Articolo

Caratterizzazione idrogeologica, idrochimica e radiometrica di alcuni corpi di frana dell'Appennino emiliano. Casi di studio: Vedriano, Cà Lita e Silla

Silvia Baraldi
Laureata in Scienze Geologiche, Università di Modena e Reggio Emilia

INTRODUZIONE

La complessità geologica e strutturale che caratterizza l'Appennino Emiliano Romagnolo e la presenza di formazioni costituite prevalentemente da formazioni ricche nella frazione argillosa e geomeccanicamente complesse e deboli rendono questo territorio, tra quelli d'Italia, quello con il maggior numero di dissesti idrogeologici ascrivibili a frane. La maggior parte delle frane dell'Emilia Romagna sono fenomeni antichi, riattivate in situazioni climatiche verificatesi nel passato, ma alcune sono di riattivazione recente.
A questo particolare assetto predisponente i dissesti si aggiungono poi altri elementi che contribuiscono a rendere i versanti più instabili, come la risalita di fluidi profondi e gas attraverso faglie (Bertolini & Gorgoni, 2001; Gorgoni & Pallante, 2000a; Gorgoni et al., 1988).
Si tratta delle frane di Cà Lita e Vedriano, situate rispettivamente nei Comuni di Baiso e Canossa appartenenti alla Provincia di Reggio Emilia e alla frana di Silla, nel Comune di Gaggio Montano, in Provincia di Bologna.
Le tre frane rappresentano tre distinte realtà; situate infatti in diversi contesti geologici, interessano formazioni geologiche diverse e non possiedono una comune storia tettonica di dettaglio, se non nella visione più ampia della formazione della catena appenninica settentrionale. Tuttavia, dette frane, sono state scelte perché, nonostante le diversità, sono accomunate da manifestazioni in superficie di acque e gas che provengono dalle parti più profonde della catena appenninica.
Queste manifestazioni di fluidi profondi possono essere fattori **predisponenti** alla pari di altri, quali: la situazione tettonica e geologica, il tipo di formazioni affioranti, i loro rapporti reciproci ed il decadimento geomeccanico delle formazioni. Tuttavia, non si ritiene sia ancora possibile considerare, tali fattori predisponenti, alla pari dei fattori **innescanti** quali: le precipitazioni, i sovraccarichi, gli scalzamenti al piede e le opere di escavazione. Infatti, risulta difficile quantificare l'effetto dei fluidi profondi sulla stabilità di un versante in quanto, ad ora, non sono disponibili numerosi studi precedenti che riguardano tale aspetto.
In particolari contesti, i fluidi profondi, come gas e acqua, potrebbero comunque determinare l'attivazione di un fenomeno franoso.
La riattivazione delle frane in studio avviene in seguito al distacco di frane minori dalla zona di coronamento che rappresenta altresì la zona più instabile del versante. L'avanzamento dei corpi franosi, conseguente alle deformazioni legate al movimento degli stessi lungo il versante, provoca nuove fratture che facilitano il drenaggio dell'acqua all'interno degli accumuli di frana riducendo le pressioni interstiziali. I corpi di frana avanzano verso valle scivolando in modo traslativo con scarse deformazioni interne e la trasformazione in una vera e propria colata di terra avviene se l'evento si prolunga per mesi o anni e solo se vi è la presenza di grandi quantitativi di acqua, come si riscontra lungo il versante della frana di Vedriano (BERTOLINI & GORGONI, 2001). La velocità di movimento del corpo di frana può restare al di sotto di un livello accettabile in cui gli insediamenti umani possono svilupparsi, oppure accelerare fino a provocare un rimaneggiamento dell'intera frana, come si è verificato sul pendio che ospita la frana di Vedriano e per quello che ospita la frana di Cà Lita.
Gli obiettivi concorsi sono, quindi, quelli di analisi delle acque circolanti all'interno dei versanti in frana con lo scopo di stabilirne l'origine, i loro possibili percorsi sotterranei, gli eventuali mescolamenti con altri fluidi, e l'analisi delle loro eventuali azioni sui dissesti.
Oltre alla suddetta analisi chimica delle acque, svolta su tutte e tre le frane citate, alla frana di Cà Lita è stata condotta una campagna di rilevamento della concentrazione di gas Radon nei terreni propriamente interessati dal dissesto e nelle aree circostanti, nonché di uno studio riguardante le direttrici di flusso superficiale delle acque che in essa circolano mediante una prova idrogeologica di tracciamento al fine di avere una visione completa dei meccanismi che avvengono in profondità e che influenzano sia la circolazione superficiale sia le manifestazioni di fluidi e gas dalla profondità.

LA FRANA DI CÀ LITA

Caratteristiche generali ed eventi recenti

Secondo la classificazione di Cruden & Varnes (1996), che considera il tipo di movimento e il materiale coinvolto, si può definire la frana di Cà Lita come un fenomeno complesso e composito che si attua secondo meccanismi di scivolamento rotazionale e/o traslativo di roccia, scivolamenti rotazionali e/o traslativi di terra e colate di terra o di fango.
Se si osserva il corpo di frana si ritrova la morfologia tipica dei movimenti gravitativi: evidenti scarpate e trincee gravitative. Verso valle, la morfologia cambia diventando sub-pianeggiante, con colate fluide di terra che scendendo seppelliscono le precedenti.
Nella parte alta della frana, oltre alla scarpata principale, ve ne è una secondaria, non meno importante (50-70 m di dislivello) e che separa la colata dagli scivolamenti di roccia.
La frana di Cà Lita ha avuto in passato diverse riattivazioni

Figura 1 - La frana di Cà Lita vista dal versante opposto.

che hanno più volte minacciato la sicurezza degli abitati posti nella zona di coronamento e di piede.
Nel dicembre 2002, a valle di Corciolano e Cà Lita, si è attivato un movimento di imponenti dimensioni.
Nell'aprile 2003 si ha una nuova mobilizzazione del corpo, avvenuto principalmente al piede della colata. L'avanzamento del piede di frana, di circa 100-150 metri, nei mesi successivi alla riattivazione del dissesto indica una mobilizzazione totale del corpo della colata con conseguente coinvolgimento di parte del bosco e dei campi posti a monte del centro abitato di Cargnone.
Nel corso del mese di aprile 2004, il piede raggiunge in pochi giorni la strada comunale per Levizzano e il fronte della colata, per la prima volta, riempie interamente la vallecola posta a nord di Cargnone.
Qualche tempo dopo il termine delle precipitazioni, il corpo di colata ha avuto una graduale riduzione della velocità, fino ad assestarsi.
Nel novembre 2004 si registra un'altra riattivazione in corrispondenza della zona delle scarpate poste nei pressi di Corciolano, dove si osserva la nuova formazione di scarpate gravitative collegate alla riattivazione di una porzione del corpo di frana, tale dislocazione è stata registrata dagli strumenti di monitoraggio recentemente installati (Mazzoli, 2003).
Dal gennaio 2005 non si sono avuti nuovi movimenti complessivi della colata, anche grazie alla numerosa serie di interventi che sono stati realizzati nella zona di scarpata e coronamento della frana e che hanno portato alla costruzione di vari muri di sostegno e notevoli opere di drenaggio.

