related to the seismic sequence occurred in Central Apennines on 2016-2017 (d) and Molise the 16th August 2018 (e).

espandendo così l'area esposta e conseguentemente vulnerata. In quest'ottica, il catalogo CEDIT è un utile strumento per validare analisi di scenario di pericolosità concatenata (ossia una pericolosità da frana che si verifica all'occorrenza di un terremoto), con evidenti ricadute per le strategie di pianificazione territoriale e conseguente mitigazione del rischio.

Oltre a ciò, il CEDIT costituisce un valido stru-

mento per analizzare la distribuzione degli effetti sismoindotti nell'ottica di cogliere la diversa suscettibilità del territorio e dunque le diverse condizioni predisponenti nonchè derivare più complessi rapporti di concausalità tra fattori di innesco che risultano inter-indipendenti. In tal senso, si riportano di seguito gli esempi relativi ai recenti eventi sismici del 2016-2017 in Appennino Centrale e del 16 Agosto

2018 in Molise.

La recente sequenza sismica del 2016-2017 in Appennino Centrale, ha coinvolto un'area comprendente 4 regioni (Lazio, Marche, Umbria e Abruzzo) ed ha visto succedersi 4 scosse principali di magnitudo momento (M_w) superiore a 5.5: i) il terremoto di Amatrice (AMA), M_w 6.0, avvenuto il 24/08/2016; ii) il terremoto di Castelsantangelo sul Nera (CSN), M_w 5.9, avvenuto il 26/10/2016; iii) il terremoto di Norcia (NOR), M_w 6.5, avvenuto il 30/10/2016; iv) il terremoto di Capitignano, M_w 5.5, avvenuto il 18/01/2017. Queste scosse, ravvicinate nel tempo, hanno dato un chiaro esempio di come effetti sismoindotti si possano cumulare sullo stesso territorio, aggravando, di volta in volta, lo scenario di danneggiamento indotto ed il grado di rischio derivato. La sequenza sismica ha innescato un totale di 828 effetti al suolo su un'area di circa 5000 km² (fig. 2d), rappresentati principalmente da frane per crollo in roccia, in media circa l'80% degli effetti sismoindotti censiti dopo ogni principale evento sismico, che hanno coinvolto le formazioni carbonatiche affioranti (appartenenti alla Successione umbro-marchigiana ed alla Successione laziale-abruzzese, Triassico - Miocene) e, solo secondariamente, il Flysch della Laga (Tortoniano - Messiniano). Queste frane, di volumetria inferiore al m³, hanno interferito significativamente (per oltre il

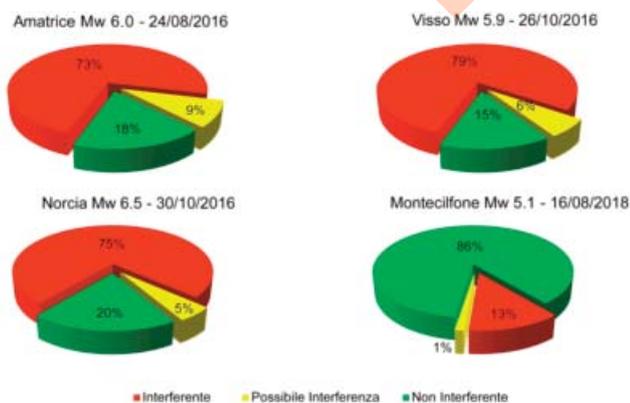


Fig. 3 - Distribuzione dei casi di interferenza con le reti viarie degli effetti sismoindotti censiti a valle delle tre scosse principali della sequenza sismica dell'Appennino Centrale 2016-2017 e per il terremoto di Montecilfone (CB) del 2018.

- Distribution of cases of interference with the road networks of the seismic effects recorded downstream of the three main shocks of the seismic sequence occurred in Central Apennines on 2016-2017 and of the Montecilfone (CB) earthquake in 2018.

70% dei casi) con la rete viaria (strade primarie e secondarie), spesso impedendo la loro percorrenza ai fini delle operazioni di primo intervento e di gestione dell'emergenza (fig. 3).

