

Nicola Casagli, *Professore ordinario di Geologia Applicata, Università degli Studi di Firenze, Presidente dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS, Trieste, Presidente del Centro per la Protezione Civile, Università degli Studi di Firenze. (nicola.casagli@unifi.it)*

Frane e rischio idrogeologico in Italia e nell'area mediterranea

SOMMARIO

Geo-hydrological risk represents one of the main environmental emergencies in the Mediterranean region, with Italy among the most exposed countries at the European level. 94% of Italian municipalities are classified as being at geo-hydrological risk, and more than 18% of the national territory falls within areas of high or very high hazard. This article analyses two emblematic case studies from 2026 - the landslides in Niscemi (Caltanissetta, Sicily) and the reactivation of the Petacciato landslide (Campobasso, Molise) - to illustrate the integrated scientific approach developed by the Centre for Civil Protection of the University of Florence (CPC-UNIFI) and OGS, which combines satellite remote sensing, geophysical investigations, geotechnical modelling and real-time monitoring systems. In light of these cases, the article proposes a framework for reflection on national and Mediterranean policies for the prevention and mitigation of hydrogeological risk, with particular attention to the role of Earth observation technologies, multi-level governance, and investments in structural prevention.

Parole chiave: rischio idrogeologico, frane, telerilevamento SAR, monitoraggio, protezione civile, area mediterranea, Niscemi, Petacciato, prevenzione strutturale, governance del rischio.

1. Introduzione: il rischio idrogeologico come sfida mediterranea

L'area mediterranea è una delle regioni del mondo più vulnerabili ai rischi naturali. La combinazione di fattori geologici strutturali - eredità di una lunga storia orogenetica e di intense deformazioni tettoniche - con un regime climatico caratterizzato da precipitazioni intense e stagionali, da siccità prolungate e da un'intensa antropizzazione del territorio, crea le condizioni per la ricorrente manifestazione di frane, alluvioni e altri fenomeni di dissesto idrogeologico. Questi eventi colpiscono con regolarità paesi affacciati sul Mediterraneo settentrionale, dalla penisola iberica alla Grecia, dai Balcani all'Italia, con conseguenze talora catastrofiche in termini di vite umane, danni alle infrastrutture e impatti sulle economie locali.

L'Italia occupa una posizione di particolare rilievo in questo quadro. Con una superficie di circa 300.000 km², il territorio italiano è modellato da catene montuose geologicamente giovani - le Alpi e gli Appennini - che presentano caratteristiche litologiche, strutturali e idrogeologiche favorevoli all'innescio di movimenti gravitativi di versante. I dati dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA, 2023) indicano che il 94% dei Comuni italiani è esposto al rischio idrogeologico e che oltre il 18% del territorio nazionale ricade in aree classificate ad alta o molto alta pericolosità da frana o da inondazione. Dal dopoguerra ad oggi, le calamità idrogeologiche hanno provocato nel nostro Paese oltre 12.000 vittime e danni economici per centinaia di miliardi di euro.

Il 2026 ha offerto ulteriori conferme di questa vulnerabilità strutturale. Nel gennaio 2026, il Comune di Niscemi, in provincia di Caltanissetta, è stato colpito da un evento franoso di vaste dimensioni che ha coinvolto circa 1.500 persone evacuate e ha richiesto la mobilitazione immediata del Dipartimento della Protezione Civile e dei suoi centri di competenza, fra i quali il Centro per la Protezione Civile dell'Università di Firenze (CPC-UNIFI) e l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Speri-

mentale - OGS. Pochi mesi dopo, in aprile, la frana di Petacciato, in Molise, uno dei più estesi fenomeni franosi d'Europa, ha subito una nuova riattivazione, interrompendo l'autostrada A14, la linea ferroviaria adriatica e la Strada Statale 16, isolando di fatto un intero tratto della dorsale adriatica.

Questi due casi esemplificano la complessità del rischio idrogeologico nell'Italia meridionale: un rischio che non è solo geologico, ma è profondamente intrecciato con decenni di urbanizzazione scarsamente controllata, con la progressiva riduzione degli investimenti in prevenzione strutturale, con le difficoltà di coordinamento interistituzionale e con gli effetti dell'accelerazione climatica in atto.

Il presente articolo, dopo aver illustrato l'approccio scientifico integrato applicato a questi due casi di studio, propone alcune riflessioni sulle politiche nazionali e mediterranee necessarie per affrontare con efficacia questo rischio crescente, nell'auspicio che la Conferenza Mediterranea possa contribuire a costruire una visione condivisa di governance del territorio sostenibile.

2. Il quadro scientifico: frane e instabilità di versante nell'Italia meridionale

2.1 Caratteristiche geologiche predisponenti

La Sicilia e l'Italia meridionale presentano condizioni geologiche strutturalmente predisponenti ai fenomeni franosi di grande scala. Il settore meridionale dell'isola siciliana è dominato dall'Avanfossa di Gela-Catania, un bacino sedimentario plio-pleistocenico caratterizzato dall'alternanza di litotipi con comportamenti meccanici radicalmente diversi: sabbie e arenarie permeabili nella parte sommitale delle successioni stratigrafiche, argille marnose impermeabili e a resistenza ridotta alla base. Questa configurazione, con marcato contrasto delle proprietà idrogeologiche e geotecniche, governa l'insorgere dei grandi scivolamenti traslativi in tutto il bacino mediterraneo.