LA FRANA DI SILLA

Caratteristiche generali

La frana di Silla si è riattivata il 14 novembre 1994 e consiste in un movimento roto-traslativo che interessa terreni argillitici a struttura complessa facenti parte della Formazione delle Argille a Palombini. Il fenomeno franoso, è in realtà diviso in due settori, uno inferiore che si estende per una lunghezza di 950 m ed uno superiore di 1220 m di lunghezza (fig. 2). L'evento del novembre 1994 ha interessato essenzialmente il settore superiore nel quale la riattivazione si è verificata con un meccanismo roto-traslativo, che ha interessato un volume totale stimabile a circa 3,5 milioni di m^3.

Il settore inferiore invece, la cui ultima riattivazione importante è avvenuta nel 1937, è stato interessato solo da limitati movimenti nell'area di coronamento e di piede. Tuttavia, fin dai primi segnali di innesco, la frana ha determinato una situazione di allarme per i beni e le attività situati nel settore inferiore del versante. Infatti, sul piede di frana sono situate alcune abitazioni, un insediamento industriale e la strada statale 324.
All'origine del movimento avvenuto a carico dei materiali che compongono la frana di Silla sono concorse, oltre che cause innescanti, anche fattori predisponenti, uno dei quali rappresentato dalla risalita di gas metano. Infatti, si è rilevata l'emissione continua di metano durante ed in seguito alla realizzazione dei fori di sondaggio geognostico.
Tuttavia, la causa principale di innesco del fenomeno è da attribuire alle precipitazioni dell'autunno del 1994. In particolare, nel mese di settembre sono caduti 179 mm di pioggia in soli due giorni, pioggia che deve essere sommata a quella caduta durante il periodo estivo e che con le successive piogge di inizi novembre hanno causato un'improvvisa accelerazione del materiale. Durante il massimo spostamento sono state misurate velocità dell'ordine dei metri al giorno.

Condizioni idrogeologiche

La frana di Silla è composta da terreni che presentano un'elevata componente argillosa e risultano interessati da superfici di taglio di origine tettonica. Le formazioni prevalentemente argillose presentano una permeabilità per fessurazione scarsa e una permeabilità primaria praticamente nulla.
Lo sviluppo antropico negli ultimi decenni ha portato a profonde alterazioni della rete di drenaggio superficiale e ha determinato in parte anche modificazioni del sistema di circolazione idrica profondo. Infatti, poco a monte della località Montecchi emergeva una sorgente che è completamente scomparsa in seguito alla riprofilatura e gradonatura del versante.
L'ultima riattivazione del novembre 1994, che ha interessato la parte alta della frana con un movimento roto-traslativo, è avvenuta a seguito dell'effetto delle precipitazioni dell'autunno 1994. In particolare, le piogge del mese di novembre risultano essere eventi ordinari; tuttavia in settembre sono caduti quasi 180 mm di pioggia in un singolo evento durato solo due

Figura 2 - Immagine della frana di Silla, in rosso il limite della frana

giorni che probabilmente ha portato all'innesco principale che è stato poi seguito dall'accelerazione al primo temporale successivo, verificatosi proprio nel mese di novembre in cui sono bastati 52 mm di pioggia in tre giorni per riattivare complessivamente la parte alta della frana. Da questa breve analisi si può riconoscere l'esistenza di un certo tempo di ritardo tra il verificarsi di un'intensa precipitazione e la riattivazione del corpo di frana. Ciò è da imputare alla bassa permeabilità, dei terreni argillosi che compongono i materiali coinvolti nel fenomeno, la quale si attesta su valori inferiori a $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Anche se la circolazione idrica per fessurazione all'interno dei terreni argillosi strutturalmente complessi non risulta di facile definizione, i dati permettono di affermare che la permeabilità è comunque distribuita in modo omogeneo in tutto il versante.