Il *dataset* relativo alla sequenza sismica dell'Appennino Centrale è stato utilizzato per un'analisi statistica atta a ponderare la dipendenza della distribuzione delle frane sismoindotte dalle condizioni morfologiche e dalla presenza di fattori predisponenti di natura antropica, quali i tagli stradali. La distribuzione volumetrica degli effetti censiti a seguito della sequenza sismica del 2016-2017 in Appennino Centrale, è del tutto confrontabile, per completezza, con altri *dataset* di volumetrie sismoindotte presenti in letteratura (MARTINO *et alii*, 2019b e riferimenti inclusi); ciò ha garantito una base statisticamente valida per applicare il metodo bayesiano del *Weight of Evidence* (WofE), che stabilisce quali fattori, sia morfometrici che antropici, sono predisponenti l'instabilità di versante mediante la quantificazione di indici e pesando, in modo bivaricato, il loro ruolo nell'innescare di frane in base alla distribuzione degli effetti sismoindotti censiti sul territorio. L'analisi condotta ha dimostrato (MARTINO *et alii*, 2019b) che, nelle situazioni vallive con morfologia a "V" tipiche dell'Appennino Centrale, la presenza di tagli stradali che interrompono la naturale pendenza del rilievo ha comportato un inasprimento delle condizioni predisponenti l'insorgenza di frane sismoindotte per crollo, comportando condizioni di maggiore propensione nel fondovalle (dove peraltro si localizzano la maggior parte delle tratte viarie primarie del territorio terremotato) rispetto alle zone di mezzacosta e di cresta (fig. 4).

Il secondo caso di applicazione del catalogo CEDIT ad analisi di scenario qui esemplificato si riferisce al terremoto di Montecilfone (CB), M_w 5.1 del 16/08/2018, che ha colpito la zona collinare periadriatica del Molise. In questo territorio affiorano essenzialmente terreni coesivi argillosi ascrivibili alle Formazioni delle Argille Scagliose (Cretaceo sup. - Miocene inf.), alle Argille Azzurre (Pliocene inf.) ed alle Argille Marnose (Pliocene inf.) e Flysch appartenente alla Formazione di Faeto o di Vallone Ferrato (Miocene med. - sup.) che originano rilievi a

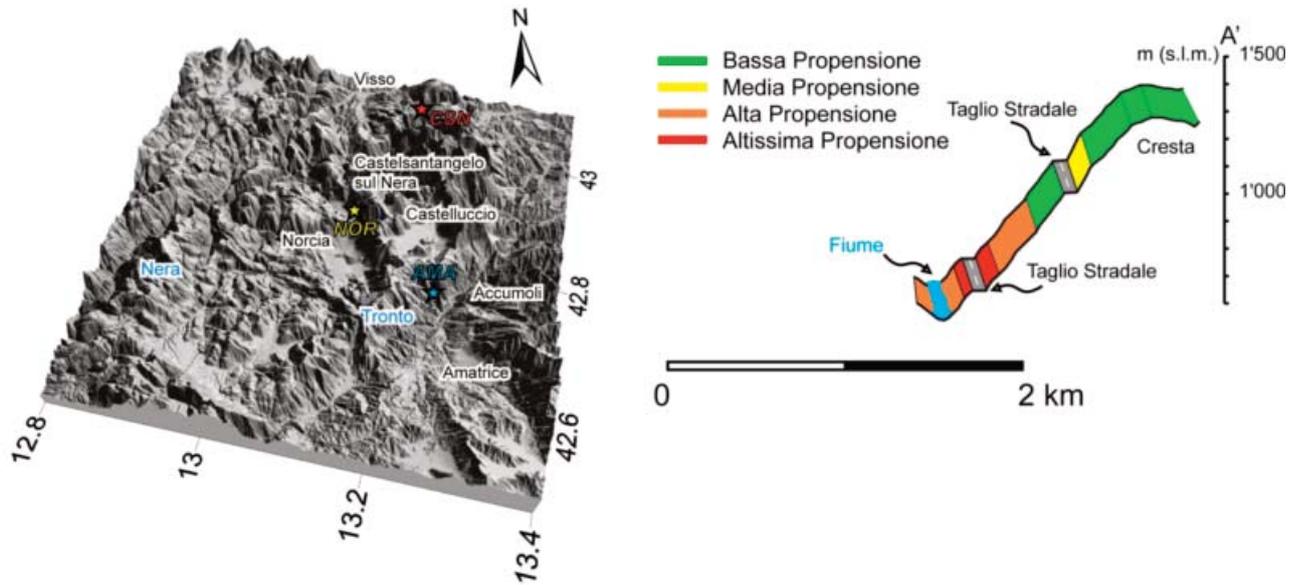


Fig. 4 - Schema semplificato di una tipica situazione valliva dell'Appennino Centrale che mostra la propensione all'innescio di frane lungo il versante dedotta dalle analisi di suscettibilità dalla cresta al fondo valle, in presenza di versante con taglio stradale (modificato da MARTINO *et alii*, 2019b).

- Sketch showing of a typical V-shape valley of the Central Apennines where proneness to landslide triggering is distinguished on the basis of landslide susceptibility analyzes of the slopes, from the ridge to the bottom of the valley, if a road-cut is present (modified by MARTINO *et alii*, 2019b).

debole pendenza (VEZZANI *et alii*, 2004).

Lo scenario di effetti sismoindotti rilevati nei giorni seguenti il terremoto comprende 84 frane, con prevalenza di movimenti coerenti in terra e delle coltri superficiali, e 4 fratture al suolo (*ground cracks*; fig. 5). In questo caso, l'azione sismica si è manifestata al termine di un intenso evento pluviometrico che, nella sola area colpita dal terremoto, ha accumulato oltre 120 mm di pioggia in 50 ore. Da un'analisi statistica, condotta sui dati storici presenti negli annali pluviometrici e sui dati misurati direttamente dalla rete dei pluviometri locali gestiti dalla Protezione Civile della Regione Molise, si evince come quest'evento pluviometrico non abbia connotati di particolare eccezionalità dal momento che la cumulata oraria dei millimetri di pioggia risulta avere un tempo di ritorno di 17 anni, la stessa cumulata su tre giorni risulta avere un periodo di ritorno di 13 anni mentre quella su 30 giorni un periodo di ritorno di alcuni anni (MARTINO *et alii*, 2020). Per quanto concerne, invece, la pericolosità sismica locale, il picco di massima accelerazione al suolo (PGA) registrato durante l'evento del 2018, pari a circa 0.09 g, corrisponde ad un periodo di ritorno compreso tra 100 e 150 anni. La proporzione e la distribuzione spaziale

esistente tra prime attivazioni di frane e riattivazioni ha posto in luce il ruolo predisponente giocato dalle piogge rispetto al concomitante evento sismico innescante.

Per ciò che riguarda la distribuzione spaziale dei crolli e degli scivolamenti in roccia censiti, questi si sono verificati ad una distanza inferiore alla massima attesa (10 km) per la specifica magnitudo del sisma (MARTINO *et alii*, 2014). Contrariamente, le frane per scorrimento in terra o scivolamento in coltri superficiali censite si sono verificate fino a circa 18 km dall'epicentro, ovvero ad una distanza anche tre volte superiore rispetto alla massima attesa per la specifica magnitudo del sisma (fig. 6).

Quest'ultima evidenza può essere associata all'azione combinata delle piogge e del sisma nei terreni coesivi; le prime, infatti, avrebbero innalzato la saturazione dei terreni, favorendo così, su versanti già predisposti, l'innescio da parte del terremoto di frane anche a distanze superiori a quelle attese in base alla magnitudo del terremoto (MARTINO *et alii*, 2020).

Analisi preliminari di suscettibilità ad oggi condotte mostrano come la concentrazione degli effetti sismoindotti censiti nel CEDIT ricada in zone carat-