Nelle aree argillose plio-pleistoceniche dell'Italia meridionale, la resistenza al taglio lungo le superfici di scivolamento si attesta spesso a valori residui molto bassi (angoli di attrito residuo compresi tra 12° e 18°), in seguito a passati eventi di deformazione. I versanti che si impostano su queste successioni si trovano in condizioni di equilibrio limite spesso prossime alla rottura. Non occorre un evento meteorologico eccezionale per innescare una frana: è sufficiente un incremento delle pressioni interstiziali causato da precipitazioni di intensità nemmeno eccezionale, purché prolungate, o un'accelerazione dell'erosione al piede del versante.

A questi fattori litologici si sovrappongono elementi strutturali - faglie, sovrascorrimenti, pieghe - che controllano la geometria dei versanti e delle superfici di scivolamento. Nel caso di Niscemi, un ruolo fondamentale è svolto dal fronte della Falda di Gela, un importante sovrascorrimento che ha modellato la morfologia regionale e che condiziona le discontinuità lungo cui si impostano le superfici di scorrimento profonde. Analogamente, la frana di Petacciato è strutturalmente connessa alla geometria della costa adriatica molisana, dove l'erosione marina al piede del versante contribuisce a destabilizzare un sistema già in equilibrio limite.

2.2 Il cambiamento climatico come amplificatore del rischio

L'accelerazione del cambiamento climatico introduce un ulteriore elemento di complessità nella gestione del rischio idrogeologico nell'area mediterranea.

Le proiezioni climatiche per il Mediterraneo indicano un aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi, con alternanza di periodi di siccità prolungata - che favorisce la formazione di fessurazioni nei terreni superficiali, aumentando la capacità di infiltrazione rapida - e precipitazioni intense concentrate nel tempo. Questo regime idrologico è particolarmente dannoso per le frane lente in argilla, nelle quali la riattivazione è governata dall'accumulo di pressione interstiziale su intervalli plurimensili, non dal singolo evento piovoso.

Il passaggio del ciclone Erminio nel marzo-aprile 2026, che ha interessato il litorale molisano con apporti pluviometrici superiori a 200 mm cumulati in pochi giorni, rientra in questo scenario. I modelli climatici prevedono un aumento di frequenza di eventi di questo tipo nel corso del XXI secolo. Per versanti come quello di Petacciato, che si trovano in condizioni strutturali di equilibrio limite, questa tendenza si traduce in un incremento prevedibile della frequenza delle riattivazioni franose.

Non va trascurata, in questo quadro, la componente antropica. L'urbanizzazione intensa e spesso non pianificata che ha interessato l'Italia meridionale a partire dagli anni '60 ha portato alla costruzione di edifici, strade e infrastrutture in aree già catalogate come instabili. L'immissione di acque reflue e meteoriche nel sottosuolo, attraverso reti fognarie o acquedottistiche deteriorate o insufficienti, ha cronicizzato l'incremento delle pressioni interstiziali in molte aree urbane a rischio. Il caso di Niscemi è emblematico: le indagini tecniche hanno documentato come le perdite della rete acquedottistica e fognaria - stimabili anche al 50% dei volumi immessi - abbiano alimentato per decenni le pressioni interstiziali nei terreni sabbiosi sotto l'abitato, contribuendo in modo significativo, insieme all'infiltrazione di precipitazioni intense e prolungate, a ridurre le condizioni di sicurezza dei versanti.

3. Il caso di Niscemi (2026): un sistema franoso complesso in area urbana

3.1 Inquadramento e cronologia degli eventi

L'abitato di Niscemi sorge su un pianoro di terreni sabbioso-arenacei che domina la Piana di Gela, a una quota media di circa 320-340 m s.l.m. Il substrato litologico è articolato in una successione che comprende, dall'alto verso il basso: sabbie con livelli arenacei e calcarenitici (Plio-Pleistocene), con spessore variabile tra 30 e 60 m; limi sabbiosi e limi argillosi; argille marnose azzurre (Pliocene medio), che costituiscono il substrato impermeabile. I margini del pianoro su cui sorge il paese sono delimitati da scarpate morfologiche nette, alte fino ad alcune decine di metri, al di sotto delle quali si sviluppano pendii incisi da morfologie calanchive che testimoniano una dinamica di denudazione superficiale continua.

L'area è storicamente nota per l'instabilità dei versanti: la frana del 19 marzo 1790 - accompagnata da manifestazioni di vulcanismo sedimentario con fuoriuscita di fango, acqua e gas - aveva già documentato spostamenti dell'ordine di 20 metri con velocità considerevoli. La frana del 12 ottobre 1997 aveva coinvolto circa 2 km² di versante, con superfici di scivolamento impostate nelle argille plioceniche, causando danni rilevanti a infrastrutture e abitazioni senza tuttavia comportare vittime.

Nel gennaio 2026 il sistema franoso si è riattivato con un evento articolato in due fasi principali. Una prima fase significativa si è verificata tra il 15 e il 16 gennaio, con il cedimento della strada provinciale SP12 nel versante nord-occidentale. Un secondo episodio, più grave, si è prodotto tra il 25 e il 26 gennaio, coinvolgendo il quartiere urbano Sante Croci - Belvedere, l'area del Torrente Be-

nefizio e la SP10. Il fronte instabile attivo si è sviluppato complessivamente per circa 4,7 km lungo il margine dell'abitato, configurandosi come la riattivazione e l'ampliamento di un sistema franoso profondo storicamente documentato. Il totale degli evacuati in tutto il territorio coinvolto ha raggiunto circa 1.500 persone nella prima fase emergenziale.