CARATTERIZZAZIONE GEOCHIMICA DELLE ACQUE CIRCOLANTI ALL'INTERNO DELLE FRANE DI CÀ LITA E SILLA

Introduzione

L'analisi geochimica delle acque sotterranee consente di raccogliere informazioni utili a definire l'origine e l'evoluzione delle acque nonché i possibili percorsi sotterranei.
I numerosi fattori che concorrono alla determinazione delle proprietà chimiche e fisiche delle acque dipendono non da ultimo dalla composizione mineralogica del litotipo attraversato, dai tempi di permanenza nel sottosuolo, dalla possibilità di mescolamento con acque a composizione chimica diversa, oltre che dalle caratteristiche proprie che l'acqua possiede prima di interagire con l'interfaccia solida della roccia serbatoio o venire a contatto con acque di origine profonda.
Nell'Appennino settentrionale, l'esistenza di fenomeni franosi originati o comunque favoriti da dinamiche e fenomeni alquanto complessi, da correlare alla risalita di fluidi più o meno profondi, è stata messa in risalto solo in tempi abbastanza recenti. Si fa riferimento, in particolare alla frana di nel medio Appennino della Provincia di Reggio Emilia. (Bertolini & e Gorgoni, 2001).
Tale movimento franoso risulta alquanto anomalo per tutta una serie di peculiarità; come la notevole fluidità dell'ammasso prevalentemente pelitico in movimento e la relativa indipendenza della sua attività rispetto al regime pluviometrico locale (Bertolini & Pellegrini, 2001).
In prima istanza, le analisi per diffrattometria-x su efflorescenze saline biancastre (Di Lorenzo, 1997) ne evidenziavano una composizione a base di Thenardite (solfato di sodio biidrato) e Natron (bicarbonato di sodio), confermando quindi la singolarità del fenomeno. Si tratta infatti di sali di tipo evaporitico continentale, assolutamente incongruenti in rapporto alle caratteristiche geografico - climatiche e litologico - mineralogiche della zona studiata.
Un'ulteriore particolarità è rappresentata dalla presenza, in corrispondenza della zona di coronamento, di estese efflorescenze saline biancastre sul terreno, specie nei periodi più siccitosi; queste inducevano ad ipotizzare l'esistenza di impregnazioni di acque a chimismo anomalo, o quanto meno elevato.
Nell'ambito dello studio effettuato da Bertolini & e Gorgoni, 2001, è stata condotta un'accurata indagine idrogeochimica su di una serie di campioni d'acqua prelevati in corrispondenza di piezometri e pozzetti posti nella parte superiore del corpo di frana, implementando e meglio dettagliando alcuni dati preliminari desunti dalla letteratura. Si fa riferimento, in particolare, ad uno studio effettuato in precedenza da ricercatori dell'Università di Firenze su numerose acque "anomale" in diverse località dell'Emilia-Romagna, comprese quelle della parte alta della Frana di Vedriano (Boccasavia, 1997).
Le analisi idrogeochimiche hanno poi permesso di inquadrare meglio il fenomeno; la particolare composizione delle acque affioranti in località Roncovetro, è spiegabile come il risultato di complessi fenomeni evolutivi che avvengono in profondità, manifestazioni peraltro già modellizate in precedenza, in senso generale da Gorgoni et al., 1982.
Quel modello genetico è stato esteso ad altre aree con fenomeni analoghi nell'Appennino emiliano (Cà Lita, nel Reggiano e Silla nel Bolognese).

Il chimismo delle acque della frana di Cà Lita

Una serie di campioni di acqua sono stati prelevati in diverse posizioni del corpo della frana di Cà Lita.
Per quanto riguarda gli anioni, il contenuto in cloruro non è omogeneo ma alquanto variabile; questo è indicativo di un modesto apporto di acque connate. Il contenuto in solfato è elevato, variabile nell'intorno di 1.000 ppm. Le concentrazioni di ione bicarbonato, alquanto variabili, sono invece mediamente inferiori.
Circa i cationi, il sodio è elevato, variando da molte centinaia a quasi 1.160 ppm. Il potassio è basso come nella maggior parte dei casi, sempre inferiore a 10 ppm. Gli alcalino-terrosi, calcio e magnesio, si mantengono mediamente su una concentrazione variabile da circa 2 ppm a 23 ppm come accade di norma, e solo in un campione, "vasca destra", si raggiungono circa 70 ppm di calcio e circa 50 ppm di magnesio. Rielaborando queste concentrazioni assolute in termini stechiometrici, se ne deduce una composizione delle acque a base di solfato di sodio e bicarbonato di sodio, soprattutto nei termini "estremi". Peraltro, nel caso di Cà Lita, questi due sali tipici, indicativi dei complessi processi evolutivi attivi in profondità, sono a volte accompagnati da quantitativi subordinati ma non trascurabili di cloruro sodico, da correlare invece alla componente connata.
In riferimento al grafico di Piper (fig. 3), si evidenzia il gruppo principale addossato al vertice rappresentativo di acque solfato-clorurato-alcaline. Tale configurazione è evidentemente legata alla minore rappresentatività percentuale della componente bicarbonato sodica, dato che a Cà Lita essa è in parte sostituita da quella clorurato sodica.
Per completare la discussione estendendola anche ai campioni lontani dal gruppo principale, nel caso di Cà Lita si riscontra un campione (vasca destra) posto in transizione al vertice nord (idrotipo estremo delle acque solfato calciche), lungo una ben definita linea di mescolamento, anche se in una posizione leggermente più bassa. Non a caso, questo campione, di cui si è accennato in precedenza, è quello con i maggiori contenuti di calcio e di magnesio. Si devono quindi desumere fenomeni di mescolamento, in risalita, tra le acque profonde solfato, bicarbonato (e clorurato) sodiche ed altre acque solfato calciche. Mancano del tutto, invece, quei punti in transizione verso il vertice ovest, indicativi di mescolamento con acque bicarbonato calciche più superficiali.

Inoltre, analizzando il grafico di Piper rappresentante il chimismo delle acque di Cà Lita, se si delinea una traccia di mescolamento verticale che unisce i vertici nord e sud del grafico, indicativi di interazione tra acque bicarbonato sodiche e solfato calciche, il punto rappresentativo dell'acqua non sarà a metà del segmento, quindi al centro del rombo, ma spostato verso destra in orizzontale sul vertice rappresentativo delle acque solfato-clorurato-alcaline. Il mescolamento tra queste due componenti estreme in proporzioni stechiometricamente variabili determinerà la formazione di acque solfato calciche, solfato sodiche e bicarbonato sodiche i cui punti rappresentativi, ricavati dalla traslazione orizzontale verso destra a partire da un punto sulla traccia verticale, giacciono nelle vicinanze del vertice rappresentativo di acque solfato-clorurato-alcaline. In definitiva, un'acqua solfato sodica coincide perfettamente con l'idrotipo estremo solfato-clorurato-alcalino (sodico).