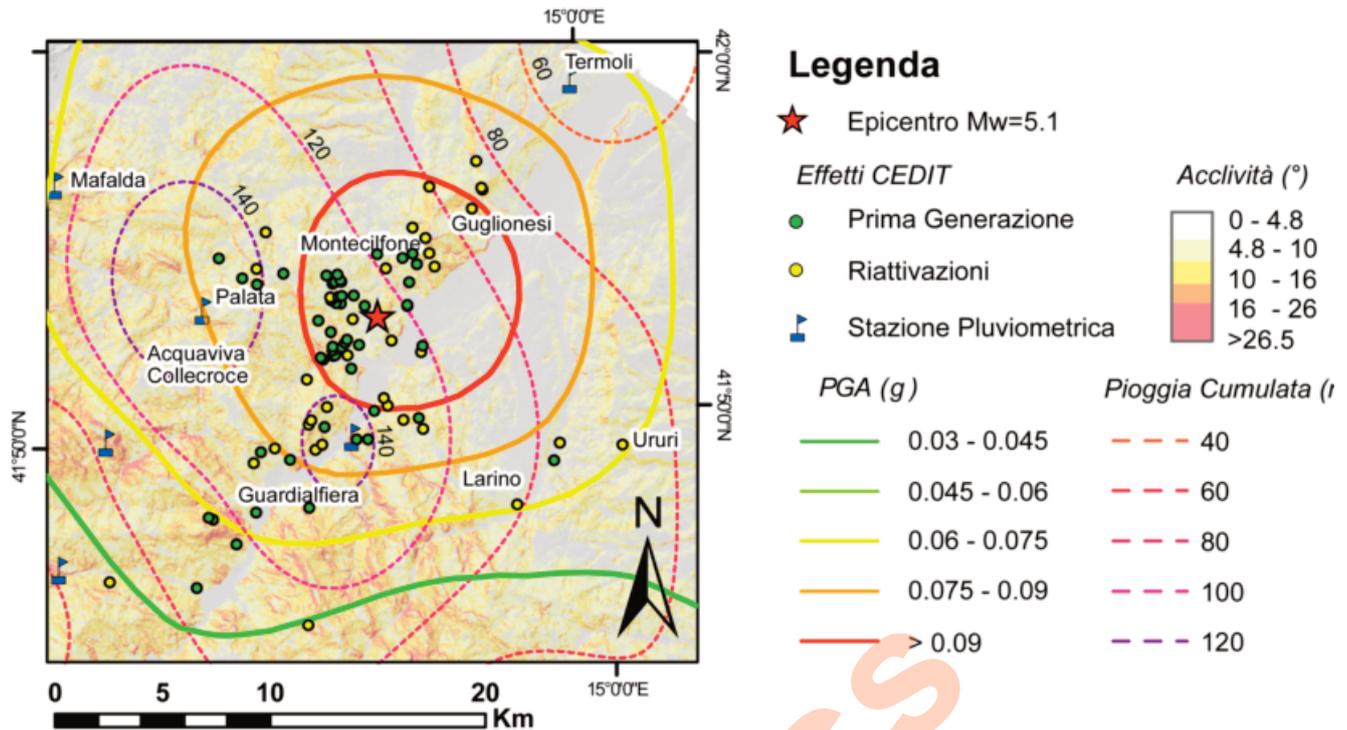


Fig. 5 - Distribuzione spaziale degli effetti sismoindotti dal terremoto di Montecifione (CB) di M_w 5.1, del 16/08/2018, proiettati sulla carta delle pendenze, in relazione alla mappa di scuotimento sismico, che riporta la distribuzione del PGA misurata dagli accelerometri della rete sismica nazionale (fonte: *shakemap.rm.ingv.it*), ed ai valori di precipitazione cumulati alle ore 18:00 del 16/08/2016 ovvero subito prima dell'evento sismico avvenuto alle ore 20:19 dello stesso giorno (modificato da MARTINO *et alii*, 2020).

- Spatial distribution of the seismic effects induced by the earthquake of Montecifione (CB) of M_w 5.1, occurred on 16th August 2018, plotted on a slope map, in relation to the seismic shaking map, which shows the distribution of the PGA measured by the accelerometers of the national seismic network (source: *shakemap.rm.ingv.it*), and to the cumulative precipitation values at 18:00 on 16/08/2016 or immediately before the seismic event which occurred at 20:19 on the same day (modified by MARTINO *et alii*, 2020).

terizzate da una più elevata suscettibilità a scorrimenti traslativi delle coltri detritiche presenti, con spessori fino a 3 metri sui terreni coesivi affioranti. La rarità di disporre di dati di censimento di effetti sismoindotti al suolo in concomitanza di eventi indipendenti, quali possibili agenti di innesco, dimostra la fruibilità del CEDIT anche ai fini di analisi di scenario relative all'azione combinata di più forzanti aventi probabilità di occorrenza tra loro indipendente. A tal proposito, gli effetti sismoindotti dal terremoto del Molise potranno essere utilizzati come *set* di validazione (*testing*) per analisi di scenario da frane sismoindotte coinvolgenti coltri superficiali caratterizzate da condizioni idrauliche differenziate nel tempo (ossia durante l'evento pluviometrico) e nello spazio. Queste ultime potranno essere condotte attraverso approcci di analisi probabilistica finalizzati alla definizione di scenari di franosità sismoindotta quali il metodo PARSIFAL (*Probabilistic Approach to Provide Scenarios of earthquake Induced slope FAiLures*;