3.2 L'approccio scientifico multidisciplinare

A seguito dell'evento, il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri (DPC) ha attivato, in accordo con la Regione Siciliana, il CPC-UNIFI come Centro di Competenza. Nelle settimane successive, il CPC-UNIFI, in stretta collaborazione con l'OGS, con il CNR-IREA, con l'INGV e con TRE-Altamira, ha condotto un'indagine multidisciplinare che rappresenta un esempio avanzato dell'integrazione tra diverse tecnologie di osservazione e modellazione.

Il telerilevamento radar interferometrico SAR ha giocato un ruolo centrale. Sono stati analizzati dati acquisiti da cinque piattaforme satellitari - Sentinel-1, COSMO-SkyMed, SAOCOM, Capella Space e TerraSAR-X - applicando tecniche di elaborazione di crescente sofisticazione: l'interferometria differenziale (DInSAR) per la misurazione delle deformazioni co-evento; le tecniche multi-temporali SqueeSAR e SBAS (Ferretti et al, 2011; Lanari et al., 2020) per l'analisi dei movimenti pre-evento e post-evento; il *pixel offset tracking* per la stima di spostamenti di grande entità lungo la linea di vista del sensore; il *dynamic InSAR*, metodologia avanzata che combina l'elaborazione SqueeSAR con tecniche di *change detection* e *rapid motion tracking* per il monitoraggio di deformazioni rapide in aree con perdita temporanea di coerenza del segnale.

Parallelamente al monitoraggio radar, è stata condotta un'analisi con immagini satellitari ottiche ad alta e altissima risoluzione - PlanetScope, Pléiades Neo e WorldView Legion - applicando le tecniche COSI-Corr e *particle image velocimetry* (PIV) per la caratterizzazione dell'evoluzione spaziale e temporale degli spostamenti superficiali.

Le indagini geofisiche, condotte dall'OGS, hanno previsto una prospezione geoelettrica 3D con tecnologia *Fullwaver* e una campagna di sismica ad alta risoluzione in onde P e SH. La geoelettrica 3D ha permesso di ricostruire la distribuzione spaziale delle resistività elettriche del sottosuolo, consentendo di identificare la geometria dei contatti litologici e delle zone di saturazione idrica. La sismica in onde P e SH ha fornito la tomografia dei primi arrivi, l'*imaging* a riflessione e l'analisi delle onde di superficie, permettendo di ricostruire un modello tridimensionale del sottosuolo con una risoluzione senza precedenti per un'area di questa complessità.

La caratterizzazione geotecnica dei terreni, basata su dati di sondaggio, prove di laboratorio, misure inclinometriche e piezometriche (Castiglione et al., 2000), ha fornito i parametri di resistenza al taglio dei principali litotipi (parametri efficaci di picco: $c' = 20$ kPa e $\phi' = 23^\circ$; parametri efficaci residui $c_r' = 0$ e $\phi_r' = 18^\circ$ per le argille) da inserire nel modello di calcolo numerico. La modellazione numerica bidimensionale alle differenze finite (codice FLAC 2D) ha confermato che anche in condizioni di parziale saturazione delle argille le condizioni di stabilità non risultano soddisfatte. Questo risultato chiarisce il meccanismo di innesco: la presenza di superfici di taglio preesistenti con resistenza già a valori residui in coincidenza con l'incremento di pressioni interstiziali nelle argille è la causa diretta dell'instabilità.

3.3 Cause dell'evento e fattori predisponenti

L'analisi delle cause dell'evento di Niscemi 2026 rivela una concomitanza di fattori predisponenti e innescanti che è tipica dei grandi sistemi franosi in terreni argillosi. Tra i fattori predisponenti strutturali, un ruolo primario è svolto dall'assetto litostratigrafico locale - la sovrapposizione di sabbie permeabili su argille impermeabili - che crea le condizioni per la concentrazione delle pressioni interstiziali lungo le superfici di contatto. A questo si aggiunge il controllo esercitato dalle strutture tettoniche connesse al fronte della Falda di Gela, che impone una geometria preferenziale alle superfici di scivolamento.

Il disboscamento nei secoli scorsi e l'erosione superficiale hanno giocato un ruolo significativo: la riduzione della copertura vegetale ha aumentato il ruscellamento superficiale e l'incisione dei versanti da parte della rete idrografica. Il Torrente Benefizio, in particolare, con la sua azione erosiva al piede del versante, ha progressivamente ridotto il supporto alla base della massa potenzialmente instabile. Le analisi hanno documentato che le profonde incisioni prodotte da questo corso d'acqua, amplificate dall'immissione degli scarichi urbani, hanno reso cinematicamente possibili scivolamenti di grande profondità - la stessa dinamica già identificata dalla Commissione Tecnico Scientifica che studiò la frana del 1997 (Castiglione et al., 2000).

La presenza di livelli evaporitici nel contesto geologico regionale e il ruolo passivo dei lineamenti tettonici associati al fronte della Falda di Gela (Rizzo, 2004). Per quanto riguarda l'innescio immediato, le analisi pluviometriche indicano che le precipitazioni del gennaio 2026, pur non eccezionali in termini di intensità giornaliera o oraria nonostante il passaggio del ciclone mediterraneo Harry, si sono inserite in un periodo di accumulo idrogeologico prolungato nei mesi autunnali e invernali, determinando un innalzamento progressivo dei livelli piezometrici fino al raggiungimento delle condizioni critiche di rottura.