Il chimismo delle acque della frana di Silla

I dati per questa località, relativi a campioni prelevati da opere drenanti e piezometri di frana, sono stati integrati da ulteriori dati relativi ad una precedente prospezione idrogeochimica (Boccasavia, 1997). Tutti questi dati sono stati a loro volta tabulati e rappresentati sul diagramma di Piper (fig. 4).
In linea generale, il contesto composizionale e il quadro genetico è analogo a quello prima descritto per il corpo franoso di Cà Lita, ma con alcune differenziazioni. Relativamente agli anioni, la distribuzione dello ione cloruro varia da poche decine a 450 ppm; quindi, la componente connata è presente, ma meno accentuata. Il bicarbonato è ampiamente variabile a partire da minimi di un centinaio di ppm, fino a raggiungere valori massimi di poco oltre 600 ppm. Il solfato è pure ampiamente variabile a partire da minimi assolutamente modesti di poche decine di ppm. I massimi, peraltro, intorno a 1.300 ppm, si estendono anche ad oltre 5.000 ppm in un campione (Silla 45N).
Per quanto riguarda i cationi, la loro distribuzione riflette ovviamente quella degli anioni. Il potassio presenta bassi valori (poche ppm), ma in alcuni casi si diversifica notevolmente, raggiungendo le decine di ppm e, in un caso, superando addirittura i 100 ppm. Gli alcalino-terrosi sono fortemente variabili, da tracce minime a decine o anche centinaia di ppm sia per il calcio che per il magnesio; quest'ultimo, addirittura, supera i 750 ppm in uno dei campioni. Il sodio è in generale il catione più rappresentato. Esso varia solitamente fra qualche decina e qualche centinaio di ppm, ma è presente un campione (Silla 45N) in cui il contenuto di solfati supera addirittura i 1.300 ppm.
Volendo meglio dettagliare gli aspetti stechiometrici, le concentrazioni dei vari costituenti definiscono una composizione alquanto diversificata. Nel caso di Silla, si riconoscono alcuni campioni vicino al vertice tipico degli idrotipi estremi solfato o clorurato sodici. Infatti, si evidenziano quattro campioni disposti lungo la linea di mescolamento tra l'idrotipo solfato-clorurato-alcalino e l'idrotipo bicarbonato-alcalino, in posizioni molto distinte: uno verso l'alto (Silla 40I), in prossimità del vertice indicativo di una composizione a solfato e cloruro di sodio dominanti, con poco bicarbonato di sodio, due al centro (Silla 9 e 22), e uno verso il basso(Silla 10), in prossimità del vertice indicativo di una composizione a bicarbonato di sodio prevalente.
Non sono però questi gli idrotipi a carattere più peculiare, ovvero, nel caso di Silla, essi sono invece disposti a ridosso del lato NE, nel suo settore centrale, ed evidenziano le mag-

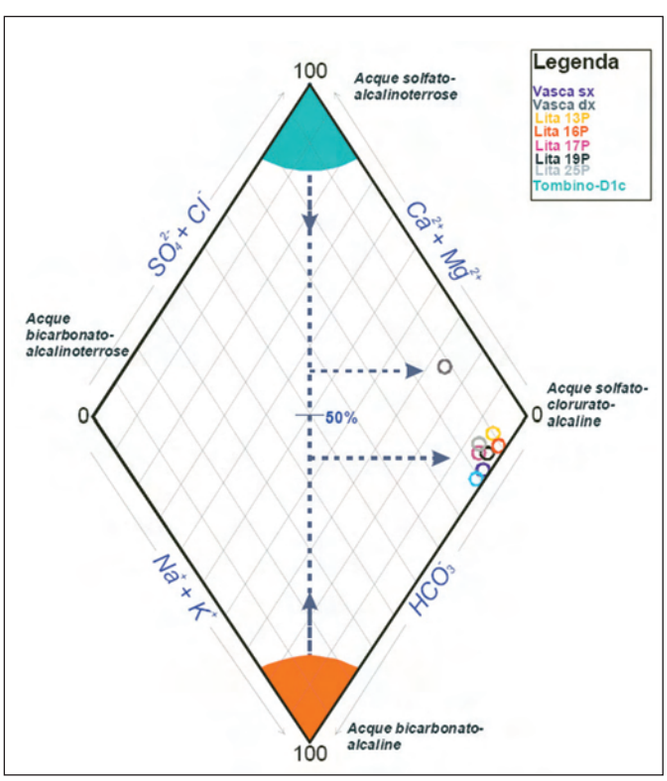

Figura 3 - Proiezione sul diagramma di Piper dei campioni raccolti sulla frana di Cà Lita.

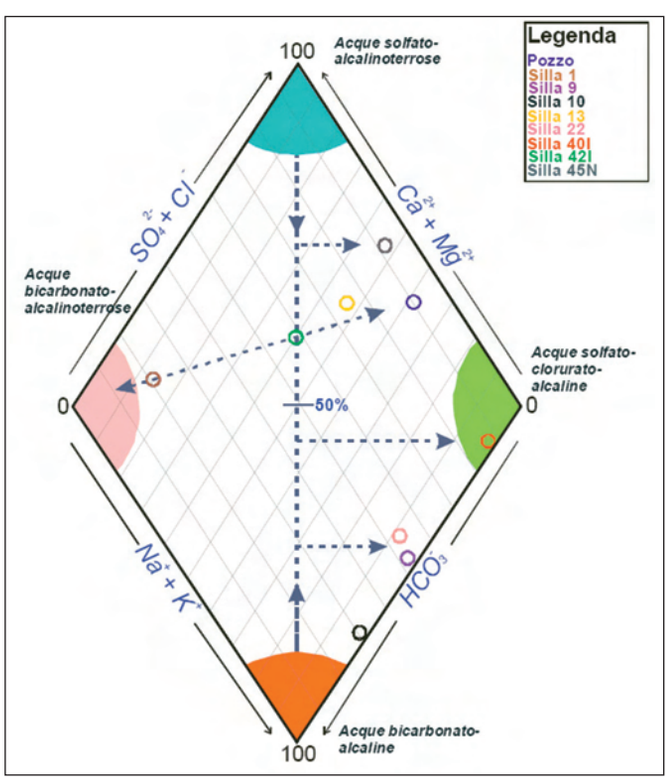

Figura 4 - Proiezione sul diagramma di Piper dei campioni raccolti sulla frana di Silla.

giori concentrazioni di solfato (oltre 1.300 ed oltre 5.000 ppm, rispettivamente). Si tratta in questo caso di composizioni abbastanza equilibrate solfato alcaline (sodiche) e solfato alcalino-terrose (calciche e magnesiache), con una componente bicarbonato (e clorurato) sodica questa volta del tutto subordinata. Questo idrotipo sarebbe il risultato del mescolamento tra acque superficiali ed acque connate.