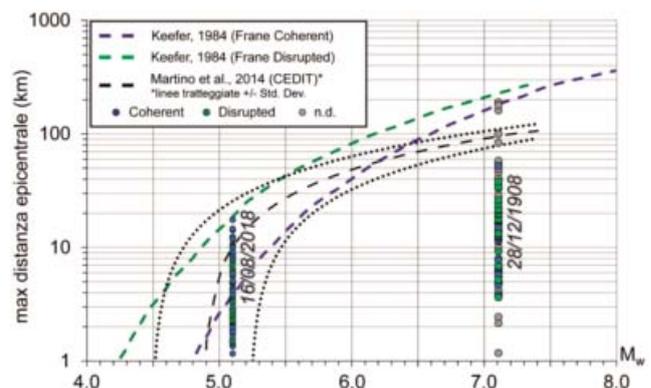


Fig. 6 - Curve Magnitudo vs. massima distanza epicentrale attesa: confronto tra le distanze alle quali sono state rilevate frane di tipo *disrupted* (cerchi verdi), entro la massima distanza attesa per il territorio italiano, e le frane di tipo *coherent* (cerchi blu) che, per buona parte, eccedono la massima distanza attesa. L'errore relativo alla localizzazione dei terremoti storici (cfr. Reggio e Messina, 1908) è inferiore ad 1 km (MARTINO *et alii*, 2014).

- Magnitude vs. maximum expected epicentral distance: comparison between the distances at which disrupted landslides were detected (green circles), within the maximum expected distance for the Italian territory, and coherent landslides (blue circles) which, for the most part, exceed the maximum expected distance. The error related to the location of historical earthquakes (see Reggio and Messina, 1908) is less than 1 km (MARTINO *et alii*, 2014).

ESPOSITO *et alii*, 2016; MARTINO *et alii*, 2018, 2019a), integrando analisi su primi inneschi e riattivazioni di frane già esistenti, in differenti condizioni di sollecitazione sismica e saturazione dei versanti.

4. - CONCLUSIONI

Il catalogo CEDIT rappresenta ad oggi il più aggiornato *database* relativo ad effetti sismoindotti sul territorio italiano sulla cui base è stato possibile elaborare statistiche sulla distribuzione di effetti sismoindotti e derivare, su base nazionale, curve di massima distanza attesa di effetti sismoindotti per magnitudo sismica. Il *database* del CEDIT ha consentito, inoltre, di effettuare analisi di scenario riferite ai recenti eventi sismici dell'Appennino Centrale (2016-2017) e del Molise (2018). Per ciò che riguarda lo scenario di sismoinduzione in Appennino Centrale, tali analisi hanno posto in luce, su base statistica, la dipendenza della distribuzione di frane sismoindotte da specifici contesti morfologici combinati alla presenza di tagli antropici. La rilevanza di questi risultati si riporta alla necessità di pianificare la ricostruzione post-sisma delle nuove infrastrutture viarie anche nell'ottica delle Condizioni Limite di Esercizio (CLE) oggi previste per finalità di Protezione Civile Nazionale nella pianificazione di emergenza, a garanzia degli accessi alle strutture strategiche in caso di sisma. Per ciò che riguarda, invece, la disponibilità di dati censiti a seguito del recente sisma del Molise, ha permesso di mettere in luce effetti di combinazioni di forzanti, derivanti dalla peculiare concomitanza di un evento pluviometrico intenso di ricorrenza decennale, con un evento sismico di ricorrenza centennale. L'analisi della distribuzione degli effetti censiti ha consentito di riconoscere il ruolo predisponente delle piogge rispetto a quello di innesco del sisma giustificando, in particolare, una non trascurabile eccedenza nella distanza di attivazione di frane in terra rispetto alle massime distanze attese, considerata la specifica magnitudo del sisma. Nell'ottica della definizione e previsione di scenari di evento, il *database* CEDIT può contribuire a supporto di una validazione di tali sce-

nari in base alla distribuzione degli effetti censiti, contribuendo alla delimitazione di zone di attenzione e suscettibilità per frana previste, a vari livelli, nei prodotti di studio e ricerca per la Microzonazione Sismica.

BIBLIOGRAFIA

- CAPRARI P., DELLA SETA M., MARTINO S., FANTINI A., FIORUCCI M. & PRIORE T. (2018) - *Upgrade of the CEDIT database of earthquake-induced ground effects in Italy*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **2**, 23-39.
- COMERCI V., VITTORI E., BLUMETTI A.M., BRUSTIA E., DI MANNA P., GUERRIERI L., LUCARINI M. & SERVA L. (2015) - *Environmental effects of the December 28, 1908, Southern Calabria-Messina (Southern Italy) earthquake*. Nat. Hazards, **76**(3), 1849-1891.
- DELFINO L. & ROMEO R.W. (1997) - *C.E.D.I.T., Catalogo nazionale degli Effetti Deformativi del suolo Indotti da forti Terremoti. Rapporto Tecnico SSN/RT/97/04*.
- ESPOSITO C., MARTINO S., PALLONE F., MARTINI G. & ROMEO R.W. (2016) - *A methodology for a comprehensive assessment of earthquake-induced landslide hazard, with an application to pilot sites in Central Italy*. in: Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice, CRC Press, 869-877.
- FORTUNATO C., MARTINO S., PRESTININZI A. & ROMEO R.W. (2012) - *New release of the Italian catalogue of earthquake-induced ground failures (CEDIT)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **2**, 63-74.
- GENEVOIS R., ARMENTO C. & TECCA P.R. (2002) - *Failure mechanisms and run out behavior of three rock avalanches in the North-Eastern Italian Alps*. Proceedings of the NATO advanced research workshop on Massive Rock Slope Failure: new models for hazard assessment, Celano (Italy) 16-21 June, 407-427.
- MARTINO S., PRESTININZI A. & ROMEO R.W. (2014) - *Earthquake-induced ground failures in Italy from a reviewed database*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., **14**, 799-814.
- MARTINO S. (2017) - *Earthquake-induced landslides in Italy: from the distribution of effects to the hazard mapping*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **1**, 53-67.
- MARTINO S., BOZZANO F., CAPOROSI P., D'ANGIÒ D., DELLA SETA M., ESPOSITO C., FANTINI A., FIORUCCI M., GIANNINI L.M., IANNUCCI R., MARMONI G.M., MAZZANTI P., MISSORI C., MORETTO S., RIVELLINO S., ROMEO R.W., SARANDREA P., SCHILIRÒ L., TROIANI F. & VARONE C. (2017) - *Ground effects triggered by the August 24th 2016, Mw 6.0 Amatrice (Italy) earthquake: survey and inventorying to update the CEDIT catalogue*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., **40**, 77-95.
- MARTINO S., BATTAGLIA S., DELGADO J., ESPOSITO C., MARTINI G. & MISSORI C. (2018) - *Probabilistic Approach to Provide Scen-*

- arios of earthquake Induced slope FAiLures (PARSIFAL) Applied to the Alcoy Basin (South Spain). Geosciences, 8(2), 57.*
- MARTINO S., BATTAGLIA S., D'ALESSANDRO F., DELLA SETA M., ESPOSITO C., MARTINI G., PALLONE F. & TROIANI F. (2019a) - *Earthquake induced landslide scenarios for seismic microzonation: application to the Accumoli area (Rieti, Italy)*. B. Earthq. Eng., <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00589-1>.
- MARTINO S., BOZZANO F., CAPOROSSO P., D'ANGIÒ D., DELLA SETA M., ESPOSITO C., FANTINI A., FIORUCCI M., GIANNINI L.M., IANNUCCI R., MARMONI G.M., MAZZANTI P., MISSORI C., MORETTO S., PIACENTINI D., RIVELLINO S., ROMEO R.W., SARANDREA P., SCHILIRÒ L., TROIANI F. & VARONE C. (2019b) - *Impact of landslides on transportation routes during the 2016–2017 Central Italy seismic sequence*. Landslides, **16**(6), 1221-1241.
- MARTINO S., ANTONIELLI B., BOZZANO F., CAPRARI P., DISCENZA M.E., ESPOSITO C., FIORUCCI M., IANNUCCI R., MARMONI G.M. & SCHILIRÒ L. (2020) - *Landslides triggered after the 16 August 2018 Mw 5.1 Molise earthquake (Italy) by a combination of intense rainfalls and seismic shaking*. Landslides, <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01359-w>.
- PRESTININZI A., ROMEO R.W. (2000) - *Earthquake-induced ground failures in Italy*. Eng. Geol., **58**, 387-397.
- VARNES D.J. (1978) - *Slope movements types and processes*. In Schuster R.L. & Krizek R.J. (ed.), "Landslides-Analysis and Control", National Academy of Sciences and Transportation Research Board, Special report **176**, 12-33.
- VEZZANI L., GHISETTI F. & FESTA A. (2004) - *Geological map of Molise (scale 1: 100000)*. S.E.L.C.A.
- ZECCHI R. (1987) - *Carta della distribuzione degli effetti geomorfologici indotti dai terremoti che hanno interessato l'Italia dall'anno 0 al 1986*. Mem. Soc. Geol. It, **37**, 823-826.

in press