3.4 Valutazione del rischio residuo e strategie di intervento

Una delle attività più delicate del lavoro tecnico ha riguardato la valutazione del rischio residuo per il centro abitato. A tale scopo, è stato sviluppato un modello speditivo di arretramento della scarpata principale che lambisce il settore meridionale dell'abitato. Sulla base di questo modello e dei dati di monitoraggio, la fascia di interdizione è stata progressivamente modulata: dai 150 m iniziali stabiliti in condizioni di prima emergenza (Ordinanza sindacale n. 12 del 28 gennaio 2026), si è passati a 100 m a partire dal 28 febbraio 2026 (Ordinanza n. 19), permettendo il rientro di circa 700 persone nelle loro abitazioni, con un approccio che ha privilegiato la riduzione dell'impatto sulle famiglie evacuate pur mantenendo condizioni di sicurezza adeguate.

La strategia di mitigazione proposta è articolata su più livelli temporali. Nel breve periodo, le priorità riguardano il mantenimento del sistema di monitoraggio continuo e multiparametrico, il controllo delle fasce di interdizione e il completamento delle indagini. Nel medio periodo, gli interventi strutturali comprendono: la riorganizzazione delle reti fognarie e acquedottistiche con separazione delle acque bianche e nere; la realizzazione di sistemi di drenaggio profondo mediante pozzi di emungimento e gallerie drenanti; la riprofilatura delle scarpate; la sistemazione idraulica del Torrente Benefizio attraverso briglie in calcestruzzo armato su fondazioni profonde e rivestimenti in gabbioni e materassi Reno. Nel medio-lungo periodo, il completamento delle demolizioni e delle delocalizza-

zioni degli edifici compresi nelle fasce a rischio più elevato, e il ripristino della viabilità provinciale.

Di particolare rilevanza tecnica è la proposta delle gallerie drenanti profonde, impostate nelle argille, con dreni a raggiera per l'intercettazione dei flussi idrici negli strati permeabili. Questa soluzione rappresenta l'intervento strutturale di lungo termine in grado di affrontare alla radice la causa principale dell'instabilità: le sovrappressioni interstiziali nei terreni argillosi.

4. La frana di Petacciato (2026): un rischio sistemico e ricorrente

4.1 Un fenomeno eccezionale per dimensioni e complessità

La frana di Petacciato rappresenta uno dei più estesi e complessi fenomeni franosi documentati in Europa (Guerricchio et al. 1996). Con una superficie complessiva del corpo di frana di circa 4,0 km², una lunghezza di circa 2 km dalla corona al piede (che si estende fino al mare Adriatico), una larghezza di circa 2 km e una profondità massima della principale superficie di scivolamento stimata in 85 m, essa si configura come un sistema franoso di scala eccezionale che interessa un intero versante costiero (Fiorillo, 2003).

La struttura geologica è analoga a quella di Niscemi, sebbene in un contesto geografico diverso: la successione plio-pleistocenica è composta da depositi sabbioso-conglomeratici nella parte superiore e da argille grigio-azzurre sovraconsolidate nella parte inferiore. Le argille, con resistenza al taglio ridotta a valori residui lungo le superfici di scivolamento preesistenti, rappresentano l'elemento geologico determinante per l'instabilità. Il sistema idrogeologico è caratterizzato dalla presenza di falde in pressione nei livelli sabbiosi intercalati nelle argille, con carichi piezometrici che nella parte bassa del versante superano localmente il piano di campagna, determinando gradienti di filtrazione verso l'alto e pressioni interstiziali eccezionalmente elevate.

La frana è documentata storicamente a partire dal 1906 e ha conosciuto almeno 15 riattivazioni significative nel corso del Novecento e dei primi decenni del XXI secolo, sempre concentrate nei mesi invernali tra gennaio e marzo. Le riattivazioni più gravi hanno interessato gli anni 1916, 1932, 1938, 1953, 1979, 1991, 1996, 2009 e 2015. In occasione della riattivazione del 18 marzo 2015, particolarmente intensa, la corona di frana aveva raggiunto il centro abitato, rendendo necessario l'abbandono di circa dieci edifici, tra cui la sede comunale (Cotecchia et al., 2016).

4.2 La riattivazione del 7 aprile 2026

In data 7 aprile 2026, a partire dalle ore 09:30, si è verificata una nuova, importante riattivazione del sistema franoso. L'evento ha comportato l'interruzione dell'autostrada A14 nel tratto tra Vasto Sud e Termoli, della linea ferroviaria adriatica nel tratto Bari-Pescara tra Montenero di Bisaccia e Termoli, e della Strada Statale 16 Adriatica, determinando una situazione di pressoché totale isolamento viario del Molise lungo l'asse costiero adriatico. La situazione è stata ulteriormente aggravata dalla concomitante presenza di altri danni infrastrutturali provocati dall'ondata di maltempo dei giorni precedenti (28-30 marzo 2026), tra cui il crollo del ponte sul Fiume Trigno sulla SS87.

Il sistema di monitoraggio geotecnico esistente - comprendente una rete di inclinometri a profondità fino a 120 m, piezometri automatici e sensori di deformazione installati da Autostrade per l'Italia e da Rete Ferroviaria Italiana - ha registrato la riattivazione e ha attivato tempestivamente le procedure di chiusura precauzionale, consentendo di evitare danni a persone.