MISURE DI GAS RADON NEI TERRENI DELLA FRANA DI CÀ LITA

Nell'area dove si sviluppa la frana di Cà Lita sono state riconosciute manifestazioni di fluidi che provengono dalle parti più profonde del substrato. Precedentemente si è approfondito lo studio delle acque che risalendo da notevoli profondità portano ad avere una composizione chimica anomala.
Le manifestazioni di fluidi profondi prima citate non sono rappresentate solamente dalle acque, ma possono comprendere anche gas. Allo scopo di approfondire questo aspetto è stata effettuata la determinazione del contenuto di gas Radon nei terreni che interessano il corpo franoso. In particolare si è deciso di effettuare le misurazioni sia nei depositi che compongono il corpo di frana sia in vicinanza che in corrispondenza di sistemi di faglie che sono presenti nell'area circostante. Come si è potuto approfondire precedentemente riguardo alla situazione tettonica della zona, che appare intensamente fratturata, con l'analisi della concentrazione di gas Radon si è ricercata una correlazione tra presenza di faglie e risalite di gas dalla profondità.
Le analisi si sono svolte in un arco di tempo di oltre un anno e hanno coperto un'area di circa 40 km^2, per un totale di 84 misurazioni. Per quanto riguarda le numerose faglie presenti si sono indagate quelle ritenute più attive ed importanti. Lo strumento impiegato per le misurazioni, il *RADON DETECTOR, RD-200, EDA* - Toronto - Canada, fornisce i "counts per minuto" relativi alla concentrazione delle particelle _ presenti nel campione d'aria.
Per una migliore visualizzazione, sulla carta (fig. 5), i punti Radon sono stati rappresentati di grandezza variabile e direttamente proporzionale al valore di emissione (Bq/m^3). Se si fa una comparazione tra i valori misurati in prossimità della frana ed i valori misurati lontano dal fenomeno, si nota come essi siano maggiori in prossimità della frana di Cà Lita. Inoltre, osservando in particolare le oltre 40 misurazioni effettuate ai lati del corpo di frana si denota una sistematica presenza di valori più alti nella zona di coronamento, dove sorgono gli abitati di Levizzano, Casino, Cà Lita, Corciolano e Cassola, e lungo il fianco sinistro, che corrisponde anche alla strada comunale che dal fondovalle del Fiume Secchia porta all'abitato di Levizzano e dove sorgono le località Lugara e Il Borgo.
In particolare le misurazioni effettuate nell'area della frana di Cà Lita i valori di gas Radon misurati in prossimità del corpo di frana variano da 1795 a 84484 Bq/m^3 con un valore medio stimato in circa 37700 Bq/m^3. Una possibile spiegazione della presenza di alte concentrazioni di gas Radon ai lati del deposito franoso è quella di risalita di gas dal substrato posto sotto al fenomeno franoso, il gas verrebbe in seguito disperso ai lati, guidato dalla superficie di scivolamento, e dal cambiamento di permeabilità che si verifica passando dal substrato al deposito di frana. Infatti, nel substrato, la veicolazione del gas è prevalentemente controllata da permeabilità per fessurazione e/o fratturazione che comporta la risalita del gas attraverso spazi più ampi di quanto si verifica nei depositi sabbioso-limosi ed argilloso-limosi del corpo di frana dotati invece di una permeabilità molto inferiore. Allontanandosi dalla frana e volendo approfondire il comportamento del gas Radon lungo gli stendimenti che intercettano le faglie indagate, si nota come i valori variano tra 1795 e circa 51000 Bq/m^3 con un valore medio di circa 18000 Bq/m^3 .
Riassumendo, in seguito alle misurazioni effettuate nell'ambito della caratterizzazione radiometrica dell'area circostante la frana di Cà Lita, si può affermare che, in generale, i valori più alti registrati si ritrovano nelle immediate vicinanze del corpo di frana, ed in particolare lungo i lati, controllati dall'effetto tampone del deposito franoso, non esiste una totale correlazione tra la presenza di faglie ed emanazione di gas Radon.
Oltre a queste principali valutazioni, visualizzando la carta (fig. 5) rappresentante la distribuzione dei punti Radon, si nota anche come misurazioni effettuate all'interno della stessa litologia abbiano dato risultati molto diversi. È il caso della Formazione di Monghidoro, qui rappresentata in maniera preponderante dal Membro arenaceo-pelitico (MOH3), in cui le misurazioni hanno dato un valore medio di Radon pari a circa 12000 Bq/m^3 nei punti posti a maggior distanza dalla frana, e di circa 38000 Bq/m^3 per i punti posti in prossimità della frana.
In definitiva, considerando i numerosi fattori che portano alla formazione, emanazione e veicolazione di gas Radon, si evince come il gas Radon dipenda da più aspetti che variano nel tempo e nello spazio e che risultano di difficile identificazione.
Lo studio effettuato riguardante il particolare aspetto della distribuzione di gas Radon nei terreni, non ha la pretesa di mostrarsi esaustivo ma funge da punto di partenza per successive caratterizzazioni future, sia di approfondimento in questa stessa zona, che come modello di comparazione per altre zone vicine a corpi di frana che sembrano possedere una dinamica più o meno influenzata dalla risalita di fluidi profondi.

PROVA IDROGEOLOGICA DI TRACCIAMENTO

Nell'ambito del presente lavoro di Tesi è stato effettuato uno studio rivolto alla determinazione delle principali linee di flusso percorse dalle acque di falda superficiali che attraversano la frana di Cà Lita. Tale approccio si avvale dell'uso di un tracciante che, iniettato direttamente in falda attraverso un pozzo, descrive il percorso che ha compiuto all'interno del corpo di frana. Il tracciante viene captato e recuperato grazie alla presenza di numerosi pozzi, piezometri di monitoraggio e sistemi di drenaggio posti a valle del punto di immissione.
La prova di tracciamento consente di delineare la struttura degli acquiferi e le loro proprietà idrogeologiche. Il metodo si basa sul monitoraggio delle vie di uscita di una sostanza iniettata artificialmente in un acquifero. In particolare, la prova permette di:
– sperimentare il metodo di tracciamento in aree franose;
– identificare le principali direzioni di flusso idrico sotterraneo nei terreni di frana e nel substrato;
– definire i parametri idrogeologici attraverso la misura dei tempi di arrivo e delle quote in cui si trovano i punti di campionamento mediante analisi di campioni d'acqua e carboni attivi.
Utilizzata in modo preponderante in acquiferi carsici, negli

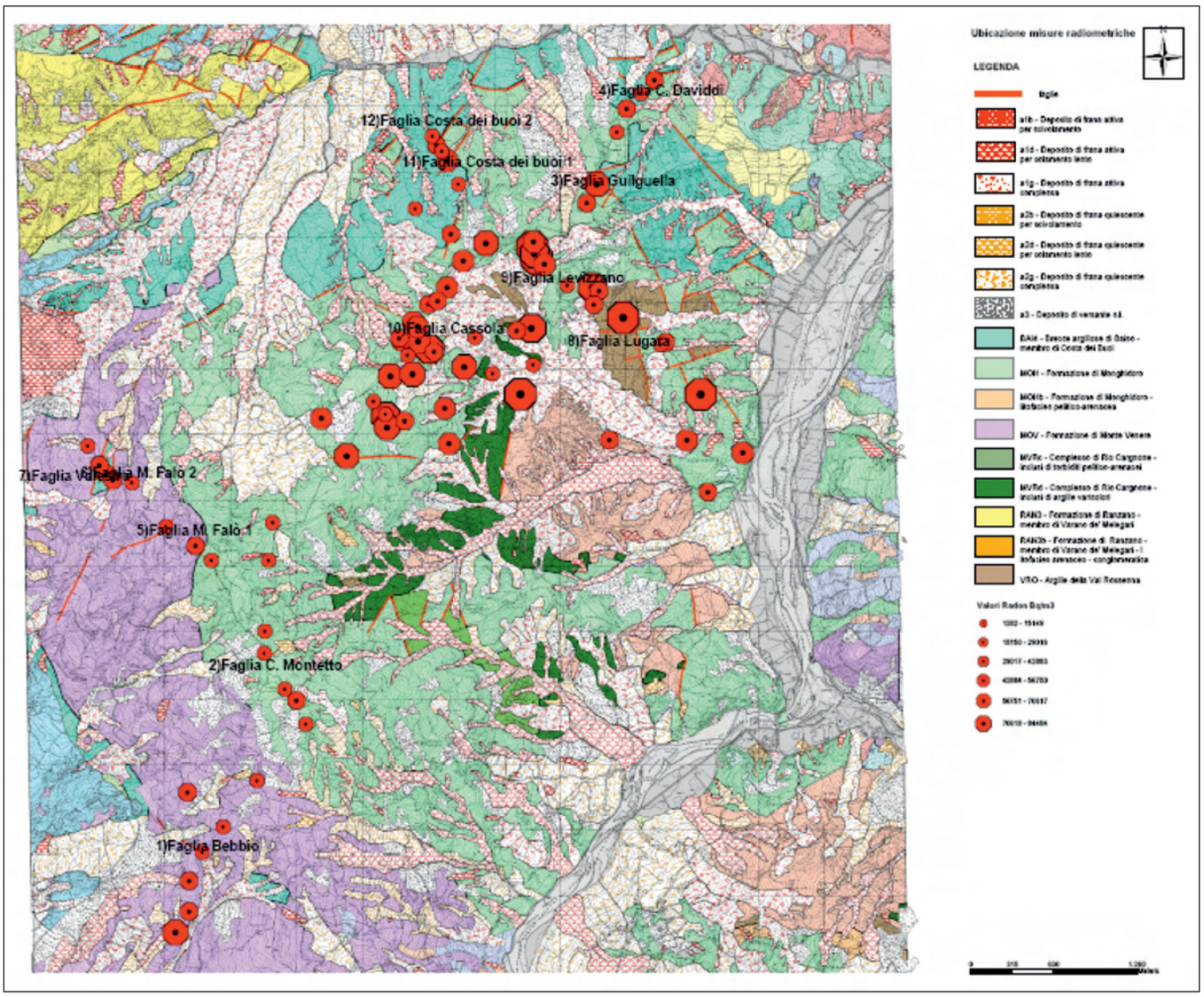

Figura 5 - Ubicazione dei punti in cui si è rilevata la concentrazione di gas Radon nei terreni.

ultimi anni lo studio ha trovato applicazione anche in mezzi porosi e fratturati in particolare per la simulazione del trasporto di sostanze inquinanti (Schudel et al.,2002; KÄss, 1998).
Il principale svantaggio delle prove con tracciante è il fatto che se un campione si presenta negativo all'analisi, non significa che il tracciante non sia passato dal punto di immissione al punto di prelievo interessato. Infatti, il composto potrebbe risultare non rilevabile per eccessiva diluizione. Proprio nel contesto di un mezzo fratturato e poroso si colloca la zona dove si sviluppa la frana di Cà Lita.
L'iniezione del tracciante è stata effettuata il giorno 12 novembre 2007 in corrispondenza del piezometro 17P posto in zona di coronamento le cui caratteristiche sono: diametro 3", profondità 55 metri e fenestratura 9-50 metri.

Esperienza di tracciamento dell'acquifero nella frana di Cà Lita

Al fine di determinare le principali vie di flusso della acque sotterranee circolanti all'interno del versante della frana di Cà Lita e di valutare gli scambi tra accumulo e substrato, si è effettuata una prova di tracciamento tramite iniezione di *fluoresceina sodica* in un piezometro, posto nella porzione più alta del versante, e successivo recupero attraverso campioni di *carbone attivo* e acqua a quote differenti nel versante.
L'esecuzione della prova di tracciamento è stata preceduta da una fase di pianificazione del lavoro e dalla scelta dei punti in cui iniettare e recuperare il tracciante. Il punto di immissione utilizzato risponde alle seguenti caratteristiche:

– **profondità adeguata**. Il piezometro scelto deve raggiungere l'acquifero principale, la cui soggiacenza risulta essere a 17 m da piano campagna;

– **posizione strategica**. Il punto di iniezione deve essere posto a monte, in zona rilevata, in modo tale che la massa di tracciante iniettata possa raggiungere i punti di campionamento scelti posti a valle;

– **fenestratura**. Il tubo piezometrico deve essere filtrato ad

una profondità tale da poter disperdere il tracciante direttamente in acquifero;

– **permeabilità della zona satura**. Al fine di avere una dispersione dell'indicatore in un arco di tempo non troppo lungo si ritiene molto importante il parametro K, che non deve essere troppo basso.