Le lesioni sulla carreggiata dell'A14 e la deformazione di circa 10 cm dei binari ferroviari sono state rilevate durante le ispezioni successive alla chiusura, confermando l'efficacia dei sistemi di allerta precoce adottati dai gestori delle infrastrutture.

La riattivazione è direttamente correlata al passaggio del ciclone Erminio, che ha interessato il litorale molisano a partire dal 28 marzo 2026, con valori pluviometrici superiori a 200 mm cumulati nel periodo. I dati interferometrici satellitari disponibili avevano già documentato, a partire almeno da gennaio 2019, deformazioni dell'ordine di alcuni mm/anno nel settore nord-orientale dell'abitato, in corrispondenza della scarpata di frana che tuttavia non potevano far presagire una riattivazione di tale entità.

4.3 Limiti degli interventi precedenti e prospettive

L'analisi degli interventi strutturali realizzati in passato a Petacciato rivela una limitazione sistematica: essi sono stati concepiti prevalentemente per la protezione delle singole infrastrutture piuttosto che per la mitigazione del fenomeno franoso nel suo complesso. Questa impostazione - comprensibile alla luce delle urgenze emergenziali che hanno di volta in volta motivato gli investimenti - ha generato una sequenza di interventi parziali che, senza affrontare la causa strutturale dell'instabilità (le elevate pressioni interstiziali nelle falde in pressione profonde), non hanno potuto prevenire le successive riattivazioni.

Il progetto di consolidamento attualmente in corso di affidamento da parte del Commissario Straordinario Delegato per la Mitigazione del Rischio Idrogeologico in Molise, prevede un investimento complessivo di 40,6 milioni di euro. L'approccio progettuale è fondato sul drenaggio profondo del versante attraverso pozzi drenanti dotati di dreni sub-orizzontali, distribuiti nell'intera area franosa. Questo progetto rappresenta il primo tentativo organico di affrontare la causa strutturale dell'instabilità.

È tuttavia necessario chiarire che gli interventi proposti possono ridurre ma non eliminare il rischio: la letteratura scientifica sulle frane costiere adriatiche (Cancelli et al., 1984) documenta la natura strutturalmente ricorrente di tali fenomeni, che tendono a riattivarsi anche dopo interventi locali. Una strategia efficace non può prescindere da una gestione integrata costa-versante, comprensiva di interventi nel tratto costiero e sulla porzione sommersa del versante.

5. Tecnologie per il monitoraggio del rischio idrogeologico: innovazioni e prospettive

5.1 Il telerilevamento satellitare come strumento di sorveglianza territoriale

L'esperienza di Niscemi e Petacciato illustra in modo esemplare le potenzialità delle tecnologie di telerilevamento satellitare per il monitoraggio del rischio idrogeologico a scala territoriale. Le tecniche di interferometria SAR multi-temporale - in particolare la tecnica SqueeSAR sviluppata da TRE Altamira e le tecniche SBAS sviluppate dal CNR-IREA - consentono di misurare deformazioni superficiali del terreno con precisione millimetrica su aree estese, ricostruendo la storia delle deformazioni pregresse con cadenza regolare (Ferretti et al, 2011; Lanari et al., 2020).

I dati pre-evento analizzati per Niscemi e Petacciato mostravano entrambi segnali di deformazione lenta già anni prima delle riattivazioni parossistiche. Questo è un risultato di straordinaria importanza per le politiche di prevenzione: se i dati satellitari già disponibili fossero stati sistematicamente inte-

grati in un sistema di allerta e di pianificazione territoriale, sarebbe stato possibile attivare per tempo un livello di attenzione e programmare interventi preventivi con maggiore anticipo, anche se va riconosciuto che la previsione e la prevenzione di fenomeni franosi di così vasta entità rimangono una sfida scientifica e gestionale di grande complessità. La sfida non è dunque solo tecnica - le tecnologie esistono e funzionano - ma organizzativa e istituzionale: creare i meccanismi per la raccolta sistematica, l'elaborazione e la valorizzazione di questi dati a supporto delle decisioni delle autorità di protezione civile e urbanistiche.

Il *Dynamic InSAR*, impiegato per la prima volta in modo sistematico in un'emergenza italiana come quella di Niscemi, rappresenta un ulteriore salto qualitativo: questa metodologia consente di monitorare deformazioni rapide (dell'ordine di decimetri al giorno) anche nelle fasi di massima attività franosa, quando le tecniche interferometriche tradizionali perdono la coerenza del segnale. L'integrazione di dati da costellazioni di satelliti con diverse caratteristiche - Sentinel-1 con riveduta di 6 giorni, COSMO-SkyMed con alta risoluzione, Capella Space in banda X - consente di ottenere un'eccellente sorveglianza dei versanti instabili.

5.2 Le indagini geofisiche integrate

Le indagini geofisiche condotte dall'OGS a Niscemi costituiscono un esempio avanzato di applicazione di tecniche geofisiche integrate per la caratterizzazione tridimensionale del sottosuolo in condizioni di emergenza (Casagli et al., 2026). La prospezione geoelettrica 3D con tecnologia *Fullwaver* ha permesso di mappare le resistività elettriche del sottosuolo con una risoluzione e un'estensione areale senza precedenti, identificando la geometria del contatto sabbie-argille, la distribuzione delle zone di saturazione e la posizione delle superfici di scivolamento.

La campagna di sismica in onde P e SH, condotta con tecniche di acquisizione ad alta risoluzione su profili multipli, ha fornito immagini del sottosuolo fino a profondità di 60-80 m. La tomografia dei primi arrivi, l'*imaging* a riflessione e l'analisi delle onde di superficie hanno prodotto modelli di velocità delle onde sismiche che, integrati con i dati geoelettrici e con le informazioni dei sondaggi, hanno consentito di costruire un modello geologico tridimensionale completo del versante. Esso è alla base della modellazione numerica geotecnica e delle scelte progettuali per gli interventi di stabilizzazione.

Il modello di integrazione tra geofisica, geotecnica e telerilevamento sperimentato a Niscemi rappresenta lo stato dell'arte nell'analisi delle frane di grande scala e potrebbe essere adottato come protocollo standard per le future emergenze di questo tipo nel territorio italiano e mediterraneo. La capacità dell'OGS di mobilitare rapidamente gruppi multidisciplinari con strumentazione d'avanguardia, anche in condizioni logistiche difficili, è un patrimonio scientifico e tecnico da valorizzare e sostenere.

5.3 I sistemi di monitoraggio in situ e l'allerta precoce

Le esperienze di Niscemi e Petacciato evidenziano sia i progressi compiuti che le lacune persistenti nei sistemi di monitoraggio *in situ* e di allerta precoce. A Petacciato, il sistema di monitoraggio esistente - pur concentrato prevalentemente nella zona bassa del versante a protezione delle infrastrutture - ha funzionato correttamente, attivando tempestivamente le procedure di chiusura e consentendo di evitare incidenti. Questo risultato dimostra il valore degli investimenti in monitorag-

gio automatico e allerta precoce: il costo di installazione e manutenzione dei sensori è di gran lunga inferiore al costo economico e sociale di un incidente con vittime.

Persistono tuttavia lacune significative. Il monitoraggio è spesso concentrato sulle infrastrutture lineari e non copre adeguatamente le aree abitate. I sistemi di allerta per la popolazione residente sono insufficienti o assenti. L'integrazione tra monitoraggio geotecnico strumentale e monitoraggio interferometrico satellitare non è ancora sistematicamente realizzata in piattaforme operative. La condivisione in tempo reale dei dati tra soggetti diversi - gestori di infrastrutture, Protezione Civile nazionale e regionale, Comuni, enti di ricerca - è spesso ostacolata da barriere organizzative e normative.

6. Per una politica nazionale e mediterranea di governo del rischio idrogeologico

6.1 Il gemello digitale del territorio come infrastruttura comune

Guardando al futuro, una delle sfide strategiche più importanti per la riduzione del rischio idrogeologico in Italia e nel Mediterraneo è la costruzione di un gemello digitale (*digital twin*) idrogeologico del territorio. Questa piattaforma digitale - basata sull'integrazione di modelli ad alta risoluzione del terreno (ottenibili con tecnologia LiDAR aerea a costi oggi accessibili), di dati satellitari di osservazione della Terra, di reti di monitoraggio in situ e di modelli idrologici e geotecnici - consentirebbe di effettuare analisi di scenario e simulazioni di tipo *what if* per prevedere gli effetti al suolo in risposta a diverse forzanti meteorologiche (Casagli, 2023).

È paradossale che l'Italia non disponga ancora oggi di una copertura LiDAR ad altissima risoluzione del proprio territorio nazionale, mentre tecnologie di questo tipo sono già disponibili in molti Paesi europei. Il Piano Straordinario di Telerilevamento (PST) ha prodotto coperture parziali e con risoluzioni non omogenee. Colmare questa lacuna dovrebbe essere considerata una priorità assoluta delle politiche nazionali per la difesa del suolo, con un investimento che - rapportato ai costi del dissesto - rappresenta uno dei migliori rapporti costo-beneficio nella gestione del rischio naturale.

Il principio guida per la gestione dei dati dovrebbe essere il paradigma FAIR: *Findable* (reperibile), *Accessible* (accessibile), *Interoperable* (interoperabile), *Reusable* (riutilizzabile). La frammentazione delle competenze in materia di contrasto al dissesto idrogeologico tra Stato, Regioni, Città metropolitane, Province, Comuni, comunità scientifica e settore privato non è in sé un problema insuperabile, se si costruiscono le infrastrutture tecnologiche e normative per la condivisione sistematica di dati e informazioni.

6.2 Investimenti strutturali e semplificazione normativa

Un'efficace mitigazione del rischio idrogeologico richiede investimenti strutturali consistenti e stabili nel tempo. La Commissione Interministeriale De Marchi, costituita all'indomani dell'alluvione di Firenze del 1966, aveva stimato un fabbisogno di circa 2,5 miliardi di euro all'anno (ai valori correnti) per un orizzonte di 30 anni. Nessuno dei piani successivi è mai stato adeguatamente finanziato. Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) ha incluso risorse per la mitigazione del rischio idrogeologico, ma la complessità burocratica che ne ha caratterizzato l'attuazione ne ha vanificato l'efficacia.

Le tipologie di intervento prioritarie sono note da decenni: sistemazioni idrauliche e forestali dei bacini montani; regimazioni idrauliche delle pianure e delle aree collinari; opere di stabilizzazione dei versanti (pozzi drenanti, gallerie drenanti, opere di consolidamento); invasi e casse di espansione per la laminazione delle piene. Non manca la conoscenza tecnica. Manca la continuità dell'impegno politico e finanziario.