Il punto che risponde a tutte queste caratteristiche risulta essere il piezometro 17P, posto in zona di coronamento della frana di Cà Lita, del diametro di 3", avente una profondità di 55 metri e fenestrato da 9 a 50 metri. L'iniezione interessa lo spessore di acquifero compreso tra 17 e 50 m circa.
Nella tabella n. 1 vengono illustrate le caratteristiche delle due metodologie di campionamento del tracciante.
Al termine di ogni campionamento le acque e i carboni sono stati analizzati per spettrofluorimetria con lo strumento Perkin Elmer LS45 del Laboratorio di Idrogeologia dell'Università di Ferrara. La metodica si avvale dell'analisi della luce emessa dal campione d'acqua eccitato da una luce sorgente a lunghezza d'onda arbitraria.
Per quanto riguarda i fluocaptori, il tracciante deve essere estratto dal carbone attivo con l'aiuto di una soluzione che viene poi analizzata con lo stesso metodo visto per le acque. A seguito dell'essiccazione in forno a 100°C per almeno 2 ore, si prelevano 2 grammi di carbone che viene poi immerso in una soluzione alcolica composta dal 90% di alcool etilico e dal 10% di KOH (Vincenzi, 2002). A 4 mesi (ad oggi 13 marzo 2008) di distanza dal giorno dell'immissione del tracciante nel piezometro 17, i campioni di acqua e i fluocaptori non hanno registrato l'arrivo del tracciante ai punti scelti per il recupero. Alla luce di quanto esposto, occorre fare alcune considerazioni. Il materiale che compone il deposito di frana entro cui è stato iniettato il tracciante, appartenente al Membro arenaceo-pelitico della Formazione di Monghidoro, possiede una permeabilità (K) che è stata stimata essere variabile tra 1,00E-05 e 1,00E-08 m/s. Oltre a tale parametro, bisogna tenere presente la porosità efficace del materiale che compone l'acquifero; da tabulati presenti in bibliografia (Civita, 2005) è stato possibile stimare un intervallo di porosità efficace (p_e) variabile da 0,5-20%. Quando un composto miscibile con l'acqua come la *fluoresceina* viene introdotto in un sistema idrodinamico, esso si disperde occupando un volume del sistema che si espande nel tempo. A lato della dispersione longitudinale, esiste una dispersione laterale che comporta una continua suddivisione dell'acqua attraverso i percorsi che si generano tra i granelli del mezzo e che porta ad un ritardo nel tempo di arrivo del tracciante. Il tempo trascorso dall'iniezione alla comparsa del tracciante ai punti di campionamento è indicato come tempo di transito, che dipende dal rapporto tra la distanza del punto di immissione (piezometro 17) e i punti di recupero (W0c, D1c, W1c, 19P) con la velocità reale di spostamento delle acque.
Nella tabella n. 2 seguente, sono illustrati i risultati dei calcoli effettuati al fine di stimare il tempo di arrivo del tracciante ai punti posti a minor distanza rispetto al punto di immissione.
Nella Tabella n. 2 sono messi in evidenzia i tempi di arrivo del tracciante corrispondenti a permeabilità e porosità efficace proprie del litotipo presente. Si nota come nella realtà i punti scelti per il recupero dei campioni non siano ancora stati raggiunti dal tracciante.
D'altronde il tracciamento di un sistema fratturato e poroso è molto più complesso di quelli carsici in quanto è presente un'estrema variabilità spaziale dei parametri idrogeologici. La permeabilità può variare di alcuni ordini di grandezza all'interno della stessa formazione rocciosa, in base allo stato di fatturazione e alla storia geologica passata. A complicare tutto ciò interviene il fatto che si sta tracciando una zona di frana, in cui lo stato di fatturazione dell'ammasso è influenzato anche dal fenomeno gravitativo.
In definitiva, tenuto conto delle analisi spettrofluorimetriche svolte sui campioni prelevati, del tempo trascorso dal giorno dell'iniezione (12 novembre 2007) ad oggi (13 marzo

Tab. 1- Principali caratteristiche delle due metodologie di campionamento del tracciante: campioni d'acqua e fluocaptori (VINCENZI, 2002).

	Campione d'acqua	Fluocaptori (carboni attivi)
Tipo di campionamento	Puntuale ed istantaneo	Puntuale, ma cumulativo temporale
Risultato	Concentrazioni (ppb)	Positivo/Negativo
Materiali	Bottiglie ambrate	Carboni attivi
Analisi	Per fluorimetria con spettrofluorimetro	Spettrofluorimetro, previo: essiccamento in forno, pesatura, immersione in Alcool e KOH
Tempo analisi	3-5 minuti	20 minuti
Vantaggi	Dato quantitativo, analisi rapida	Si rileva il tracciante anche a concentrazioni inferiori al limite di rilevabilità nelle acque
Svantaggi	Rappresentativo dell'istante di campionamento	Non quantitativo. Procedura analitica lunga

Tab. 2 - Risultati dei calcoli effettuati per la determinazione dei vari tempi di arrivo del tracciante. Legenda: h: quota superficie piezometrica; i: gradiente idraulico; pe: porosità efficace; K: permeabilità; Vapp: velocità apparente; Vr: velocità reale; Tempo: tempo di arrivo del tracciante ai punti considerati.

Punto	h 17P(m)	h punto(m)	_h(m)	distanza(m)	i	p_e %	K (m/s)	Vapp(m/s)	Vr (m/s)	Vr (m/g)	Tempo(giorni)
W0c	600	534	66	231,58	0,3	5	1,00E-06	3,00E-07	6,00E-06	0,5	446,7
	600	534	66	231,58	0,3	1	1,00E-07	3,00E-08	3,00E-06	0,3	893,4
	600	534	66	231,58	0,3	0,5	1,00E-08	4,50E-09	9,00E-07	0,1	2978,1
D1c	600	512	88	191,01	0,5	5	1,00E-06	5,18E-07	1,04E-05	0,9	213,5
	600	512	88	191,01	0,5	1	1,00E-07	5,18E-08	5,18E-06	0,4	427,1
	600	512	88	191,01	0,5	0,5	1,00E-08	7,76E-09	1,55E-06	0,1	1423,6
W1c	600	512	88	303,80	0,4	5	1,00E-06	3,67E-07	7,33E-06	0,6	479,5
	600	512	88	303,80	0,4	1	1,00E-07	3,67E-08	3,67E-06	0,3	959,0
	600	512	88	303,80	0,4	0,5	1,00E-08	5,50E-09	1,10E-06	0,1	3196,5

2008), e dai calcoli effettuati, risulta corretto affermare che dopo 4 mesi dall'iniezione non si è riscontrata la presenza di tracciante ai punti posti a minor distanza dal piezometro 17. Sebbene ci si attendesse una comunicazione idrogeologica tra il substrato ed il corpo di frana, non si può escludere a priori questa possibilità, in quanto il tracciante potrebbe essere presente in concentrazioni troppo basse da essere rilevate dallo strumento.