Un ostacolo spesso sottovalutato è quello normativo. L'eccesso di regolamentazione nel settore dei contratti pubblici ha rallentato l'esecuzione degli interventi, aumentato i costi e penalizzato soprattutto le piccole e medie imprese specializzate in difesa del suolo. Una semplificazione normativa intelligente, che riduca gli adempimenti burocratici senza abbassare gli standard di qualità e controllo, potrebbe liberare una quota significativa di capacità esecutiva attualmente bloccata.

6.3 La prevenzione non strutturale: piani, esercitazioni, assicurazioni

Accanto agli interventi strutturali, un sistema efficace di riduzione del rischio idrogeologico deve investire in strumenti di prevenzione non strutturale. I Piani di Protezione Civile, redatti secondo linee guida nazionali, sono oggi disponibili per pressoché tutti i Comuni italiani. Tuttavia, la loro efficacia è spesso compromessa dalla scarsa conoscenza che la popolazione ha di questi strumenti e dalla mancanza di esercitazioni periodiche che li rendano operativi nella pratica.

Le esercitazioni di protezione civile - simulate regolarmente come avviene nei paesi con le migliori pratiche internazionali - sono lo strumento più efficace per ridurre le vittime in caso di evento. Il cittadino che sa in anticipo cosa fare - dove rifugiarsi, quali vie di evacuazione seguire, come allertare i vicini - ha una probabilità di sopravvivenza significativamente maggiore di chi è colto di sorpresa. La tecnologia moderna, dalle applicazioni *smartphone* alle piattaforme di comunicazione di massa, offre strumenti potenti per diffondere le conoscenze necessarie e per attivare le procedure di evacuazione in tempi brevissimi.

Un sistema assicurativo obbligatorio o incentivato per la copertura dei danni da calamità naturali rappresenterebbe un importante complemento agli strumenti di prevenzione. Se il livello di rischio entrasse nella determinazione del premio assicurativo e nella valutazione del valore degli immobili, si innescerebbe un meccanismo virtuoso: i proprietari di immobili in zone a rischio avrebbero un incentivo economico a sostenere interventi di mitigazione, e le amministrazioni locali sarebbero spinte a mantenere aggiornati e applicare i propri strumenti di pianificazione territoriale.

6.4 Il governo del rischio in un'ottica mediterranea

Le sfide poste dal rischio idrogeologico nell'area mediterranea trascendono i confini nazionali e richiedono una risposta coordinata a livello sovranazionale. I paesi dell'area mediterranea condividono non solo caratteristiche geologiche e climatiche che determinano vulnerabilità simili, ma anche un patrimonio di conoscenze scientifiche e tecniche che andrebbero messe sistematicamente in comune.

L'area mediterranea è, al tempo stesso, una delle regioni del mondo con la più alta concentrazione di patrimonio culturale, artistico e paesaggistico. Le catastrofi idrogeologiche non minacciano solo vite umane e infrastrutture: distruggono centri storici, siti archeologici, paesaggi culturali che appartengono all'intera umanità. La protezione del territorio dal dissesto idrogeologico è dunque anche una questione di tutela dell'identità culturale mediterranea.

Una cooperazione mediterranea rafforzata nel campo della prevenzione del rischio idrogeologico potrebbe prevedere: la condivisione di dati di monitoraggio satellitare su scala regionale; lo sviluppo di modelli climatici ad alta risoluzione specifici per il Mediterraneo; la costituzione di reti di centri di competenza scientifica per il monitoraggio e la gestione delle emergenze; la definizione di standard comuni per la cartografia del rischio e la pianificazione dell'uso del suolo; programmi di formazione e scambio di esperienze tra i professionisti della protezione civile dei diversi paesi.

La Conferenza Mediterranea (COMEN) rappresenta un contesto ideale per promuovere questo tipo di iniziative, contribuendo a costruire un'agenda condivisa che ponga la sicurezza del territorio e la qualità della vita delle popolazioni al centro delle politiche di sviluppo regionale.

7. Conclusioni

I casi di Niscemi e Petacciato, analizzati nel presente articolo, offrono una finestra privilegiata sulla complessità del rischio idrogeologico nell'Italia meridionale e, più in generale, nell'area mediterranea. Entrambe le frane mostrano caratteristiche comuni: una predisposizione geologica strutturale di lunga data; una storia di eventi ripetuti documentata nel tempo; fattori di instabilità aggravati dall'azione antropica (urbanizzazione in aree instabili, scarichi idrici nel sottosuolo, riduzione della copertura vegetale, erosione dei corsi d'acqua); un ruolo determinante delle pressioni interstiziali come meccanismo di innesco; e, infine, la disponibilità di tecnologie avanzate di monitoraggio e modellazione che consentono una diagnosi accurata e una pianificazione razionale degli interventi.

L'esperienza tecnica accumulata negli interventi di Niscemi e Petacciato dimostra che l'Italia dispone di competenze scientifiche e tecniche di assoluto livello internazionale nella diagnosi e nella gestione delle emergenze idrogeologiche. Le istituzioni coinvolte nella gestione di queste emergenze hanno dimostrato di poter mobilitare rapidamente *task force* multidisciplinari, dispiegare strumentazione avanzata, produrre analisi rigorose e formulare raccomandazioni operative in tempi compatibili con le esigenze dell'emergenza. Questa capacità è un patrimonio nazionale che va preservato e potenziato.