CONCLUSIONI

Lo studio effettuato ha permesso di approfondire il particolare meccanismo di circolazione delle acque e dei gas sotterranei, nelle aree di frana indagate, attraverso l'analisi idrochimica, idrogeologica e radiometrica.
Le analisi chimiche effettuate hanno permesso di confermare il modello di circolazione sotterranea elaborato in passato per la frana di Vedriano, estendendolo ai movimenti franosi di Cà Lita e Silla. Queste frane sarebbero influenzate dalla risalita e dall'affioramento di fluidi profondi presumibilmente termali in origine, e successivamente raffreddati in conseguenza della difficoltosa e lenta circolazione attraverso litotipi a carattere prevalentemente argilloso, con relativo riequilibrio termico.
In definitiva, il processo evolutivo in questione richiede necessariamente che la circolazione avvenga in presenza di notevoli quantità sia di arenarie (perché ricche di frazioni feldspatiche) che di argille (perché responsabili dei fenomeni di scambio cationico), quindi di litologie miste arenaceo-pelitiche più o meno competenti. Nel caso dei tre movimenti franosi considerati, dove la situazione formazionale, tettonica e litologica del sottosuolo è più complessa, si fa riferimento ad altre formazioni miste arenaceo-pelitiche. Oltre alla litologia, è importante anche l'effetto della temperatura (maggiore di 40°C), nel favorire questi processi idrolitici. L'effetto della temperatura porta ad ipotizzare l'esistenza di fenomeni di termalizzazione in profondità.
Il modello genetico - evolutivo prevede anche un dilavamento di evaporiti solfatiche. Le acque delle tre località studiate presentano, infatti, un' elevata concentrazione di ione solfato: spesso fra 1.000 e 1.500 ppm, in un caso fino ad oltre 5.000 ppm. Come nel caso della componente bicarbonata vista in precedenza, anche in questo caso si evidenziano chiari indizi riferibili a processi evolutivi in profondità. Infatti, l'impronta solfato-calcica iniziale viene sostituita, in tutto o in parte, da un'impronta solfato-sodica.
Tale evoluzione, che giustifica gli elevati contenuti di ione solfato, è da correlare al mescolamento fra la componente bicarbonato-sodica e quella solfato-calcica. Ne risulta una precipitazione neogenetica di $CaCO_3$ e la permanenza in soluzione di Na_2SO_4.
Un ulteriore elemento di complessità è rappresentato dal fatto che le acque profonde, prima di affiorare, possono mescolarsi con le falde sub-superficiali, caratterizzate da un chimismo bicarbonato-calcico. Questo ulteriore processo di mescolamento, ancora una volta in variabili proporzioni, è all'origine di un certo numero di allineamenti che si sono evidenziati, in direzione del vertice indicativo, appunto, di acque bicarbonato-calciche, a partire dalle varie posizioni tipiche per le acque profonde.
La campagna di prospezione del gas radon contenuto nelle porosità dei depositi che compongono la frana di Cà Lita e dei terreni circostanti, dalla quale ci si potevano aspettare valori anomali in corrispondenza delle discontinuità tettoniche, lungo le quali è possibile la migrazione verso l'alto del radon profondo, non ha fornito evidenze univoche. In ogni caso, la significatività del gas radon come indicatore tettonico sembra confermata dal fatto che le fasce marginali del deposito di frana sono caratterizzate da valori mediamente più elevati. È ragionevole, quindi, che il radon profondo veicolato lungo le dislocazioni raggiunga la base del deposito di frana e poi tenda a disperdersi lateralmente. Inoltre, considerando i numerosi fattori che portano alla formazione, emanazione e veicolazione di gas radon, quali: la litologia, la radioattività intrinseca delle rocce, il loro grado di alterazione, tettonizzazione, compattezza, porosità, umidità, spessore della copertura vegetale, si evince come questo gas dipenda da più aspetti che variano nel tempo e nello spazio e che risultano di difficile identificazione.
Lo studio effettuato riguardante la distribuzione di gas radon nei terreni, funge da punto di partenza per successive caratterizzazioni future, sia di approfondimento nell'area di Cà Lita, che come modello di comparazione per altre zone vicine a corpi di frana che sembrano possedere una dinamica più o meno influenzata dalla risalita di fluidi profondi.
Infine, la prova idrogeologica con tracciante ha permesso di sperimentare il metodo di tracciamento in un'area interessata da dissesto, di calcolare i tempi di arrivo del tracciante ai punti di campionamento e di determinare i parametri idrogeologici dell'acquifero.
I calcoli relativi ai tempi di arrivo del tracciante e le analisi sui campioni hanno evidenziato che a 4 mesi (ad oggi 13 marzo 2008) di distanza dal giorno dell'immissione non si è registrato l'arrivo del tracciante ai punti scelti per il recupero. D'altronde il tracciamento di un sistema fratturato e poroso presenta un'estrema variabilità spaziale dei parametri idrogeologici in cui la permeabilità e la porosità possono variare di alcuni ordini di grandezza all'interno della stessa formazione rocciosa, determinando il conseguente ritardo del flusso acquoso che trasporta il tracciante. Nonostante si attendesse una comunicazione idrogeologica tra il substrato ed il corpo di frana, non si può escludere questa possibilità, in quanto il tracciante potrebbe essere giunto ai punti di campionamento in concentrazioni troppo basse da essere rilevate dallo strumento.
Concludendo, dallo studio svolto si desume come fenomeni franosi, che sono principalmente causati da fattori climatici, possono essere anche in realtà influenzati in maniera determinante da risalite di gas e acque dalle parti più profonde della catena appenninica. In particolare, lo studio ha evidenziato che tali fenomeni di frana potrebbero essere influenzati dallo sviluppo di manifestazioni in superficie di gas e fluidi di origine profonda, ovvero da dinamiche di circolazione considerate finora solo marginali negli scenari di attivazione di fenomeni franosi.

RINGRAZIAMENTI

L'Autrice desidera ringraziare il Prof. C. Gorgoni, il Prof. A. Corsini, il Dott. F. Ronchetti (Università di Modena e Reggio Emilia), il Prof. A. Gargini e la Dott.ssa V. Vincenzi (Università di Ferrara) per i preziosi consigli e suggerimenti.