Tuttavia, la ripetizione degli stessi scenari - frane riattivate dopo decenni, interventi di emergenza che si sovrappongono agli interventi precedenti senza mai affrontare le cause strutturali, famiglie evacuate per mesi in attesa di soluzioni definitive - indica con chiarezza che il problema non è tecnico ma politico. Mancano la continuità degli investimenti, la semplificazione dei meccanismi di finanziamento e di attuazione, e soprattutto la consapevolezza collettiva che la prevenzione è molto meno costosa della gestione delle emergenze.

La letteratura internazionale sulle analisi costi-benefici della riduzione del rischio di disastri indica che ogni euro investito in prevenzione può generare risparmi dell'ordine di 4-7 euro nei costi di emergenza e ricostruzione (Shreve & Kelman, 2014), con stime empiriche recenti che si collocano mediamente intorno a 6:1 (NIBS, 2019).

L'attivazione del Commissario Straordinario per la frana di Niscemi, prevista dal decreto-legge del 27 febbraio 2026, n.25, costituisce un passo significativo verso una gestione più strutturata di queste situazioni. Ma il vero salto di qualità richiede un orizzonte temporale più lungo: un grande programma

nazionale pluriennale di difesa del suolo, con risorse stabili, procedure semplificate, e un sistema di monitoraggio capillare del territorio integrato con le piattaforme operative della protezione civile.

Nell'area mediterranea, questo impegno acquista una valenza aggiuntiva: la tutela del territorio dal dissesto idrogeologico è anche tutela di un patrimonio culturale, paesaggistico e umano che costituisce uno degli elementi fondanti dell'identità mediterranea. Rendere il territorio sicuro significa rendere possibile lo sviluppo, la qualità della vita, la continuità delle comunità nei luoghi in cui esse sono radicate da secoli. Questo è, in ultima analisi, il significato più profondo del lavoro tecnico-scientifico che abbiamo il privilegio e la responsabilità di compiere.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei ministri, la Regione Siciliana, la Regione Molise, il Comune di Niscemi e il Comune di Petacciato per la collaborazione nelle attività di emergenza. Ringraziamenti speciali ai gruppi di lavoro UNIFI-CPC, OGS, CNR-IREA e TRE Altamira.

Riferimenti bibliografici

- Castiglione A., Liguori V., Umiltà G., Villari L.C. (2000). *La frana di Niscemi del 12 ottobre 1997. Risultati delle indagini e delle misure, studio geologico e geotecnico, interpretazione del dissesto, criteri d'intervento*. Relazione della Commissione Tecnico Scientifica nominata con ordinanza n.2703 del 29/10/97.
- Cancelli A., Marabini F., Pellegrini M., Tonnetti G. (1984). *Incidenza delle frane sull'evoluzione della costa adriatica da Pesaro a Vasto*. Memorie della Società Geologica Italiana, 27, 555-568.
- Casagli N. (2023). *Catastrofi idrogeologiche: come migliorare gli strumenti di previsione e di prevenzione*. Lettera 150.
- Casagli N. et al. (2026). *Le frane di Niscemi del gennaio 2026 Monitoraggio, verifica del rischio residuo e criteri di intervento per la riduzione del rischio*. Rapporto n.3, 20 aprile 2026. Centro per la Protezione Civile, Università degli Studi di Firenze per conto del Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri.
- Cotecchia F., Santaloia F., Lollino P., Vitone C., Pedone G., Bottiglieri O. (2016). *From a phenomenological to a geomechanical approach to landslide hazard analysis*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 20(9), 1004-1031.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A. (2011). *A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR*. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, 49, 9, 3460-3470.
- Fiorillo F. (2003). *Geological features and landslide mechanisms of an unstable coastal slope (Petacciato, Italy)*. Engineering Geology, 67(3-4), 255-267.
- Guerricchio A., Melidoro G., Simeone V. (1996). *Le grandi frane di Petacciato sul versante costiero adriatico (Molise)*. Memorie della Società Geologica Italiana, 51(2), 607-632.
- ISPRA (2023). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*. Edizione 2023. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.
- Lanari R., Bonano M., Casu F., Luca C.D., Manunta M., Manzo M., Onorato G., Zinno I. (2020). *Automatic generation of Sentinel-1 continental scale DInSAR deformation time series through an extended P-SBAS processing pipeline in a cloud computing environment*. Remote Sensing, 12(18), 2961.
- National Institute of Building Sciences – Multi-Hazard Mitigation Council (2019). *Natural Hazard Mitigation Saves: 2019 Report - Overview*. Washington, DC: National Institute of Building Sciences.
- Rizzo V. (2004). *Un vasto movimento gravitativo al fronte della falda di Gela; evidenze e problematiche in relazione alla tettonica (Frana di Niscemi, Sicilia Meridionale)*. Bollettino della Società Geologica Italiana, 123(2), 229-252.
- Shreve C.M., Kelman I. (2014). *Does mitigation save? Reviewing cost-benefit analyses of disaster risk reduction*. International Journal of Disaster Risk Reduction, 10(A), 213-235.
- Verbale di sopralluogo - Frana di Petacciato (2026). *Sopralluogo del 8 aprile 2026 sul versante nord-est dell'abitato di Petacciato (CB)*. Comune di Petacciato, Centro per la Protezione Civile dell'Università degli Studi di Firenze per conto del Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri.