Valutazione integrata delle pericolosità geologiche per il sistema elettro-energetico italiano: analisi sismiche e geologiche di dettaglio su un caso pilota

Luigi Vadacca, Nunzia Bernardo, Andrea Abbate

2023

Progetto Resilienza e sicurezza del sistema energetico

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale

Accordo di programma 2022-2024 con il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica per le attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale.

Progetto Resilienza e sicurezza del sistema energetico
Work Package WP2 – Sicurezza e vulnerabilità dei sistemi energetici
Linea di Attività LA2.06 – Analisi geologiche e sismiche per lo sviluppo di un caso pilota per la definizione delle forzanti geologiche, idrogeologiche, sismiche critiche per elementi del sistema elettrico-energetico

Codice identificativo RT-2.6-2.06-1

Titolo: Valutazione integrata delle pericolosità geologiche per il sistema elettro-energetico italiano: analisi sismiche e geologiche di dettaglio su un caso pilota

Autori: Luigi Vadacca, Nunzia Bernardo, Andrea Abbate
Verificatori: Francesco D´Assisi Apadula
Approvatori: Giovanni Pirovano, Michele de Nigris

Tipologia di documento: RAPPORTO

Data di emissione: 29/12/2023

Note: prima emissione

© Copyright 2023 by Ricerca sul Sistema Energetico-RSE S.p.A.
Contributo/i liberamente utilizzabile/i a condizione che venga chiaramente e visibilmente citata la società titolare.

Per la tutela dell'ambiente, prima di stampare questo documento pensa bene se è veramente necessario.

INDICE

INDICE 3

SOMMARIO 4

1 - INTRODUZIONE 5

2 - SIMULAZIONI NUMERICHE 3D DEL MOVIMENTO DEL SUOLO CAUSATO DA TERREMOTI 7

2.1 Breve inquadramento sismotettonico dell'area Irpinia 7

2.2 Costruzione del modello numerico 8

2.3 Risultati numerici 13

2.3.1 Test di verifica 13

2.3.2 Comparazione con le registrazioni strumentali 15

2.3.3 Mappe di velocità del campo d'onda e di scuotimento del suolo 16

2.3.4 Attenuazione del movimento del suolo con la distanza 18

3 - STIMA DELLA SUSCETTIBILITÀ A FRANARE IN AREE DI VERSANTE CON PRESENZA DI ELETTRODOTTI 21

3.1 Formalizzazione metodologia adottata 21

3.1.1 [A]: analisi territoriale 22

3.1.2 [B]: modello LOGIT 22

3.1.3 [C]: mappe di suscettibilità 23

3.2 Ampliamento con dati ad alta risoluzione 23

3.3 Aleatorietà della metodologia 24

3.3.1 VIF (Variance Inflation Factor): multicollinearità 25

3.3.2 LOGIT (Modello di Regressione Logistica) 25

3.3.3 AUC (Area Under Curve): Performances 26

3.4 Risultati 27

3.4.1 Statistiche su 20 realizzazioni 27

3.4.2 Mappe di suscettibilità per SL e DF 29

3.4.3 Intersezione con la rete elettrica 30

4 - INTERAZIONE TRA COLATE RAPIDE DI FANGO ED ELETTRODOTTI NELLA REGIONE CAMPANIA 33

4.1 I fenomeni di dissesto geo-idrologico in Campania 33

4.2 Approccio metodologico per la stima della suscettibilità da frana in Campania 34

5 - CENNI SULLA VULNERABILITÀ SISMICA DELLE STRUTTURE E INFRASTRUTTURE DEL SEE 39

6 - CONCLUSIONI 43

7 - BIBLIOGRAFIA 45

8 - ACRONIMI 49

9 - ELENCO ALLEGATI 50

SOMMARIO

La conoscenza delle forzanti sismiche e geologiche cui possono essere sottoposti gli elementi nevralgici del sistema elettro-energetico (SEE) è fondamentale per garantirne il funzionamento in sicurezza, individuarne i rischi e proporre soluzioni migliorative. Per questo motivo nell'attuale triennio di Ricerca di Sistema 2022-2024 è stata intrapresa un'attività di ricerca specifica sul tema della resilienza del SEE in merito a due tipologie di pericolosità naturali: la pericolosità sismica e la pericolosità da frana. L'attività svolta nel 2022 ha permesso di scegliere l'area dell'Irpinia, all'interno della regione Campania, come caso pilota per gli studi di dettaglio e di introdurre le diverse metodologie ed i codici di calcolo idonei per gli studi di pericolosità.

Nel 2023, per quanto riguarda lo studio delle forzanti sismiche, è stato costruito un modello numerico 3D dell'area dell'Irpinia ed è stato simulato lo scuotimento al suolo causato dall'omonimo terremoto di magnitudo Mw 6,9 del 1980. Il modello numerico è stato verificato attraverso simulazioni numeriche indipendenti e validato sulla base delle registrazioni disponibili. Nonostante alcune semplificazioni imposte in questa fase di lavoro, i risultati mostrano un modello di propagazione del campo d'onda realistico, evidenziato per esempio dalle caratteristiche di direttività della sorgente nelle direzioni Nord e Nord-Ovest in accordo con le osservazioni del terremoto del 1980.

Per quanto riguarda la valutazione della pericolosità da frana, invece, è stato effettuato un aggiornamento e raffinamento del modello LOGIT (regressione logistica) per la determinazione delle mappe di suscettibilità e parallelamente, attraverso una metodologia basata sulle caratteristiche geologiche e geomorfologiche di dettaglio del territorio, è stata calcolata la suscettibilità a franare per gli elettrodotti presenti nella regione Campania. I risultati mostrano che il 18% degli elettrodotti ricade in aree ad alta suscettibilità. Per ogni traliccio è stata fornita inoltre una stima dei possibili tiranti e della velocità di impatto in modo da valutare se essi possono resistere o meno ad un ipotetico evento franoso.

Infine, poiché nell'area scelta come caso pilota è presente una elevata concentrazione di impianti eolici, l'attività si conclude con un'analisi bibliografica sulla vulnerabilità degli aerogeneratori.

Keywords: geo-hazard, landslide susceptibility, pericolosità idrogeologica, pericolosità sismica, seismicity.

1 - INTRODUZIONE

Il Sistema Elettro-Energetico (SEE) è soggetto ad un certo livello di pericolosità e di rischio nei confronti di eventi geologici naturali in funzione anche della vulnerabilità delle componenti, strutturali e non che lo costituiscono. L'esposizione del territorio italiano a eventi naturali catastrofici rappresenta uno dei fattori fondamentali da tenere in debita considerazione nell'ambito della gestione del patrimonio infrastrutturale del Sistema Elettro-Energetico nazionale.
Se si considerano le mappe di pericolosità sismica o del dissesto geo-idrologico a livello nazionale, gran parte delle infrastrutture elettriche ed energetiche sono localizzate in aree a elevata sismicità, franosità e soggette ad allagamenti. Eventi sismici, franosi e alluvionali anche recenti [1] hanno coinvolto strutture e infrastrutture del SEE compromettendone il funzionamento che, soprattutto in tali circostanze, è fondamentale per la gestione dell'emergenza e dei soccorsi (fornitura di energia elettrica negli ospedali e altri servizi strategici) per salvare vite umane e ripristinare le normali attività. Come esempi si possono riportare gli effetti della sequenza sismica del Centro Italia del 2016-2017, dove alcuni paesi sono rimasti senza fornitura elettrica a causa del forte danneggiamento delle cabine primarie di riferimento [2], oppure i tralicci abbattuti durante la frana da colata rapida a Sarno nel 1998 (Allegato 2). Risulta evidente, quindi, l'importanza di considerare gli aspetti di pericolosità e di rischio associati alle infrastrutture strategiche del SEE, per gestirne e ottimizzarne la sicurezza e la resilienza.
Le analisi di pericolosità sismica e geo-idrologica rappresentano una parte importante delle valutazioni preliminari per la progettazione e realizzazione di un'opera di ingegneria civile. Per le opere esistenti, e soprattutto per quelle realizzate antecedentemente alle disposizioni di legge e gli strumenti normativi di settore, come il SEE, è necessario definire le forzanti geologiche naturali alle quali sono esposti, la magnitudo, le possibili interazioni e, successivamente, intervenire con opere di mitigazione e adeguamento per ridurne la vulnerabilità e l'esposizione al rischio.

Da qui ha avuto origine l'attività di Ricerca di RSE sul tema della resilienza del Sistema Elettro-Energetico (SEE), iniziata già nel triennio di Ricerca di Sistema 2019-2021, attraverso l'analisi delle pericolosità geologiche di base che caratterizzano il territorio nazionale e di come queste possono avere effetti sul tessuto antropico e infrastrutturale [2] [3]. La ricerca sul tema della resilienza del SEE nazionale continua nel triennio in corso 2022-2024, attraverso la realizzazione di analisi di dettaglio su un caso pilota, mettendo a punto, integrando ad hoc e utilizzando diverse metodologie per la stima delle minacce geologiche, in particolare pericolosità sismica e da frana. Nel *deliverable* 2022, in prima analisi, sono state intersecate le diverse strutture e infrastrutture del SEE con le mappe di pericolosità sismica, idraulica, da frana e da tsunami in modo da avere un quadro generale della situazione a scala nazionale per poi passare alla scala di dettaglio, scegliendo l'area dell'Irpinia come caso pilota. Nell'ambito della pericolosità sismica, sono stati valutati diversi metodi, tratti dalla letteratura scientifica specialistica, idonei per la realizzazione di simulazioni numeriche 3D dello scuotimento al suolo causato da terremoti, con l'obiettivo di comprendere che tipo di accelerazioni ci si possa aspettare in un'area sensibile del SEE. Per tale scopo è stato scelto il codice di calcolo SPEED [4] un codice *open source* ad alte prestazioni basato sul metodo degli elementi spettrali di Galerkin discontinuo. Per quanto riguarda invece gli aspetti di pericolosità da frana, sono stati analizzati in primis dei casi reali di eventi franosi che hanno avuto effetti sulla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN), impattando in maniera più o meno rilevante con le infrastrutture elettriche e successivamente è stato descritto un nuovo approccio metodologico per la valutazione della suscettibilità.

Partendo quindi da queste basi, l'attività di ricerca del 2023 è continuata approfondendo lo studio della pericolosità sismica e quello della pericolosità da frana restringendo il campo applicativo a quello della scala regionale.

Entrando nello specifico, per quanto riguarda lo studio di modellazione numerica delle forzanti sismiche (Sezione 2), l'area dell'Irpinia è stata scelta come area di studio per i seguenti motivi:
- presenza di numerose infrastrutture e strutture del sistema elettro-energetico nazionale;
- disponibilità di dati (che vanno dal modello crostale del sottosuolo ad un'ottima conoscenza della sorgente sismica associata al terremoto del 1980);
- notevole interesse scientifico riguardante lo studio e la simulazione di un meccanismo di rottura molto complesso, sia per le dimensioni rilevanti del terremoto (Mw6.9) sia per i meccanismi di interazione fra tre rotture di faglia distanziate circa 20s l'una dall'altra. Questo tipo di dinamica potrebbe ripetersi in altre aree del territorio nazionale.

È stato quindi costruito un modello numerico 3D e avviate una serie di simulazioni della propagazione delle onde sismiche associate al terremoto di Mw 6,9 del 1980. Il modello numerico è stato verificato e validato sulla base delle registrazioni disponibili e sulla base di dati empirici. Sono stati effettuati inoltre diversi test di sensitività su alcuni parametri di input legati sia alla sorgente sismica che al modello di velocità del sottosuolo per comprenderne gli effetti sui risultati delle simulazioni. Sulla base di quanto ottenuto, nel corso del 2024 verrà migliorato il modello numerico e verranno successivamente generati scenari di scuotimento del suolo.

Per quanto riguarda la valutazione della pericolosità da frana (Sezione 3), questa può essere condotta a partire da mappe di suscettibilità. Tali mappe hanno lo scopo di evidenziare potenziali aree a rischio anche dove i censimenti di frana disponibili non segnalano alcuna zona instabile. In questo rapporto è dunque presentato un aggiornamento e ampliamento della metodologia LOGIT per la determinazione delle mappe di suscettibilità di frana, a partire da quanto già introdotto nella precedente annualità RdS. In particolare, un'area situata in Alta Valtellina (Provincia di Sondrio, Lombardia) è stata analizzata valutando ed affinando le mappe di suscettibilità tramite l'utilizzo di dati ad alta risoluzione e fornendo una classificazione dei sostegni elettrici presenti in base alla pericolosità di frana locale. Dall'area situata in Alta Valtellina si passerà poi (nel corso del 2024) all'applicazione della metodologia al caso pilota.

Un'intera sezione è dedicata alla valutazione della suscettibilità da frane a colate rapide da fango attraverso una metodologia basata sulle caratteristiche geologiche e geomorfologiche di dettaglio del territorio campano (Sezione 4). Lo studio ha permesso di definire quali elettrodotti sono più a rischio di essere coinvolti da un evento franoso dando anche indicazione se essi possano resistere o meno a tale evento attraverso la stima dei possibili tiranti e della velocità di impatto.

Infine, il rapporto si conclude con una prima analisi bibliografica sulla vulnerabilità degli aerogeneratori (Sezione 5), vista la presenza massiccia di tali strutture nell'area dell'Irpinia. Tale analisi si va ad aggiungere a quella già svolta nel corso dello scorso triennio di RdS focalizzata invece su componenti importanti delle cabine primarie quali trasformatori di tensione e di corrente [3].

2 - SIMULAZIONI NUMERICHE 3D DEL MOVIMENTO DEL SUOLO CAUSATO DA TERREMOTI

In questa sezione vengono riportati i principali risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche del movimento del suolo nell'areale dell'Irpinia (Appennino campano) a seguito di eventi sismici significativi effettuate dal Politecnico di Milano (POLIMI) per conto di RSE. La collaborazione con il POLIMI, ed in particolare con il laboratorio MOX del Dipartimento di Matematica e il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, ha permesso di costruire un modello numerico 3D della propagazione delle onde sismiche associate al terremoto di Mw 6,9 del 1980 che è stato verificato e validato sulla base delle registrazioni disponibili e di dati empirici. Sono stati effettuati inoltre diversi *test* di sensitività su alcuni parametri di *input* legati sia alla sorgente sismica che al modello di velocità del sottosuolo per comprenderne gli effetti sui risultati delle simulazioni. In aggiunta sono stati effettuati anche *test* sull'accuratezza aumentando il grado polinomiale della griglia di calcolo. Come anticipato, di seguito vengono riassunti solo i risultati principali. Per approfondimenti si rimanda all'Allegato 1 di questo rapporto (prot:23011265). Questa parte di lavoro sinora svolta rappresenta la base per la simulazione di scenari di scuotimento che verranno effettuati nel corso del 2024.

2.1 Breve inquadramento sismotettonico dell'area Irpinia

Il sistema di faglie che ha generato il terremoto dell'Irpinia del 1980 è situato all'interno dell'Appennino Meridionale, una delle aree italiane più attive dal punto di vista geodinamico. L'Appennino Meridionale si è formato a partire dal Miocene a seguito della subduzione verso ovest della placca africana (Avampaese Adriatico-Apulo) sotto la placca Europea (Avampaese Sardo-Corso). A partire dal Pliocene Superiore, il settore più interno della catena è stato poi interessato da tettonica estensionale ad andamento NNW-SSE [5]. Successivamente (Pleistocene Medio-Superiore) si svilupparono una serie di faglie orientate in direzione appenninica NW-SE a seguito di una nuova fase estensionale ad andamento prevalente NE-SW [6] [7]. Ancora oggi in questo settore, l'attività estensionale è attiva con tassi di 2-5 mm/anno come testimoniato da dati geodetici [8] [9] [10]. Proprio la riattivazione di alcune di queste faglie ha dato luogo al terremoto di magnitudo 6,9 del 1980 in Irpinia. La particolarità di questo terremoto è quella di essere stato caratterizzato da tre episodi di rottura avvenuti a 0_s, 20_s e 40_s su tre differenti piani di faglia (rettangoli in giallo nel riquadro rosso in Figura 2.1; [11] [12]). Questa è stata anche la causa dell'elevata energia sismica che è stata rilasciata. Ma il terremoto del 1980 non è stato l'unico evento significativo in quest'area. Infatti, in Figura 2.1 si può osservare che l'area è stata interessata da diversi forti terremoti storici di magnitudo superiore a 6, in aggiunta a quelli più numerosi di magnitudo moderata Mw compresa tra 5-6 [13], che in Italia, hanno comunque causato effetti devastanti sul territorio.

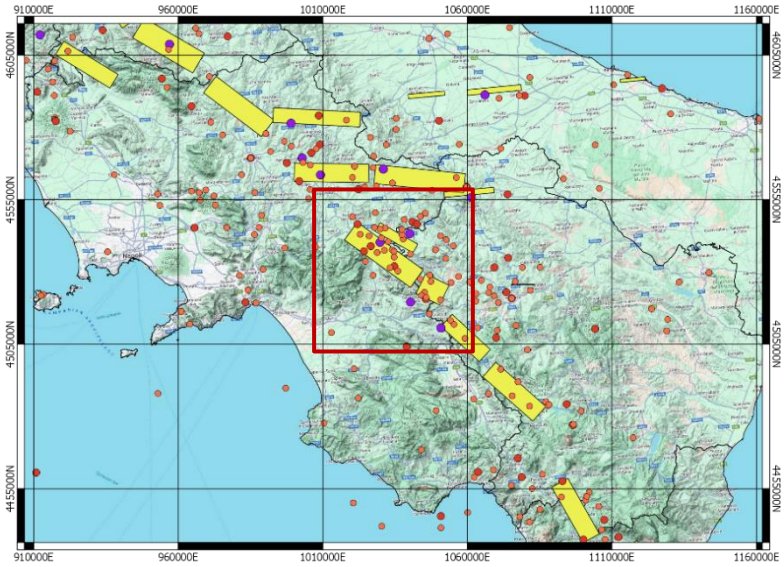


Figura 2.1 – Mappa dell'area di studio (quadrato in rosso) in cui sono riportate le sorgenti sismogenteiche individuali (rettangoli in giallo; dati INGV [14]) e i terremoti storici e strumentali di magnitudo Mw compresa tra 4-5 (cerchi arancioni), tra 5 e 6 (cerchi rossi) e quelli di magnitudo Mw maggiore di 6 (cerchi viola; elaborazione RSE con dati INGV [13].

2.2 Costruzione del modello numerico

Come descritto nel precedente Rapporto di Ricerca di Sistema [1] il codice di calcolo scelto per effettuare le simulazioni numeriche è SPEED (*Spectral Elements in Elastodynamics with Discontinous Galerkin*, http://speed.mox.polimi.it). SPEED [4] è un codice numerico *open-source* verificato e validato per simulazioni numeriche *physics-based* della propagazione delle onde sismiche in mezzi eterogenei a partire da sorgenti sismiche finite o puntuali. Per effettuare una simulazione in SPEED si ha bisogno di un modello della sorgente sismica (per esempio la rappresentazione cinematica del piano di faglia del terremoto che si vuole simulare) e di un modello crostale del sottosuolo (in pratica riguarda la descrizione delle proprietà meccaniche dei vari strati rocciosi all'interno del volume crostale oggetto di studio).
In una prima fase del lavoro è stato necessario dunque effettuare un'analisi e integrazione di tutti i dati geofisici e geologici disponibili in modo da poter costruire un modello in grado di riprodurre le principali caratteristiche del comportamento dinamico del sottosuolo dell'Irpinia.

Il dominio computazionale ricopre un'area di 55x66 km² che include la parte orientale della regione Campania e parte della Basilicata (Figura 2.2). L'estensione del dominio computazionale è stata scelta in modo da includere l'epicentro del principale evento sismico del 1980 e la faglia che ha generato tale terremoto. Figura 2.2 mostra l'estensione del domino computazionale (rettangolo verde) insieme alla posizione delle stazioni di registrazione, l'epicentro del principale evento del 1980 e la faglia modellata. Il terremoto di magnitudo momento Mw 6,9 del 23 novembre 1980 [15] [16] è stato scelto per la calibrazione e validazione delle simulazioni effettuate con SPEED. La scelta si è basata su diversi criteri tra i quali: la magnitudo del terremoto (essendo il terremoto più forte avvenuto nella regione Campania); il numero di registrazioni disponibili e il numero di studi presenti in letteratura i quali sono stati indispensabili per la caratterizzazione de modello numerico. Ovviamente dal punto di vista applicativo, come già rimarcato nell'introduzione e mostrato nel Rapporto di RdS del 2022 [1], l'estensione del dominio computazionale è stata definita in modo tale da includere importanti strutture e infrastrutture del SEE nazionale. Si sottolinea che il terremoto oggetto delle simulazioni numeriche ha prodotto un'ampiezza di scuotimento molto forte e danneggiamenti su una vasta area, dovuto

principalmente al fatto che il processo di rottura è avvenuto con la riattivazione di tre differenti superfici di faglie parallele. Come mostrato in Figura 2.2, nelle simulazioni eseguite fino ad adesso è stata modellata solo una di queste faglie. In pratica quella più estesa e sulla quale è avvenuta la prima rottura.

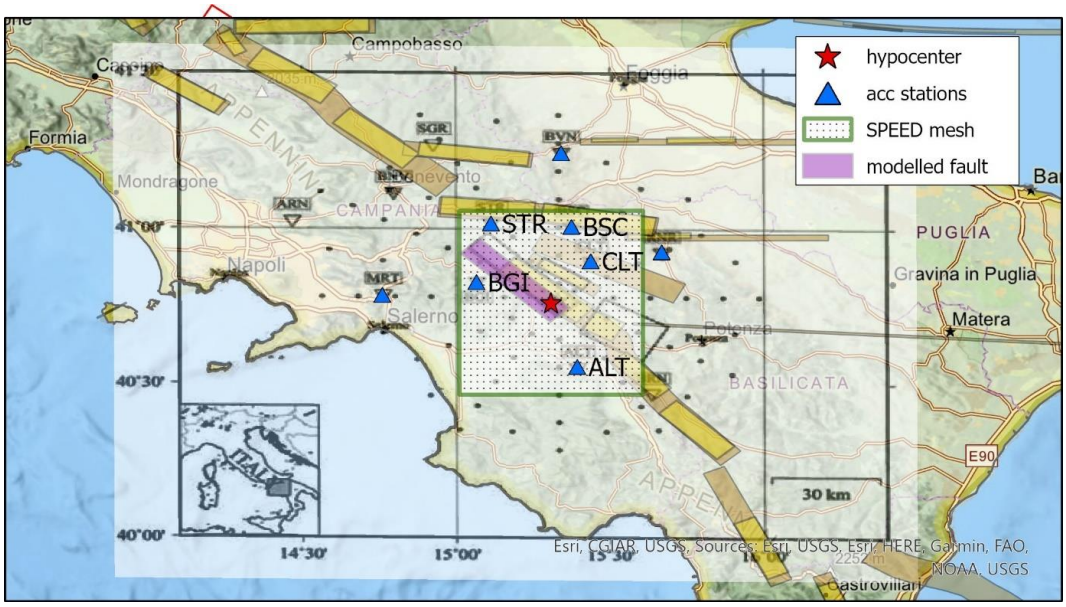


Figura 2.2 – Posizione del modello numerico (SPEED *mesh*) nella regione dell'Irpinia. La stella rossa rappresenta l'epicentro del principale evento sismico del 1980; i triangoli blu inidicano le stazioni sismiche usate come riferimento. In viola, la faglia modellata per le simulazioni numeriche. La figura sullo sfondo è presa da [15], mentre le sorgenti sismogentiche da [14]

Il modello numerico si estende sino ad una profondità di 35 km. Per quanto riguarda la caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei vari strati rocciosi che caratterizzano il sottosuolo, ci si è basati sul lavoro di [15] con alcune modifiche da [17] (Tabella 2.1). Rispetto al lavoro di [17], sono stati introdotti due profili parabolici aggiuntivi (NH800 e NH600) in modo da rendere più dolce l'incremento delle proprietà con la profondità nel primo strato (si veda Figura 2.3 per dettagli).Il comportamento dinamico è stato modellato come visco-elastico lineare, considerando un fattore di qualità Q costante, come suggerito dal lavoro di [18]. I valori adottati in questo lavoro erano impostati con un valore di Q= Vs/10 (in accordo, per esempio, con [16]).

Tabella 2.1 – Profili di densità, velocità Vp e Vs adottati nel modello del sottosuolo (da [17]). Nota le differenti assunzioni effettuate per il primo strato: valori costanti o una legge dipendente dalla profondità (profilo (a) e (b)).

Material		**Vs [m/s]**	**Vp [m/s]**	***Mass density* [kg/m³]**
Mat 1		1200	$1{,}8 \cdot Vs$	2200
	(a) NH800 model	$700 + 39\ z^{0.5}$		$1960 + 11\ z^{0.5}$
	(b) NH600 model	$450 + 47\ z^{0.5}$		$1900 + 13\ z^{0.5}$
Mat 2		1930	$1{,}8 \cdot Vs$	2300
Mat 3		2490	$1{,}8 \cdot Vs$	2500
Mat 4		3150	$1{,}8 \cdot Vs$	2600
Mat 5		3590	$1{,}8 \cdot Vs$	2700
Mat 6		4140	$1{,}8 \cdot Vs$	2900

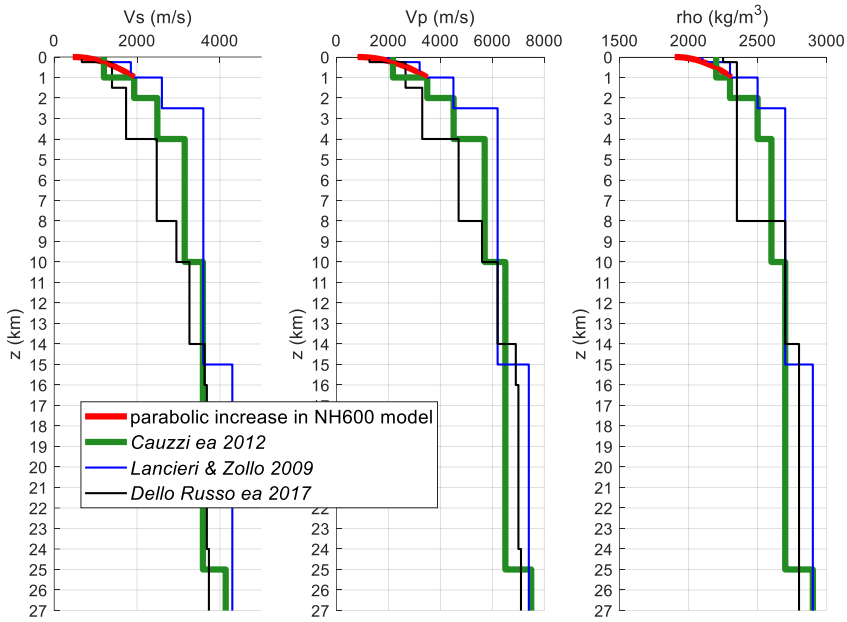


Figura 2.3 – Profili Vs, Vp e di densità adottati nel modello numerico. Il profilo verde si riferisce al modello di riferimento di [17], mentre quello rosso deriva dalla legge parabolica adottata nel primo strato nel modello NH600. In blu e in nero si riportano invece per comparazione i profili usati in altri studi ([19] [16] rispettivamente).

Come è stato detto all'inizio della sezione, un altro parametro fondamentale per effettuare le simulazioni in SPEED è il modello cinematico della sorgente sismica, il quale descrive in che modo è avvenuta la rottura sul piano di faglia. Le caratteristiche della prima rottura che ha interessato il terremoto del 23 novembre 1980 sono state investigate in dettaglio da diversi autori [11] [12] [20] [21]; l'evento era associato alla rottura di una faglia normale con direzione Appenninica e immergente 60° verso nordest. In questo lavoro si è fatto riferimento al modello usato da [15] e [12]. I parametri della sorgente cinematica sono mostrati in Tabella 2.2. In Figura 2.4 sono mostrate invece la distribuzione dello *slip* cosismico sul piano di faglia, dello *Slip Rate Function* (SRF) e la funzione del momento totale e del tasso di momento sia nel dominio frequenza che in quello del tempo.

Dal punto di vista computazionale, si sottolinea che la modellazione della sorgente in SPEED avviene tramite una innovativa e vantaggiosa strategia detta "*not-honoring fault*" (si veda per esempio [22]) sviluppata specificamente per i modelli di rottura di faglia finita caratterizzati anche da geometrie complesse. In pratica, la *mesh* non necessita di incorporare in maniera esplicita la geometria del piano di faglia (questo richiederebbe infatti molto tempo nella costruzione della *mesh* stessa) ma i nodi vicini all'area di rottura della superficie di faglia sono selezionati in modo da riprodurre il momento sismico totale dell'evento che deve essere simulato.

Tabella 2.2 – Parametri della sorgente cinematica usati nella simulazione. Il modello di faglia di riferimento è quello usato da [15].

Parameter	Ameri et al. (2011)
M_W	6,9
Source area [km²]	35 x·15
Rupture velocity V_R	0,8 * Vs
Strike [°]	315
Dip [°]	60
Rake	-90

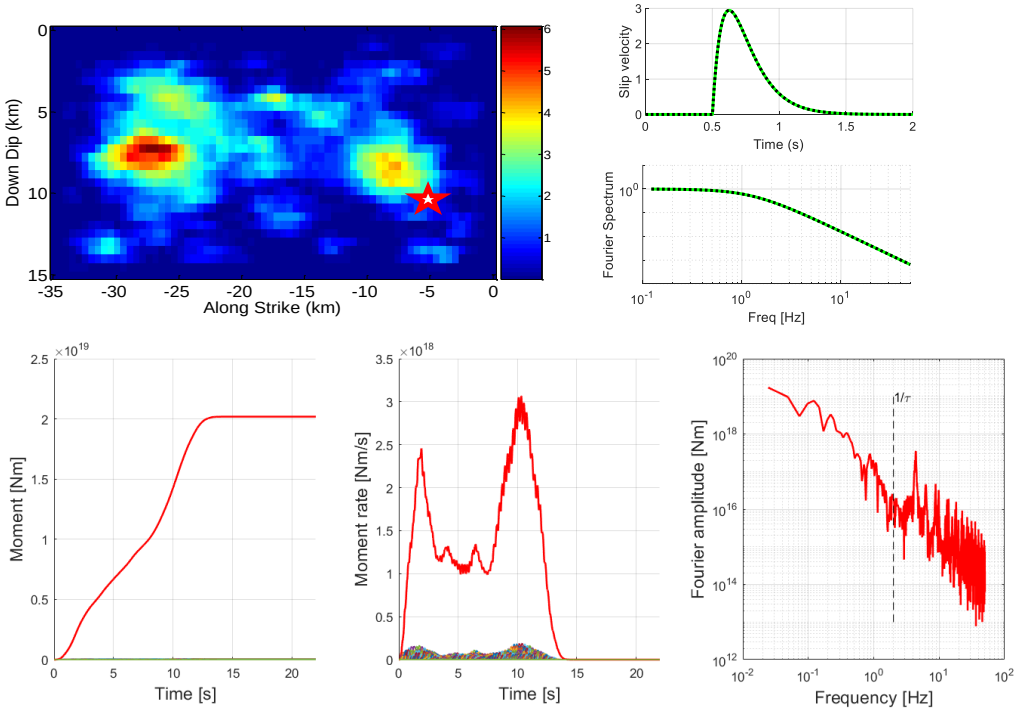


Figura 2.4 – In alto a sinistra è mostrata la distribuzione dello *slip* cosismico (da [15]) e la posizione dell'ipocentro (stella rossa). In alto a destra è mostrata la *Slip Rate Funcion* nel dominio del tempo e della frequenza. In basso invece da sinistra verso destra è mostrato il momento totale e il tasso di momento nel dominio del tempo e nel dominio frequenza (da Allegato 1)

La Figura 2.5 mostra il volume crostale discretizzato attraverso una *mesh* strutturata di elementi esaedrali conformi con lunghezza caratteristica di 125 m in prossimità della superficie fino a raggiungere 750 m sul lato inferiore. La dimensione minima della *mesh* è stata calibrata per propagare correttamente frequenze fino a circa 2 Hz. Entrambi i domini con (TOPO) o senza (FLAT) la topografia, sono stati generati per i fini di validazione come spiegato dopo. Ai lati e al *bottom* del modello sono state assegnate delle condizioni al contorno di assorbimento. Il *time step* è fissato a 0,002s per un tempo totale della simulazione di 30 s. In Tabella 2.3 sono elencate le principali caratteristiche di calcolo per i due modelli numerici. Le *mesh* consistono di circa 2 milioni di elementi portando ad un numero totale di circa 400 milioni di gradi di libertà. Le simulazioni numeriche sono state eseguite sfruttando le capacità di calcolo parallelo di SPEED.

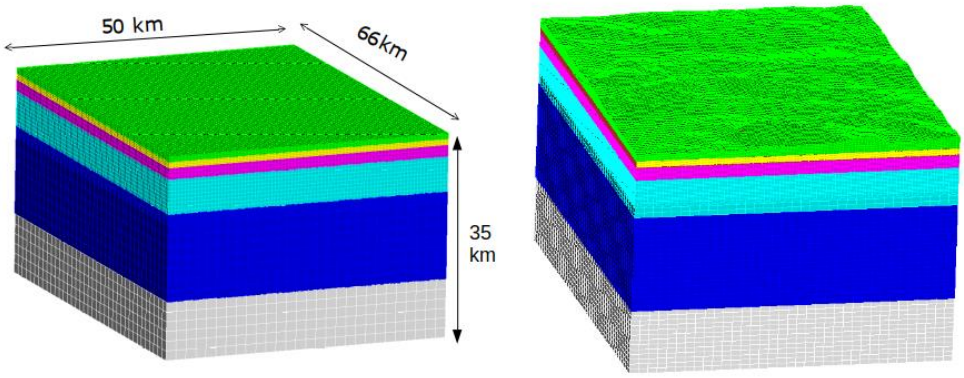


Figura 2.5 – Dominio computazionale usato nelle simulazioni: a sinistra la versione FLAT, senza topografia e a destra la versione TOPO, in cui è presente la superficie topografia.

Tabella 2.3 – Caratteristiche computazionali dei differenti modelli di Figura 2.5: modello FLAT e TOPO.

Model	FLAT	TOPO
Elements	1.933,226	2.257.190
DoFs	364.644.459	425.908.179
Polynomial degree	from 2 to 5	
Max Frequency	2 Hz	
Time step	0.002 s	
Time window [s]	30	
Vs,min [m/s]	1200 700(NH800) 450 (NH600)	
Vp,max [m/s]	7452	

Tabella 2.4 mostra l'elenco delle varie simulazioni effettuate da SPEED attraverso cui è stato possibile effettuare un'analisi di sensitività su diversi elementi. Ad esempio, sono stati analizzati gli effetti della topografia (modello FLAT e TOPO, Figura 2.5); del profilo delle velocità sismiche del sottosuolo attraverso una dipendenza con la profondità di tipo parabolico o a gradino (Figura 2.3) e considerando anche valori diversi di Vs30 (il modello NH800 considera Vs30= 800 m/s mentre il modello NH600 considera Vs30= 600 m/s). In aggiunta, sono stati considerati diversi gradi spettrali (SD) polinomiali (da 2 a 5) in modo da controllare i parametri di discretizzazione appropriati per il *range* di frequenza da raggiungere come obiettivo (in pratica il compromesso tra costi computazionali e risoluzione di frequenza).
Poiché in SPEED sono implementate leggi costitutive non-lineari, oltre alla modellazione viscoelastica lineare, come ulteriori fasi dell'analisi sono in programma simulazioni che tengano conto della non linearità del terreno.

Tabella 2.4 – Overview delle simulazioni numeriche eseguite con SPEED. Si veda il testo per dettagli.

Label	***Model***	***Source***	***Wave velocity profile***	**Mw**	**SD**
1-FLAT	*Flat*	*Point*	*step-like*	4,5	4
2-FLAT	*Flat*	*Extended*	*homogeneous*	6,9	4
3-FLAT	*Flat*	*Extended*	*step-like*	6,9	4
4-FLATa	*Flat*	*Extended*	*NH800 parabolic*	6,9	4
4-FLATb	*Flat*	*Extended*	*NH600 parabolic*	6,9	2-3-4-5
5-TOPOa	*Topo*	*Extended*	*NH800 parabolic*	6,9	4
5-TOPOb	*Topo*	*Extended*	*NH600 parabolic*	6,9	2-3-4-5

Prima di passare all'analisi dei risultati, di seguito viene fatta una descrizione della tecnica di generazione di frequenze ad ampia banda (*broadband*). Infatti, com'è noto, l'accuratezza delle simulazioni numeriche *physic-based* è limitata ad un range di lungo periodo $T \geq T^*$, dove T^* è tipicamente nel range di 0,5-1 s (si veda frequenza massima in Tabella 2.3). Questo è dovuto principalmente al fatto che non si conosce in dettaglio la crosta terrestre e il processo di rottura dei terremoti a brevi lunghezze d'onda e parzialmente dovuto anche ai costi computazionali di griglie di calcolo di grandi dimensioni e ad alta risoluzione. Per questo motivo, la parte cruciale del lavoro di *postprocessing* è la generazione di forme d'onda a banda larga, in cui le forme d'onda a bassa frequenza simulate sono arricchite nel *range* di alta frequenza per produrre serie temporali con un contenuto di frequenza realisticamente ampio. Questo rappresenta uno *step* fondamentale per trattare le forme d'onda simulate allo stesso modo delle registrazioni, e quindi, renderle utilizzabili nelle applicazioni di ingegneria sismica. A tal fine, in questo lavoro è stata applicata una versione dell'approccio ANN2BB [23] [24] basato sulle reti neurali (*Artificial Neural Networks*; ANNs) addestrate sulle registrazioni di *strong ground motion* (si rimanda all'Allegato 1 per dettagli, prot: 23011265).

2.3 Risultati numerici

Come spiegato nel precedente paragrafo è stato scelto il terremoto di Mw 6,9 del 1980 per calibrare e validare il modello numerico 3D. In questa sezione vengono descritti i risultati delle simulazioni numeriche focalizzandosi maggiormente sulla comparazione tra le registrazioni disponibili e quelle sintetiche, il tutto dopo aver mostrato alcuni *test* di verifica e di convergenza delle simulazioni numeriche nel range delle alte frequenze. La variazione spaziale del campo d'onda simulato è mostrata in termini di mappe di scuotimento del suolo di differenti valori di picco e in termini di attenuazione con la distanza. Si rimanda all'Allegato 1 per ulteriori dettagli sui risultati ottenuti sui differenti casi test elencati in Tabella 2.4.

2.3.1 Test di verifica

Per verificare se le assunzioni fatte sul modello di velocità del sottosuolo e sui parametri di sorgente fossero appropriate, la soluzione numerica ottenuta con SPEED è stata confrontata con quella ottenuta da codice Hisada, basato sull'integrazione analitica delle funzioni di Green [25]. Questo codice permette di calcolare il *ground motion* in un semispazio a strati orizzontali a partire da un modello di sorgente cinematica di faglia finita e fornendo soluzioni con una risoluzione in frequenza massima di 1-2 Hz. Come si nota dai risultati mostrati in Figura 2.6 si è ottenuto un eccellente accordo tra le due tecniche di simulazione, dimostrando l'accuratezza della *mesh* numerica e delle ipotesi adottate sul profilo del sottosuolo e della sorgente.

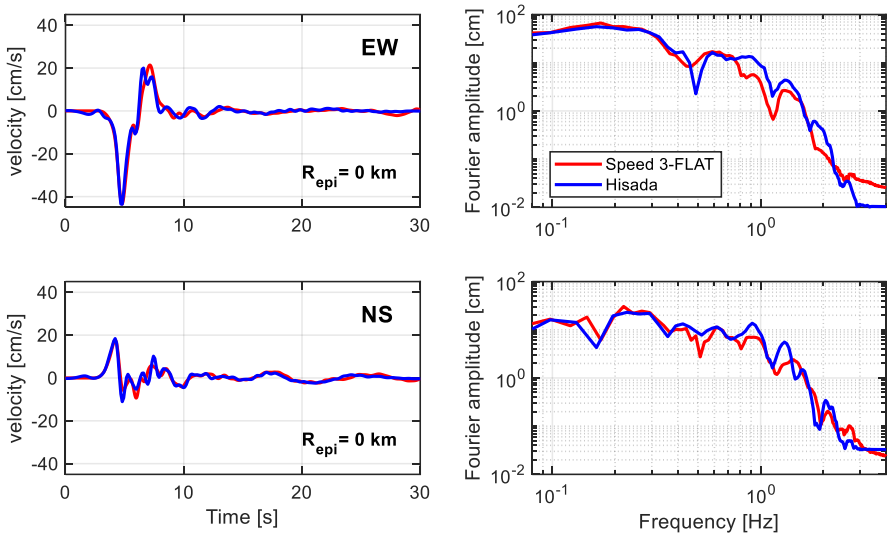


Figura 2.6 – Stazione virtuale all'epicentro (R_{epi}= 0km). In alto sono mostrate le *time history* di velocità e il corrispondente spettro di ampiezza di Fourier per le componenti EW (in alto) e NS (in basso). I risultati si riferiscono al modello 1D di sorgente estesa, con topografia piatta (modello 3-FLAT in Tabella 2.4). Tutte le *time history* sono state filtrate con un filtro passa-basso a 1.5 Hz (da Allegato 1).

In aggiunta, per trovare il giusto compromesso tra accuratezza della soluzione numerica, risoluzione della griglia, grado spettrale (SD) e costi computazionali sono stati effettuati diversi *test* principalmente sui modelli 4-FLAT e 5-TOPO (Tabella 2.4). Alcuni di questi risultati sono illustrati in Figura 2.7 dove si vede per esempio che la soluzione con SD=4 si mantiene molto vicina a quella ottenuta con un modello con SD=5 fino a circa 2,5 Hz. Questi sono stati dunque considerati come limiti di accuratezza di riferimento dei risultati numerici in questa prima fase del lavoro.

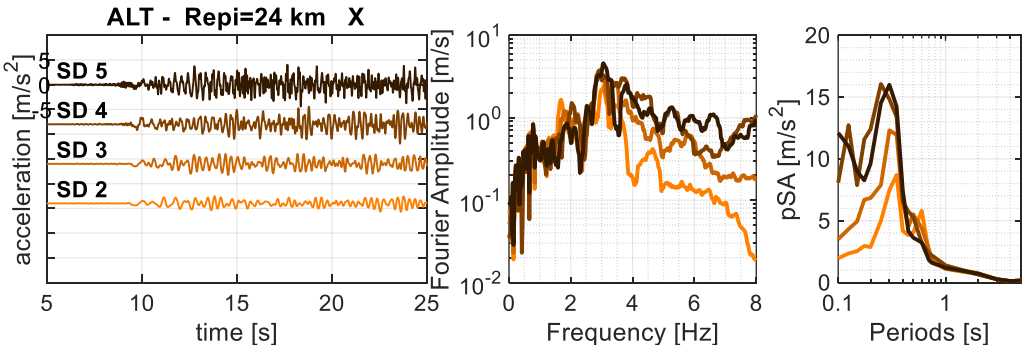


Figura 2.7 – Risultati numerici per la stazione ALT (mostrata in Figura 2.2), ottenuti con il modello 5-TOPOb della Tabella 2.4. Le simulazioni, performate con grado spettrale SD da 2 a 5, sono mostrate nel dominio spettrale e nel dominio del tempo. Nessun filtro è stato applicato alle time history (da Allegato 1).

Secondo le analisi di verifica, i risultati numerici considerati più accurati sono stati quelli del modello 5-TOPOb (Tabella 2.4), per il grado spettrale SD = 4 e con un arricchimento a banda larga effettuato utilizzando ANN addestrate con il database SIMBAD v6. Per questo motivo, di seguito verranno discussi soltanto i risultati associati a questa simulazione.

2.3.2 Comparazione con le registrazioni strumentali

In questa sezione il *ground motion* registrato viene confrontato con quello ottenuto dalle simulazioni di SPEED arricchite nel dominio delle alte frequenze, alle stazioni accelerometriche mostrate in Figura 2.2, situate quindi a circa 20-30 km dall'epicentro. I confronti, nel dominio temporale e spettrale, sono mostrati nelle figure successive (Figura 2.8, Figura 2.9, Figura 2.10). Nonostante alcune semplificazioni effettuate in questa prima parte dell'attività, come per esempio l'aver considerato la rottura lungo un solo piano di faglia oppure le proprietà del suolo rigide, le simulazioni sono in ragionevole accordo con le osservazioni.

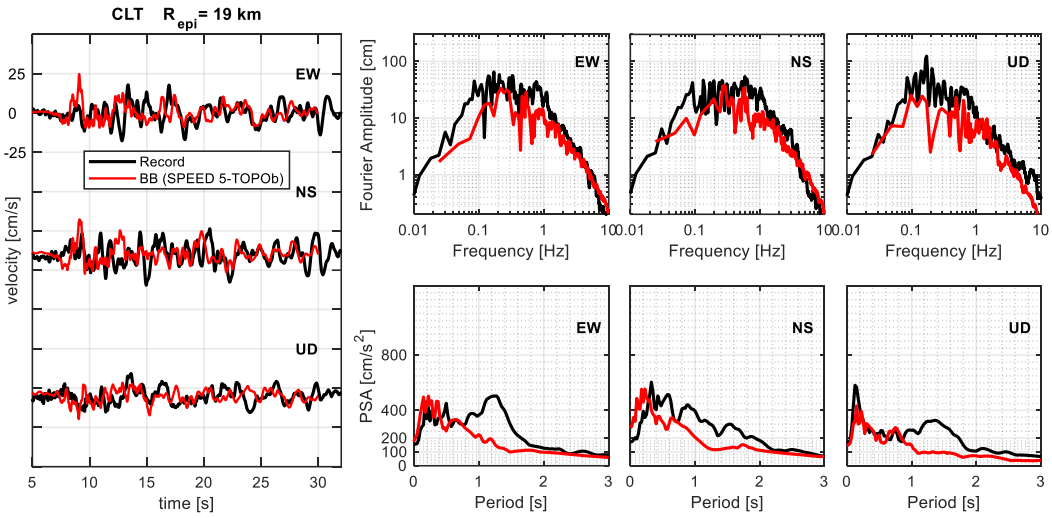


Figura 2.8 – Stazione CLT (R_{epi}=19 km). *Time history* delle velocità registrate (in nero) e simulate (in rosso, BB per il modello 5-TOPOb) con i corrispondenti spettri di risposta e di Fourier. Nessun filtro è stato applicato alle simulazioni (da Allegato 1, prot: 23011265).

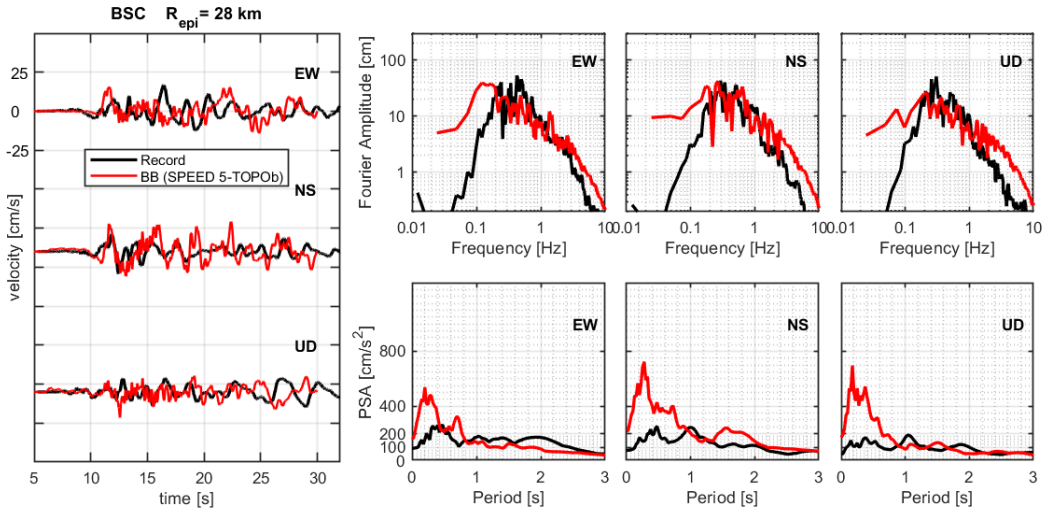


Figura 2.9 – Come Figura 2.8 per la stazione BSC (R_{epi}=28 km).

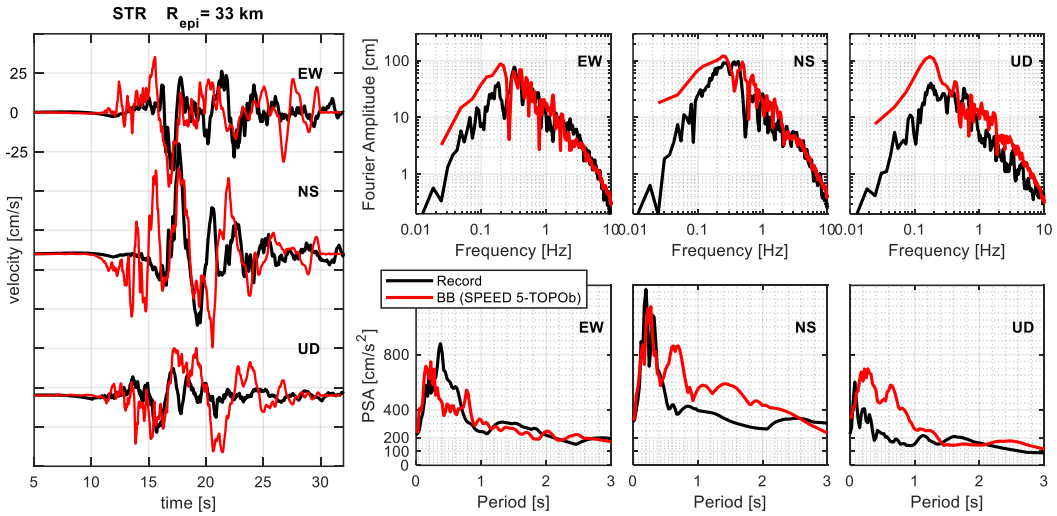


Figura 2.10 – Come Figura 2.8 per la stazione STR (R_{epi}=33 km).

2.3.3 Mappe di velocità del campo d'onda e di scuotimento del suolo

In Figura 2.11 sono mostrate le velocità orizzontali del suolo nella direzione EW a vari istanti di tempo evidenziando come le onde sismiche si propagano interagendo con la topografia. Un altro aspetto importante che si osserva sono gli effetti della propagazione della rottura dovuti alle caratteristiche della distribuzione dello *slip* sul piano di faglia, chiaramente visibili nella porzione nord e nordoccidentale del campo numerico, dove si trovano le stazioni BGI e STR.

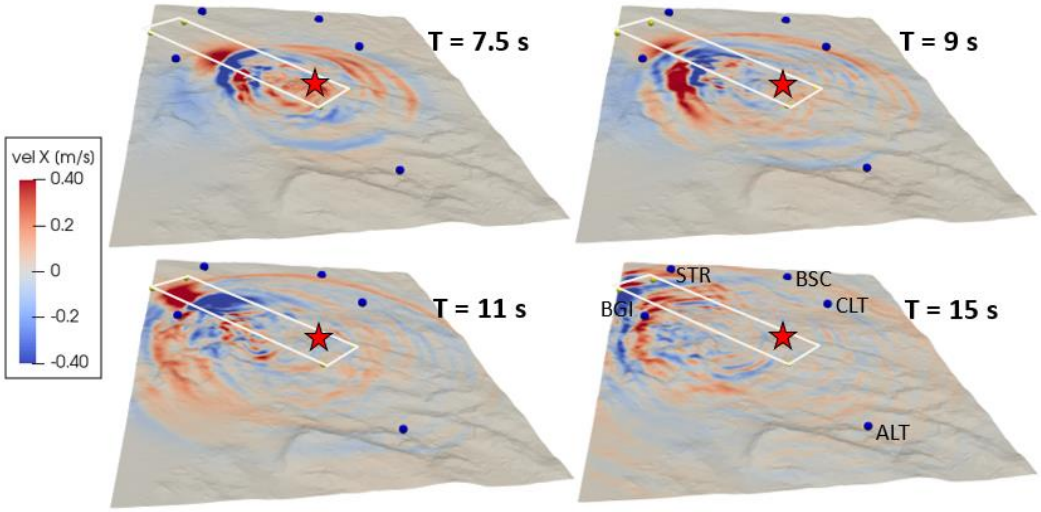


Figura 2.11 – Componente EW della velocità del *ground motion* (modello 5-TOPOb) simulata a 7,5; 9; 11 e 15 s. I punti blu rappresentano le stazioni accelerometriche, il rettangolo bianco la proiezione del piano di faglia e la stella rossa l'epicentro del terremoto simulato. In questo caso è stato applicato un filtro passa basso a 2Hz (da Allegato 1).

Figura 2.12 e Figura 2.13 mostrano le mappe di scuotimento del suolo espresso attraverso picchi di accelerazione (PGA), velocità (PGV), spostamento permanente (PDIS) e pseudo accelerazione a 3s (PSA3s) del movimento del suolo considerando la componente parallela e normale al piano di faglia e la componente verticale. Le registrazioni sono mostrate alle stazioni di riferimento usando la stessa colorazione. L'accelerazione è mostrata solo per le simulazioni *broadband* senza filtri

passa basso, mentre per le altre misure di intensità le simulazioni SPEED sono mostrate con un filtro passa basso a 2 Hz. Come per la velocità del campo d'onda mostrato nella precedente figura, un intenso scuotimento del suolo è ben visibile nella porzione nordoccidentale del campo di propagazione, vicino alla proiezione delle superficie del piano di faglia e dove la distribuzione dello slip cosismico mostrato in Figura 2.4 ha la sua principale asperità. Si può osservare un generale accordo con le osservazioni, eccetto per la stazione BGI, che rappresenta la stazione più vicina al piano di faglia e per la quale giocano un ruolo significativo le caratteristiche peculiari del pattern dello slip di faglia.

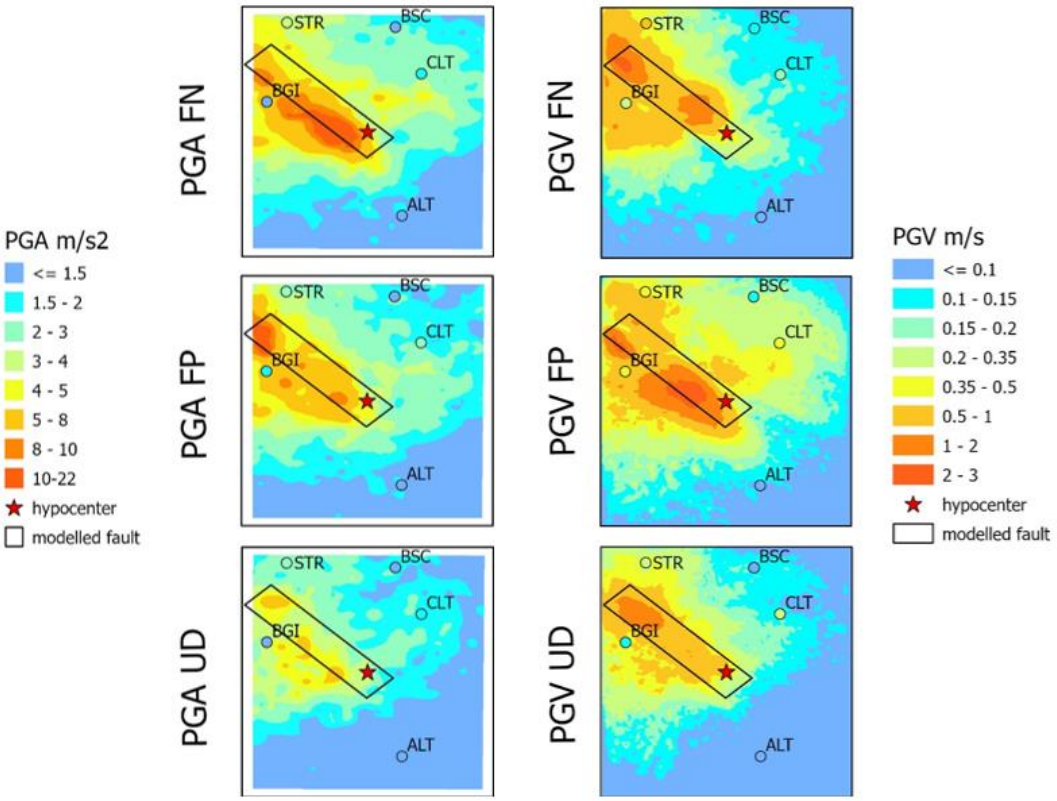


Figura 2.12 – Mappe PGA (a sinistra) e PGV (a destra) ottenute dalla simulazione BB 5-TOPOb. I valori di picco registrati sono visualizzati con cerchi colorati. Si nota che i valori di PGA sono stati calcoalti da simulazioni BB, senza filtraggio, mentre i valori di PGV sono stati calcolati da SPEED dopo un filtro passa basso a 2 Hz. Per il movimento orizzontale, sono mostrate le componenti normali (FN) e parallele (FP) del piano di faglia (da Allegato 1).

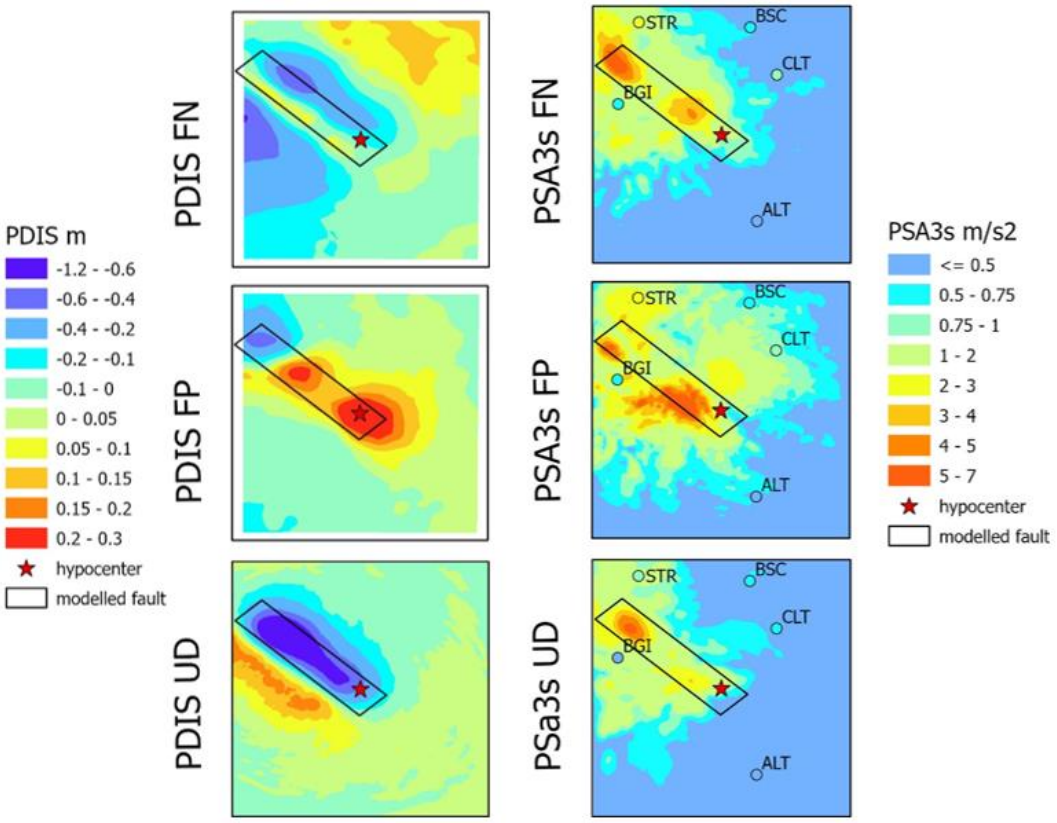


Figura 2.13 – Mappe di PGD (a sinistra) e PSA a 3s (a destra) ottenute dalla simulazione 5-TOPOb (senza l'arricchimento BB e con filtro passabasso a 2Hz). I valori di picco registrati sono visualizzati con cerchi colorati. Per il movimento orizzontale, sono mostrate le componenti normali (FN) e parallele (FP) del piano di faglia (da Allegato 1).

2.3.4 Attenuazione del movimento del suolo con la distanza

In ultima analisi, sono stati considerati i valori di PGA e PSA(3s) (Figura 2.14) e quelli di PGV (Figura 2.15) simulati, in funzione della distanza di Joyner-Boore Rjb. In aggiunta, poi questi valori sono stati confrontati con le registrazioni e i valori presi dal database NESS2.0 considerando sia il terremoto dell'Irpinia che altri terremoti del *database* con stessa magnitudo (Mw 6,9). Inoltre, sono mostrate per comparazione le previsioni del *ground motion model* (GMM) di [26] (ITA18), adeguate agli effetti di *near source* (ITA18corr, dopo [27]). Queste comparazioni suggeriscono innanzitutto che c'è un buon accordo con i dati registrati (cerchi magenta e celesti) sia nel campo vicino che lontano, con una tendenza per le simulazioni numeriche a valori più alti sui lunghi periodi per distanze Rjb < 10 km. Comunque, i risultati sono consistenti con le registrazioni dell'evento dell'Irpinia. Nella regione di *footwall* del campo vicino, le simulazioni numeriche tendono a dare valori più alti rispetto alle previsioni o alle osservazioni, essendo molto sensibili ai pattern di radiazione del campo di rottura in corrispondenza delle asperità principali di *slip* sul piano di faglia. Si rimanda all'Allegato 1 per maggiori dettagli.

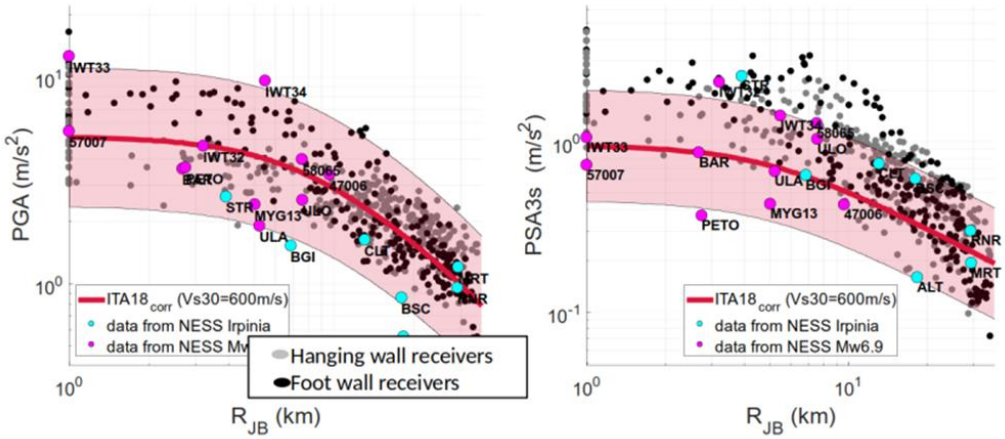


Figura 2.14 – Media geometrica dell'accelerazione orizzontale (PGA, a sinistra) e della pseudo-accelerazione a 3s (PSA3s, a destra) come una funzione della distanza di Joner-Boore Rjb, dalle registrazioni (cerchi magenta e celeste), dalle simulazioni BB 5-TOPOb (punti neri per il *footwall* e punti grici per l'*hangingwall*) e da [26],ITA18, (mediana e ± devizione standard rappresentate dalle regioni ombreggiate), corretti con termini *near site* da [27].

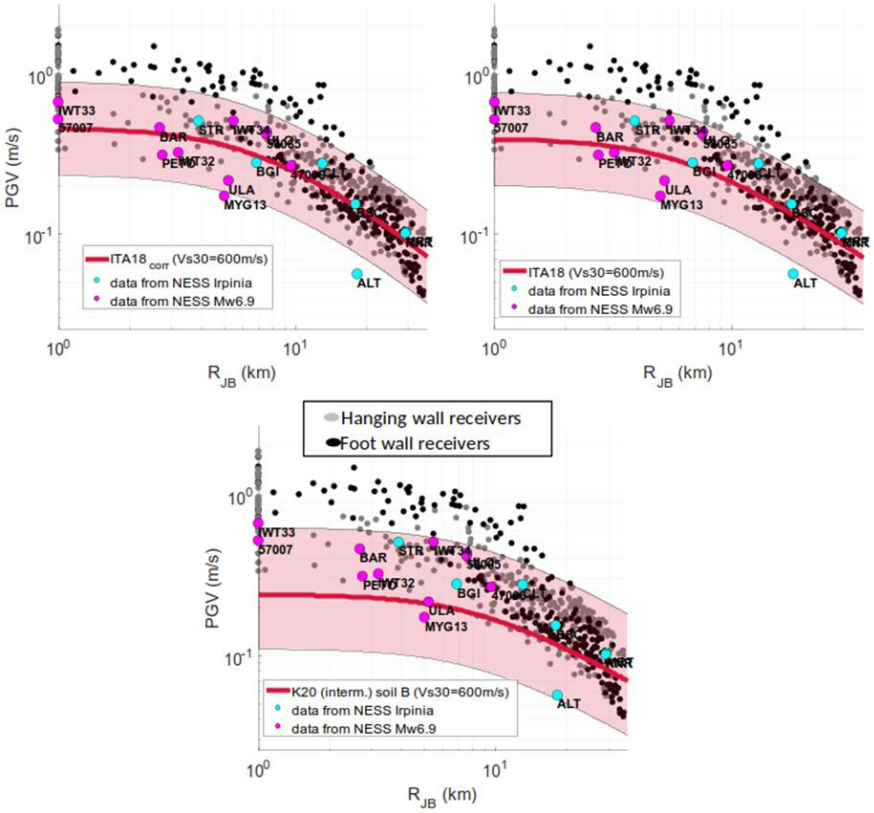


Figura 2.15 – Come per Figura 2.14, per velocità orizzontale (PGV), comparate con [26], ITA18 e corrette (a sinistra) con i termini di *near site* [27] o non corrette (centro), e comparate con [28] [29](a destra). Mediana e ± devizione standard rappresentate dalle regioni ombreggiate, Vs30=600 m/s.

Nonostante alcune semplificazioni fatte sino ad adesso, i risultati delle simulazioni numeriche che hanno riprodotto il terremoto dell'Irpinia di Mw 6,9 del 1980, sono in buon accordo con le

osservazioni. I valori di picco simulati che più si discostano da quelli registrati sono quelli più prossimi alla sorgente sismica, in quanto sono fortemente condizionati dalle caratteristiche dello scorrimento cosismico sul piano di faglia che per adesso è stato semplificato. Infatti, come descritto all'inizio della sezione, il terremoto dell'Irpinia è avvenuto su tre distinte superfici di faglia che si sono riattivate a 20s l'una dall'altra. Per questo motivo, nel corso del 2024, verrà migliorato il modello numerico, considerando per esempio le tre diverse sorgenti di rottura. Successivamente verranno generati vari scenari di scuotimento del suolo, i quali forniranno accelerogrammi specifici dell'area in esame che permetteranno di valutare i possibili effetti che terremoti significativi possono avere sul sistema elettro-energetico. In questa valutazione verranno considerati gli aerogeneratori, vista la loro presenza massiva sul territorio dell'Irpinia.

3 - STIMA DELLA SUSCETTIBILITÀ A FRANARE IN AREE DI VERSANTE CON PRESENZA DI ELETTRODOTTI

In questo capitolo sono ripresi alcuni concetti chiave riguardanti la valutazione della suscettibilità da frana in presenza di elettrodotti. La metodologia presentata nella scorsa annualità [30] che faceva riferimento al modello di regressione logistica LOGIT è stata ulteriormente affinata e ampliata. Di seguito sono riportati gli avanzamenti salienti ed una applicazione completa al caso studio situato in Alta Valtellina, provincia di Sondrio, già trattato nella scorsa annualità.

3.1 Formalizzazione metodologia adottata

Lo scopo della valutazione di suscettibilità è quello di definire a livello pianificatorio una valutazione della pericolosità di frana in differenti aree del territorio al fine di indirizzare una prioritizzazione dei possibili interventi sulla rete elettrica [30]. A questo proposito, nella seguente analisi, gli elementi della rete elettrica nazionale potenzialmente vulnerabili sono rappresentati dai sostegni / tralicci della RTN. Grazie alla collaborazione con TERNA, è stata confermata come questa componete sia di fatto quella più vulnerabile alla minaccia di frana, specialmente in aree collinari e montane.
In Figura 3.1 è mostrato lo schema concettuale di applicazione della metodologia per la stima della suscettibilità. Lo schema logico è suddiviso in 3 sottosezioni: [A] in cui si descrivono i dati territoriali necessari, [B] in cui è riportato l'utilizzo del modello di regressione logistica LOGIT, [C] in cui viene dettagliata l'analisi dei dati ottenuti.

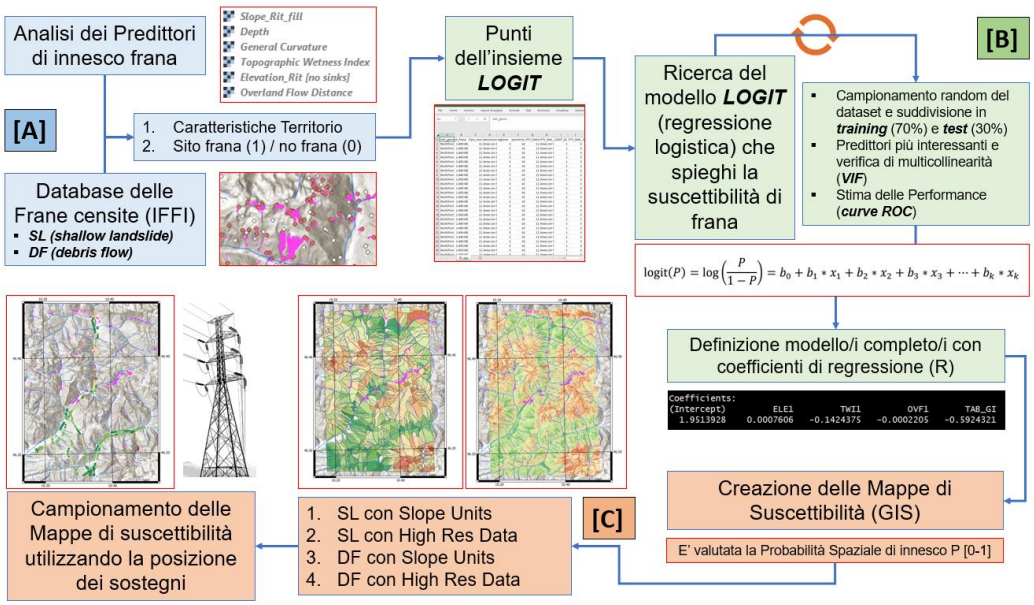


Figura 3.1 – Schema della metodologia per la stima della suscettibilità da frana tramite la regressione logistica.

3.1.1 [A]: analisi territoriale

L'analisi territoriale consiste in un'attività preliminare di reperimento dei dati GIS[1] utili all'implementazione della metodologia. In base alle indicazioni di letteratura, tali dati sono analoghi a quelli già presentati nel rapporto RDS 2022 [30] e si raggruppano in 3 categorie tematiche:

- Dati Geomorfologici: descrivono la topografia dell'area e sono ottenuti a partire dal modello digitale del terreno. In particolare, troviamo l'elevazione, la pendenza, la curvatura e l'esposizione.
- Dati Geologici, Litologici e di Copertura del suolo: descrivono alcuni tematismi del territorio come la rappresentazione della carta geologica oppure l'uso del suolo in superficie.
- Dati Idrologici: descrivono le caratteristiche idrologiche del territorio sulla base di indici semplificati come il *TWI* (*Topographic Wetness Index*).

Queste tre categorie di dati costituiscono i PREDITTORI del modello LOGIT ossia quei parametri che posso influenzare la suscettibilità di frana. Ulteriori approfondimenti sono riportati nel rapporto RDS 2022 [30].
Altro dato necessario per poter procedere alla implementazione del metodo è la disponibilità di un dato di censimento spaziale delle frane avvenute in passato. Nel contesto italiano il catalogo IFFI (Inventario Fenomeni Franosi Italiano) è stato preso come riferimento [31]. Il catalogo IFFI fornisce la posizione georeferenziata dei poligoni di frana censiti individuando le aree soggette a frane rispetto a quelle in cui non sono presenti. Tale distinzione permette di individuare le due categorie areali necessarie al modello LOGIT per procedere alla valutazione della suscettibilità.

- Categoria Sito Frana: individuata dalla variabile logistica posta a valore = 1;
- Categoria No Sito Frana: individuata dalla variabile logistica posta a valore = 0.

Sulla base della mappatura IFFI è dunque creata una "mappa logistica" che assume valore 1 in corrispondenza del poligono di frana e 0 altrove. Analogamente a quanto effettuato nel rapporto RDS 2022 [30], anche in questa analisi sono state considerate solamente le frane pluvio-indotte quali Frane Superficiali e *Debris Flow* [31]. Per le Frane Superficiali si intendono frane poco profonde (nell'ordine del metro) che coinvolgono le coltri superficiali di terreno e sono caratterizzate da una ridotta mobilità (come, ad esempio, i *Soil Slips* ed *Earth Flow*, secondo la classificazione di Varnes). I *Debris Flow* (dette anche colate detritiche) interessano invece coltri di terreno caratterizzate da scarsa coesione (depositi incoerenti o sciolti) le quali in condizioni di saturazione si instabilizzano comportandosi come un flusso incanalato e percorrendo distanze significative *(runout*) dal punto di innesco. In condizioni di pendenza e/o saturazione elevate, le Frane Superficiali possono evolvere in *Debris Flow* causando danni significativi alle infrastrutture situate lungo il percorso di propagazione.

3.1.2 [B]: modello LOGIT

Per essere utilizzato, il modello LOGIT necessita della creazione di un database in cui la mappa logistica avente valori 0-1 viene corrisposta ai valori dei PREDITTORI [32]. Questa operazione può essere condotta agevolmente in ambiente *GIS* effettuando un campionamento puntuale random all'interno dell'area di indagine in cui a ciascun punto campionato si associa per posizione il valore della mappa logistica con quello dei PREDITTORI. Per evitare distorsioni nell'analisi di regressione il numero di punti di campionamento deve essere sufficientemente elevato [30]. Nel caso specifico sono stati campionati 1500 punti all'interno di un dominio di circa 1000 km^2.

[1] *Geographic Information System*

Una volta creato il database è possibile applicare il modello LOGIT con le stesse modalità già evidenziate nel rapporto RDS 2022 [30] e qui riportate:

- Il database creato viene separato in maniera casuale in due pozioni. La porzione di *TRAINING* viene utilizzata per la calibrazione dei parametri del modello LOGIT e corrisponde circa al 70%. La porzione di *TEST* pari al 30% viene utilizzata per valutare le performance del modello *LOGIT*.
- Vengono dapprima scelti i PREDITTORI sulla base del test di multicollinearità (*Variance Inflation Factor, VIF*) che permette di escludere quei dati che sono frutto di combinazioni lineari di altri dati. Successivamente, tramite una procedura iterativa, i PREDITTORI vengono combinati al fine di valutare la loro influenza nella regressione *LOGIT*. Questo permette di escludere i PREDITTORI non significativi da quelli importanti riducendo la complessità del modello LOGIT.
- Le stime di performance sono effettuate utilizzando la tecnica *ROC* (*Characteristic Operating Receiver*) sul dataset di *TEST*.

Al termine di questa operazione è possibile ricavare i coefficienti della regressione logistica necessari alla creazione della mappa di suscettibilità. Trattandosi di un modello di regressione, la mappa di suscettibilità è facilmente ricavata in ambiente GIS applicando operazioni matriciali (moltiplicazione, somma etc.) ai PREDITTORI significativi in funzione dei coefficienti del modello.

3.1.3 [C]: mappe di suscettibilità

A partire dalla regressione logistica è possibile ricavare una stima della suscettibilità valutando la probabilità spaziale *P* di innesco frana. Tale probabilità può essere rappresentata in due modi:

- Attraverso la mappa di suscettibilità completa, che individua sull'intero dominio analizzato le aree più o meno propense all'innesco delle frane;
- Attraverso il campionamento della suscettibilità in corrispondenza dei sostegni.

Tra le due mappature, la seconda è sicuramente di più immediata lettura da parte degli *stakeholders* interessati alla valutazione della vulnerabilità della rete elettrica. Essa, infatti, permette di evidenziare immediatamente i sostegni potenzialmente più a rischio frana agevolando la pianificazione di indagini più accurate in loco o la prioritizzazione degli eventuali interventi manutentivi o di mitigazione.

3.2 Ampliamento con dati ad alta risoluzione

In riferimento a quanto riportato nel rapporto RDS 2022 [30], la metodologia è stata ulteriormente ampliata considerando differenti *dataset* di dati. Oltre alle *Slope Units*, che si ricorda rappresentano le unità minime di versante, la metodologia è stata applicata ad un *dataset* di dati ad alta risoluzione utilizzando il modello digitale del terreno a 5 m fornito da Regione Lombardia [33]. Questa scelta è stata effettuata sulla base di alcune considerazioni che qui si riportano:

- Le unità minime di versante sono ricavate tramite un algoritmo automatico e permettono di semplificare la trattazione della suscettibilità accorpando i dati territoriali dei versanti all'interno strutture poligonali [34]. Tale accorpamento si traduce in una "media" delle caratteristiche geo-morfologiche, tematiche e idrologiche locali che tuttavia comportano un degrado dell'informazione primaria. Ad esempio, le pendenze di una porzione di versante, che possono essere fortemente diverse nella zona apicale rispetto a quella basale, sono sostituite da un valore medio. Di conseguenza viene

introdotto involontariamente uno "*smoothing*" del parametro che si può propagare all'interno del modello LOGIT portando a valutazioni errate del predittore.

- Le frane, specialmente quelle pluvio-indotte trattate in questa analisi (frane superficiali e *debris flows*) hanno caratteristiche puntuali / lineari in quanto vanno ad interessare solamente piccole porzioni di territorio [31] [35] [30] [36]. La loro estensione areale è significativamente più piccola della superficie delle *Slope Units*. Per questo motivo le *Slope Units* non sembrano essere molto rappresentative o utilizzabili per questo tipo di fenomeni in quanto approssimano troppo le caratteristiche locali e puntuali del territorio.
- Stesso discorso vale se si considera la dimensione dei sostegni rispetto all'estensione delle *Slope Units*. I sostegni sono rappresentati sul territorio come elementi puntuali per cui associare ad essi una suscettibilità valida per tutta la *Slope Units* di appartenenza è troppo semplificativo [30]. Infatti, localmente le condizioni di suscettibilità potrebbero essere molto differenti rispetto alla "media" di tutto il versante.

A valle di queste considerazioni, l'analisi di suscettibilità è stata condotta parallelamente anche utilizzando i dati ad alta risoluzione ritenuti più rappresentativi delle caratteristiche di suscettibilità locale (Tabella 3.1).

Tabella 3.1 – PREDITTORI utilizzati nelle metdologia relativi alle caratteristiche delle *Slope Units* e ai dati ad alta risoluzione.

Predittori *Slope Units*			Predittori *HighRes*	
Id	Descrizione		Id	Descrizione
slope_aver	Pendenza media		*ELE1*	Elevazione locale
pcurv_aver	Curvatura planare		*SLP1*	*Pendenza locale*
tcurv_aver	Curvatura tangenziale		*TWI1*	*Topographic Wetness Index*
elev_avera	Quota media		*OVF1*	*Overland Flow Distance*
twi_averag	*Topographic Wetness Index*		*TAB_GI*	Indice Geologico
BDRICM_ave	Spessore Terreno		*TAB_SI*	Indice di Copertura del Suolo
CLYPPT_ave	% Argilla Terreno			
SLTPPT_ave	% Limo Terreno			
SNDPPT_ave	% Sabbia Terreno			
D2S_averag	Distanza dai corsi d'acqua			

3.3 Aleatorietà della metodologia

Come accennato precedentemente, la metodologia LOGIT presenta alcuni caratteri di aleatorietà dovuti essenzialmente a due passaggi della procedura:

- La scelta del *database* di partenza contenente il campionamento casuale nel dominio della mappa logistica e dei PREDITTORI. Tale campionamento, essendo *random*, cambia ad ogni esecuzione del comando, generando potenzialmente infinite realizzazioni del database necessario per applicare il modello LOGIT.
- La divisione del *database* di partenza nelle due porzioni *TRAINING* e *TEST* avviene in maniera casuale ad ogni iterazione. Per questo motivo, variando le composizioni di questi due *dataset*, anche il modello LOGIT può subire delle modificazioni specialmente nella determinazione dei coefficienti di regressione.

Per chiarire meglio questi due fatti riportiamo brevemente un esempio in cui, tenendo constante il database di partenza (stesso campionamento spaziale dei punti) ma permettendone una

suddivisione casuale tra *TRAINING* e *TEST*, il modello LOGIT è valutato 3 volte. Si utilizzano i dati ad alta risoluzione per le sole frane superficiali. Si utilizza il software *R*[2] per le elaborazioni statistiche riportando il parametro *VIF*, i coefficienti del modello LOGIT e il parametro di performance *AUC*.

3.3.1 VIF (*Variance Inflation Factor*): multicollinearità

Ripetendo il *test* di multicollinearità tre volte si nota come i risultati siano leggermente diversi (Figura 3.2). In tutti e 3 i casi *VIF* è comunque inferiore a 5 il che indica che non esistono relazioni lineari tra i PREDITTORI adottati [30].

SIMULAZIONE n°1

```
    ELE1     SLP1     TWI1     OVF1   TAB_GI   TAB_SI
2.148732 1.538765 1.755181 1.268225 1.061746 1.986779
```

SIMULAZIONE n°2

```
    ELE1     SLP1     TWI1     OVF1   TAB_GI   TAB_SI
2.272256 1.498069 1.734907 1.292297 1.052343 2.080186
```

SIMULAZIONE n°3

```
    ELE1     SLP1     TWI1     OVF1   TAB_GI   TAB_SI
2.090772 1.446241 1.616535 1.290221 1.078328 1.975010
```

Figura 3.2 – VIF dei PREDITTORI esaminati per le 3 simulazioni condotte.

3.3.2 LOGIT (Modello di Regressione Logistica)

Variando la composione del *dataset* di *TRAINING* anche il modello logistico subisce delle modificazioni:

- I PREDITTORI significativi cambiano sensibilmente ma evidenziando l'elevazione come predittore principale (maggiore è il n° di * e maggiore è significatività del predittore, Figura 3.3).
- I coefficienti di regressione subiscono delle variazioni, anteponendo pesi maggiori o minori in funzione della significatività del singolo predittore (Figura 3.3).

SIMULAZIONE n°1

```
Call:  glm(formula = LOGIT_01 ~ ELE1 + SLP1 + TWI1 + OVF1 + TAB_GI +
    TAB_SI, family = "binomial", data = train_reg)

Coefficients:
(Intercept)         ELE1         SLP1         TWI1         OVF1       TAB_GI       TAB_SI
  0.2771907    0.0007960    0.0130030   -0.1059141   -0.0002345   -0.3651004    0.0222820
```

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  0.3013436  0.8315234   0.362  0.71705
ELE1         0.0008536  0.0001551   5.504 3.72e-08 ***
SLP1         0.0080249  0.0061109   1.313  0.18911
TWI1        -0.0541715  0.0739817  -0.732  0.46403
OVF1        -0.0002316  0.0001120  -2.068  0.03861 *
TAB_GI      -0.3808955  0.1303827  -2.921  0.00349 **
TAB_SI      -0.0347427  0.0750750  -0.463  0.64353
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

[2] *R: software per valutazione statistiche di insiemi di dati.*

SIMULAZIONE n°2

```
Call:  glm(formula = LOGIT_01 ~ ELE1 + SLP1 + TWI1 + OVF1 + TAB_GI +
    TAB_SI, family = "binomial", data = train_reg)

Coefficients:
(Intercept)         ELE1         SLP1         TWI1         OVF1       TAB_GI       TAB_SI
  0.9543405    0.0008071    0.0163616   -0.0360486   -0.0002691   -0.6020346   -0.0185712
```

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  0.9543405  0.8785866   1.086  0.27738
ELE1         0.0008071  0.0001619   4.984 6.22e-07 ***
SLP1         0.0163616  0.0061535   2.659  0.00784 **
TWI1        -0.0360486  0.0777938  -0.463  0.64309
OVF1        -0.0002691  0.0001138  -2.365  0.01805 *
TAB_GI      -0.6020346  0.1348347  -4.465 8.01e-06 ***
TAB_SI      -0.0185712  0.0767079  -0.242  0.80870
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

SIMULAZIONE n°3

```
Call:  glm(formula = LOGIT_01 ~ ELE1 + SLP1 + TWI1 + OVF1 + TAB_GI +
    TAB_SI, family = "binomial", data = train_reg)

Coefficients:
(Intercept)         ELE1         SLP1         TWI1         OVF1       TAB_GI       TAB_SI
  0.9623434    0.0007821    0.0069899   -0.1603447   -0.0002859   -0.3906406    0.0138925
```

```
Coefficients:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  0.9623434  0.8627662   1.115  0.26467
ELE1         0.0007821  0.0001563   5.004 5.62e-07 ***
SLP1         0.0069899  0.0062175   1.124  0.26091
TWI1        -0.1603447  0.0774172  -2.071  0.03834 *
OVF1        -0.0002859  0.0001099  -2.602  0.00928 **
TAB_GI      -0.3906406  0.1327356  -2.943  0.00325 **
TAB_SI       0.0138925  0.0752925   0.185  0.85361
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

Figura 3.3 – Coefficenti e PREDITTORI significativi del modello logistico per le 3 simulazioni condotte.

3.3.3 AUC (*Area Under Curve*): *Performances*

Per quanto riguarda la valutazione delle *performance* tramite le curve *ROC*, si nota come il parametro *AUC* (*Area Under Curve*) non subisce significative variazioni tra un modello logistico e l'altro (Figura 3.7). Questo evidenzia come le variazioni percepite nei coefficienti siano di fatto poco influenti nella definizione della mappa suscettibilità finale. Inoltre, la stabilità delle *performance* è sintomo del fatto che il *database* iniziale è bene condizionato e non presenta all'interno delle distorsioni che possono portare a produrre scenari di suscettibilità non del tutto realistici.

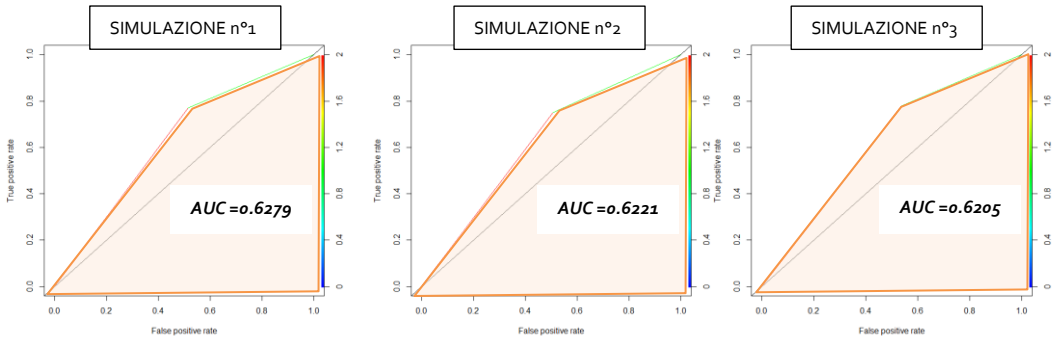


Figura 3.4 – Parametro di *performance* AUC per le tre simulzioni condotte.

3.4 Risultati

Di seguito viene presentata un'analisi statistica condotta tenendo costante il *dataset* di partenza ma effettuando 20 valutazioni ricorsive del modello LOGIT, lasciando la possibilità di separazione casuale dei dati tra *TRAINING* e *TEST* ad ogni valutazione. Sono dunque riportate la distribuzione dei parametri di *performance AUC*, i coefficienti del modello logistico, le mappe di suscettibilità e le statistiche sui sostegni. Tenendo conto della aleatorietà della metodologia, della disponibilità dei dati delle *Slope Units* e dei dati ad alta risoluzione, sono state prodotte le mappe di suscettibilità di frana per due tipologie di dissesti: le frane superficiali (Figura 3.5, Figura 3.6 e Figura 3.7) e i *debris flow* (Figura 3.8, Figura 3.9 e Figura 3.10), seguendo la classificazione IFFI [31].

3.4.1 Statistiche su 20 realizzazioni

SL HighRes

```
    ELE1     TWI1     OVF1   TAB_GI
1.123282 1.190630 1.138692 1.033218
```

SL SlopeUnits

```
elev_avera slope_aver twi_averag BDRICM_ave
  3.603131   1.802468   2.239361   3.611814
```

Figura 3.5 – Analisi di multicollinearità per i PREDITTORI del modello logistico per le frane superficiali. Per i dati ad alta risoluzione ELE1 | TWI1 | OVF1 e TAB_GI sono risultati i predittori più significativi mentre per i dati provenienti dalle *Slope Units elev_avera* | *slope_aver* | *twi_averag* | *BDRICM_ave* sono risultati i predittori più significativi.

SL HighRes

```
Coefficients:
(Intercept)         ELE1         TWI1         OVF1       TAB_GI
  1.9513928    0.0007606   -0.1424375   -0.0002205   -0.5924321
```

SL SlopeUnits

```
Coefficients:
(Intercept)   elev_avera   slope_aver   twi_averag   BDRICM_ave
 -13.489226     0.002214     0.089314     0.615121     0.017385
```

Figura 3.6 – Coefficienti del modello logistico utilizzati per la creazione delle mappe di suscettibilità per le frane superficiali utilizzando i dati ad alta risoluzione e quelli delle *Slope Units*.

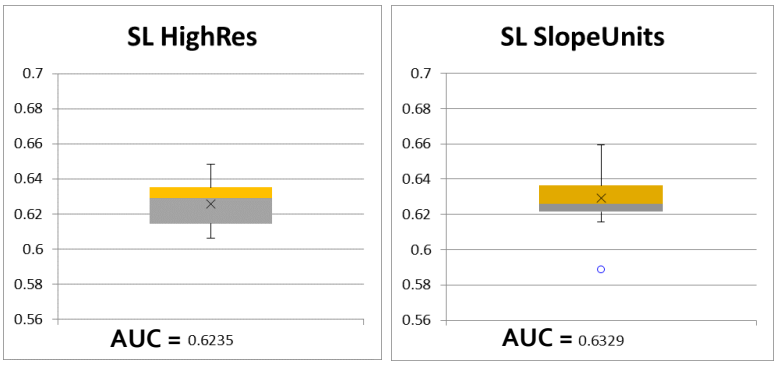


Figura 3.7 – Variazione del parametro AUC considerando 20 valutazioni del modello logistico per le frane superficiali. Si nota una certa stabilità delle performances sia per i dati ad alta risoluzione che per quelli ottenuti dalle *Slope Units*.

DF HighRes

```
    SLP1     OVF1   TAB_SI
1.060594 1.059307 1.004296
```

DF SlopeUnits

```
elev_avera slope_aver pcurv_aver
  1.115828   1.028277   1.141026
```

Figura 3.8 – Analisi di multicollinearità per i PREDITTORI del modello logistico per i *debris flow*. Per i dati ad alta risoluzione SLP1 | OVF1 e TAB_SI sono risultati i predittori più significativi mentre per i dati provenienti dalle *Slope Units elev_avera* | *slope_aver* | *pcurv_aver* sono risultati i predittori più significativi.

DF HighRes

```
Coefficients:
(Intercept)        SLP1        OVF1      TAB_SI
 -1.9357420   0.0417862  -0.0003728   0.3159635
```

DF SlopeUnits

```
Coefficients:
(Intercept)   elev_avera   slope_aver   pcurv_aver
 -4.574e+00    9.014e-04    9.903e-02   -7.746e+02
```

Figura 3.9 – Coefficienti del modello logistico utilizzati per la creazione delle mappe di suscettibilità per i debris flow utilizzando i dati ad alta risoluzione e quelli delle *Slope Units*.

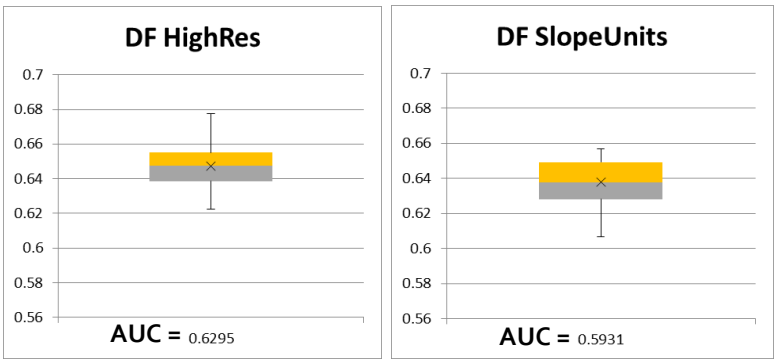


Figura 3.10 – Variazione del parametro AUC considerando 20 valutazioni del modello logistico per i *debris flow*. Si nota una certa stabilità delle *performance* sia per i dati ad alta risoluzione che per quelli ottenuti dalle *Slope Units*, tuttavia, i dati *HighRes* sembrano fornire *performance* migliori.

3.4.2 Mappe di suscettibilità per SL e DF

Di seguito sono riportate le mappe di suscettibilità complete secondo lo schema presentato in Tabella 3.2.

Tabella 3.2 – Schema di presentazione delle mappe di suscettibilità di frana.

Shallow Landslide – High Resolution Dataset	*Shallow Landslide – Slope Units Dataset*
Debris Flow – High Resolution Dataset	*Debris Flow – Slope Units Dataset*

Nelle mappe in Figura 3.12 è riportata la probabilità spaziale *P* secondo la legenda presentata in Tabella 3.2 utilizzando la stessa colorazione al fine di permettere un confronto agevole tra i dati.

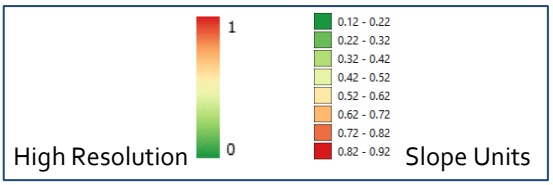


Figura 3.11 – Legende utilizzate nelle mappature di suscettibilità per la variabile P.

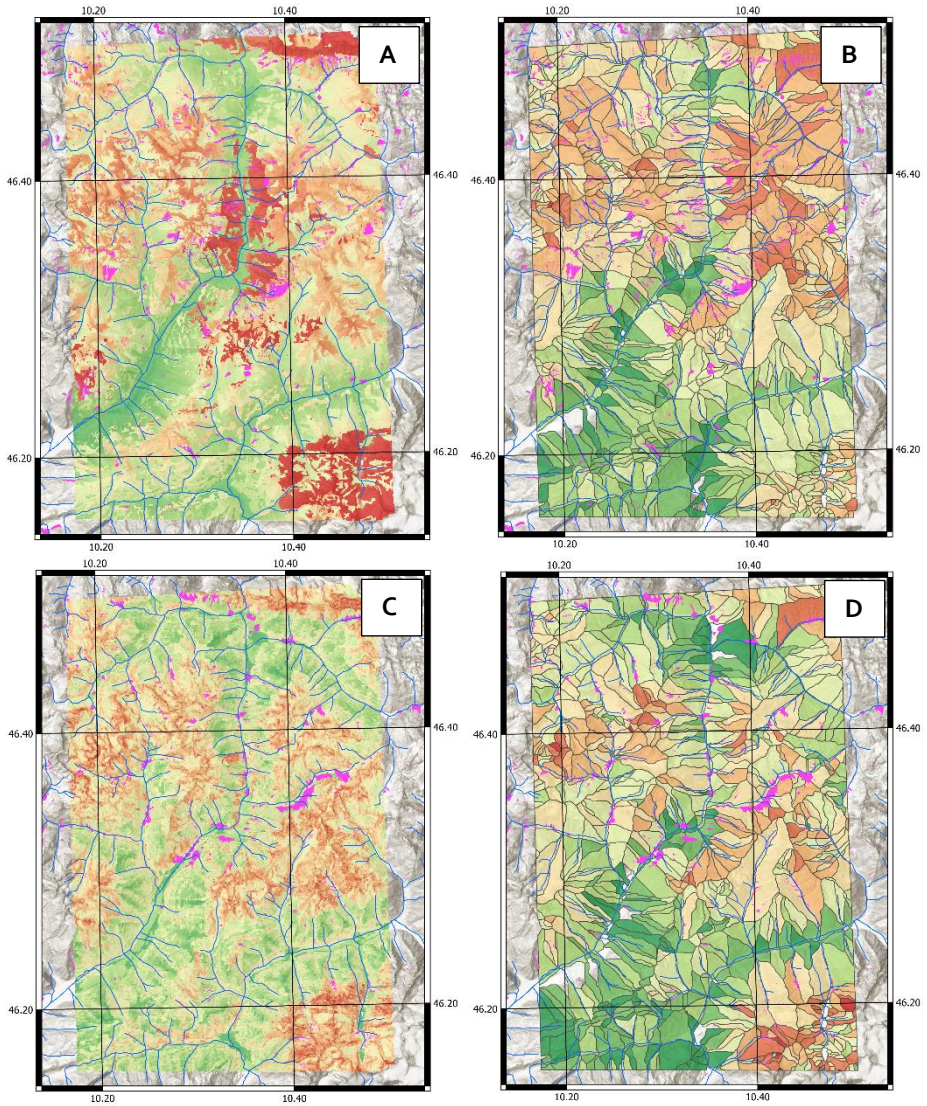


Figura 3.12 – Mappature di suscettibilità per le frane superficiali (A e B) e per *i debris flow* (C e D). In colore fucsia sono mappate le aree in frana riportate nel catalogo IFFI.

3.4.3 Intersezione con la rete elettrica

Sono di seguito rappresentate le statistiche di suscettibilità eseguite sulla rete elettrica di trasmissione presente nell'area. Vengono messi in evidenza i sostegni più a rischio frana per le quattro mappe riportate in Figura 3.13.

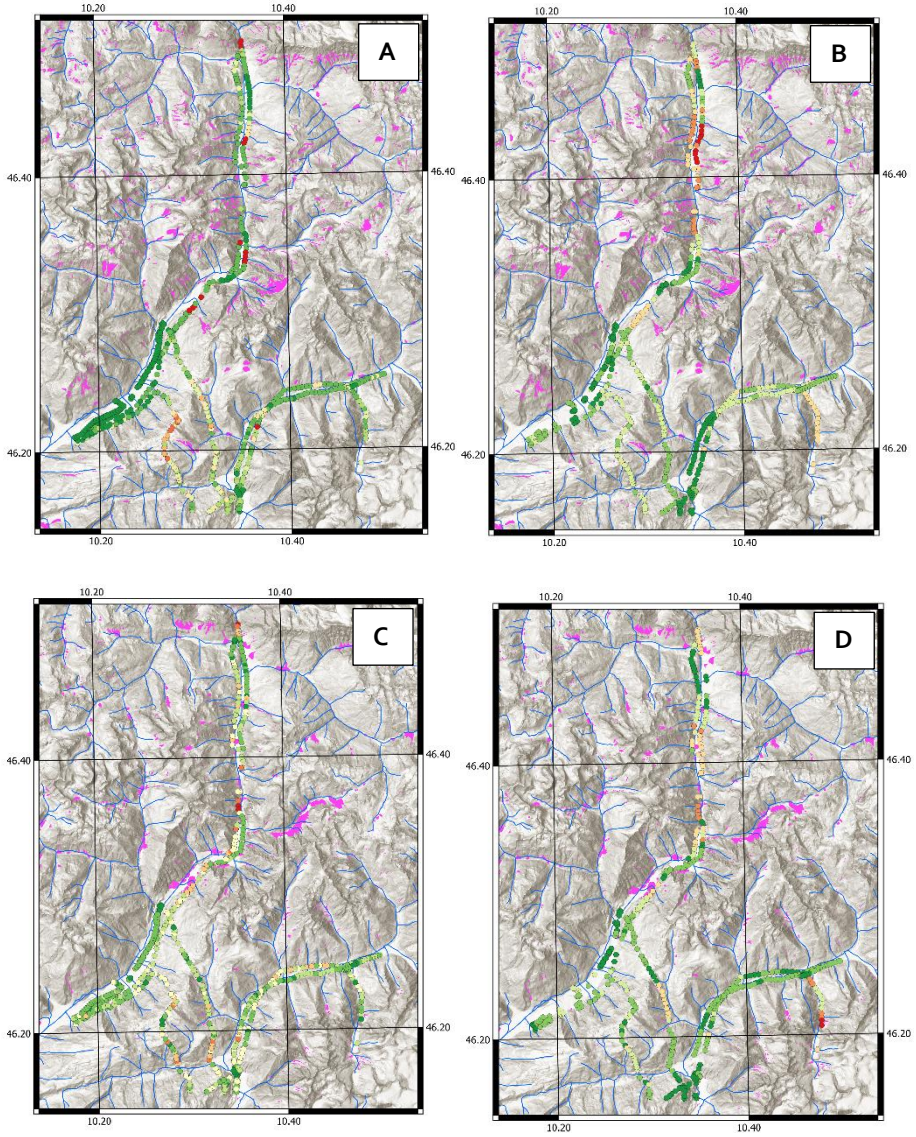


Figura 3.13 – Suscettibilità di frana valutate per frane superficiali (A e B) e per *debris flow* (C e D) in corrispondenza dei sostegni della rete elettrica. Si notano come i tralicci a rischio (rossi) siano posti in aree differenti a seconda della mappatura adottata. In colore fucsia sono mappate le aree in frana riportate nel catalogo IFFI.

Per meglio interpretare i dati contenuti nelle mappe soprastanti, in Figura 3.14 è mostrata una statistica del numero di tralicci ricadenti in un determinato intervallo di suscettibilità. Come si può notare esistono delle differenze sostanziali a seconda del tipo di frana e del tipo di mappatura adottata:

- La gran parte dei sostegni ricade in aree con suscettibilità medio-bassa attorno a valori di P compresi tra 0,2 e 0,3. Questo sembra essere un dato ragionevole in funzione del fatto che anche in aree di montagna, la scelta della posizione dei tralicci è ricaduta in aree tendenzialmente lontane da possibili zone ad elevata pericolosità geo-idrologica.
- Le categorie di suscettibilità in cui ricadono i tralicci ammettono valori più elevati se si utilizzando le mappe ottenute dai dati ad alta risoluzione. In particolare, per le frane superficiali *P* raggiunge valore pari a 0,8 contro i 0,6 delle *Slope Units* mentre per i *debris*

flow P raggiunge valore pari a 0,7 contro i 0,6 delle *Slope Units*. Di conseguenza, i dati ad alta risoluzione sembrano dettagliare meglio la suscettibilità rispetto a quelli "medi" provenienti dalle *Slope Units*, mostrando degli scenari di rischio più critici.

- Le code delle distribuzioni statistiche ricalcano delle funzioni di tipo *log-normale*, abbastanza comuni per la tipologia dei fenomeni naturali analizzati [37]. Tuttavia, utilizzando i parametri medi delle *Slope Units* le distribuzioni diventano molto più simili a funzioni gaussiane, accorciando le code specialmente quella a destra. Viceversa, utilizzando i dati ad alta risoluzione, la coda a destra è molto più pronunciata, evidenziando una probabilità maggiore di avere "valori estremi" di suscettibilità.

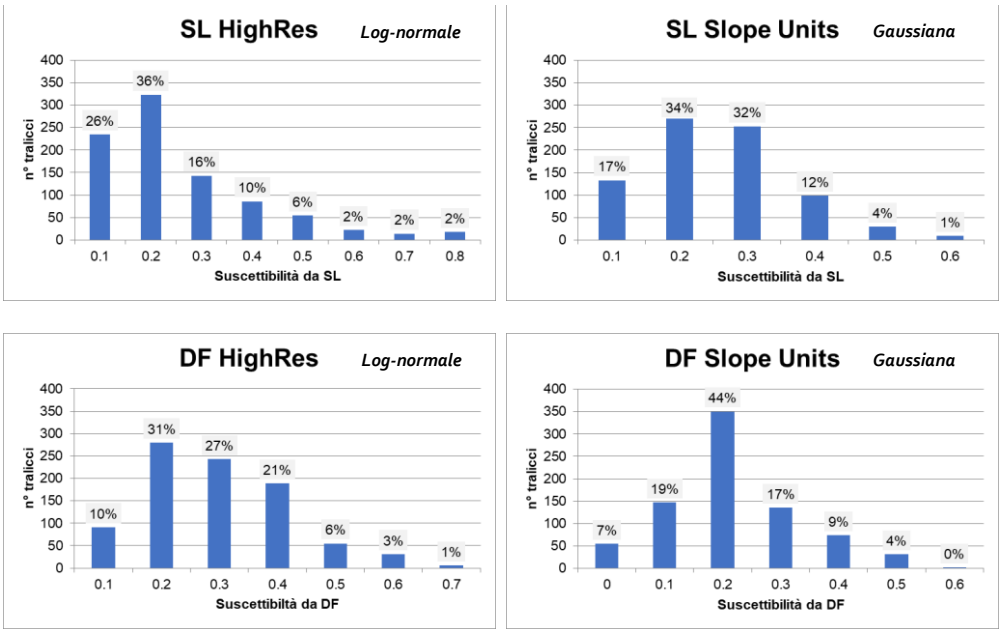


Figura 3.14 – Statistiche sui tralicci effettuate utilizzando diverse mappature di suscettbilità.

A valle dell'analisi condotta si può concludere che, pur utilizzando la stessa metodologia (modello di regressione logistica) i risultati di suscettibilità possono avere diverse gradazioni in funzione della qualità, del numero e della risoluzione dei dati in ingresso (PREDITTORI), dell'accuratezza della mappatura di frana di riferimento e della tipologia di fenomeno franoso considerato (IFFI). Inoltre, gli elementi di aleatorietà insiti nell'approccio metodologico e indagati nei paragrafi precedenti mostrano come il problema esaminato debba essere affrontato da un punto di vista più statistico ragionando in termini di scenari di suscettibilità possibili/probabili.
Seppure le *performance* del modello LOGIT non cambino considerevolmente (AUC attorno a 0.6-0.65), le mappe di suscettibilità ottenute tramite l'utilizzo dei dati ad alta risoluzione sembrano più convincenti ed accurate rispetto a quelle ricavate tramite le *Slope Units*. Le mappe di Figura 3.13 e i grafici di Figura 3.4 confermano questo fatto evidenziando più chiaramente i sostegni soggetti a suscettibilità più elevate. In base alla letteratura esaminata [38] [39] [40] [41] [42] [43], si ritiene che aree di territorio con valori di P maggiori di 0,5 siano da considerarsi critiche. Per queste aree sono generalmente richieste in sito valutazioni della pericolosità da frana più approfondite tramite analisi di dettaglio maggiore.

4 - INTERAZIONE TRA COLATE RAPIDE DI FANGO ED ELETTRODOTTI NELLA REGIONE CAMPANIA

In questa sezione vengono esaminate e censite in dettaglio le colate rapide detritico-fangose per la regione Campania e descritto un diverso approccio metodologico (rispetto a quello riportato nella Sezione 3) per la stima della suscettibilità. In aggiunta viene effettuata un'analisi sui possibili effetti sugli elettrodotti presenti sul territorio della regione. Il lavoro qui presentato è frutto della collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA) dell'Università di Napoli "Federico II" (di seguito UNINA).

Le colate rapide detritico-fangose costituiscono una tipologia di frana ampiamente diffusa in tutto il territorio nazionale. Diversi sono i fattori che hanno portato alla scelta della Regione Campania come area target per la valutazione della pericolosità da frana:

- Presenza di un assetto geologico/geomorfologico diversificato, scarpate sub-verticali e presenza di rilievi montuosi meno acclivi, versanti a franapoggio ricoperti di terreni quaternari, spesso non consolidati o non addensati (contesti carbonatici e vulcanici, con terreni di copertura diversificati, da grossolani e detritici a fini e argillosi, con una sostanziale differenza nella generazione, sviluppo ed evoluzione dei fenomeni franosi).
- Elevata pericolosità idrogeologica, evidenziata da fenomeni franosi e alluvionali recenti.
- Presenza di un sistema di faglie con pericolosità potenziale rilevante, già evidenziata da eventi tellurici catastrofici del passato (Sistema di Faglie dell'Irpinia).
- Sismicità storica rilevante con numerosi effetti sulla franosità sismoindotta.
- Elevato valore esposto ed urbanizzazione diffusa.

La collaborazione con UNINA è attualmente in corso ed è stata articolata in due Fasi distinte: la *Fase I* ha visto per l'annualità 2023 l'analisi di suscettibilità delle colate rapide (*Debris Flow*) mentre la *Fase II* prevista per il 2024 sarà dedicata alle frane a cinematismo lento (*Slides*). In questo rapporto si riportano una sintesi delle attività e dei risultati relativi alla Fase I di lavoro, e descritta con maggior dettaglio dal DICEA nel Rapporto Tecnico "*Definizione della suscettibilità a franare (colate rapide di fango) in aree di versante con presenza di elettrodotti"* (si rimanda all'Allegato 2 per maggiori dettagli; Prot. 23012219). L'intero studio è stato prodotto in ambiente GIS, per cui sono disponibili i dati in formato *shapefile* con *database* associato.

4.1 I fenomeni di dissesto geo-idrologico in Campania

Le frane rappresentano una tipologia di dissesto geo-idrologico molto diffuse in tutto il territorio campano. Tra le tipologie contemplate nella classifica di Varnes (1978) [44] e di Cruden & Varnes (1996) [45] quelle a cinematismo veloce creano scenari di alto rischio (frane da crollo e colate rapide di fango) per le quali spesso è difficile poter prevedere sistemi di *early warning*. Le colate rapide di fango sono tipiche del settore occidentale della Regione Campania, laddove i rilievi ad elevata pendenza (vulcani e massicci carbonatici) sono ricoperti da 1-3 metri di depositi piroclastici sciolti. A causa di intense precipitazioni, tali terreni possono saturarsi e perdere le loro proprietà di resistenza al taglio con conseguente innesco di frane molto veloci (colate rapide di fango) che possono coinvolgere elevati volumi di materiale (decine di migliaia di m^3). Per le frane da colata rapida l'instabilità è in gran parte di tipo gravitativa, soprattutto nella fase di innesco che si verifica a seguito di saturazione dei terreni più superficiali. Per questi motivi, un'alta percentuale del territorio campano risulta frequentemente interessata da fenomeni alluvionali torrentizi e da frane. Esempi si rinvengono nel Salernitano, in Irpinia e nel Sannio alle falde dei principali massicci montuosi (Monti Lattari, Monti Picentini, Monti della Maddalena, ecc.). L'elevata urbanizzazione, poi, incide in maniera rilevante sulla presenza diffusa di situazioni di alto rischio che coinvolgono strutture e infrastrutture presenti sul territorio.

Le caratteristiche salienti dei fenomeni di colata detritica relativamente al contesto della regione Campania sono i seguenti:

- da un punto di vista geotecnico, si registra una maggiore propensione all'innesco per le coltri di versante costituite da vulcanoclastiti che presentano una granulometria limoso-sabbiosa con ghiaia (pomici, sabbie e cineriti da caduta in giacitura primaria), una componente cineritica non alterata, coesione nulla, bassi valori di densità.
- da un punto di vista geomorfologico, è possibile distinguere due tipologie di versanti (generalmente tipici dei contesti carbonatici) su cui le frane da colata possono impostarsi ovvero: versanti planari non incisi (con una tipica morfologia sub-triangolare - *debris avalanches*); e versanti incisi con bacini idrografici poco gerarchizzati [46] [47], in cui si registrano frane incanalate [48] (Figura 4.1). Nel caso delle colate incanalate, maggiore è il dislivello, maggiore è la velocità ed il *runout* che le caratterizza. Le frane sub-triangolari evolvono con dinamiche simili alle valanghe. Questa tipologia di frana ha, rispetto alle incanalate, un minore *runout*.
- in condizioni geologico-strutturali particolari come, ad esempio, in presenza di depositi piroclastitici sovrapposti a rocce lapidee, le colate detritiche possono verificarsi anche in condizioni di non completa saturazione dei terreni. Esse possono anche innescarsi a seguito di sollecitazioni sismiche generando di fatto fenomeni franosi sismoindotti.

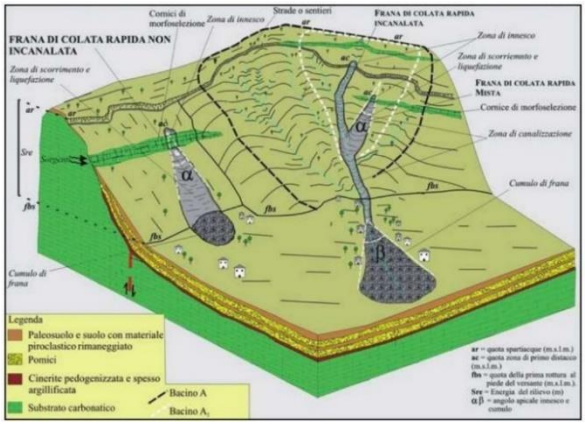
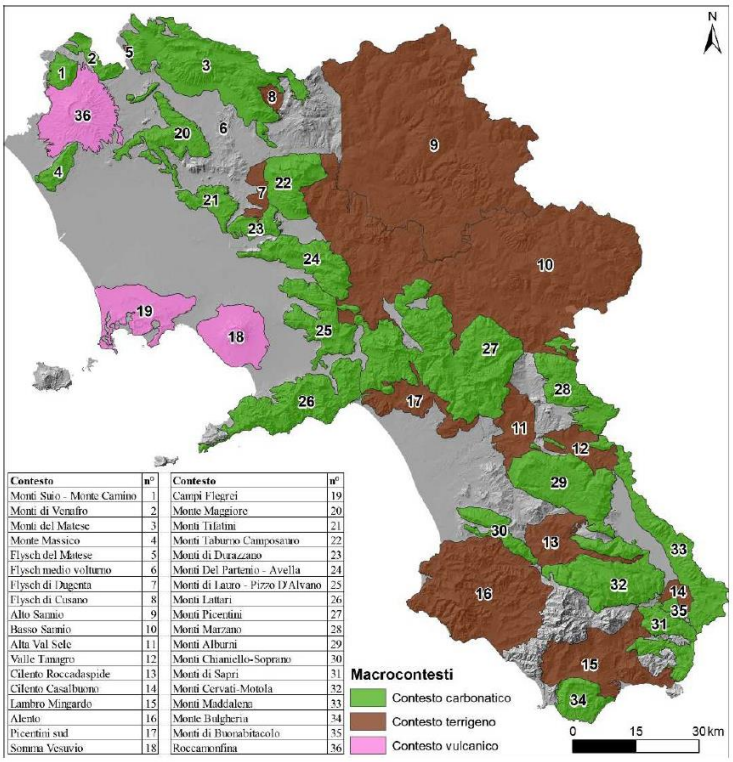


Figura 4.1 – Frane da colata rapida incanalate e non incanalate (da [49]).

Le frane da colata rapida di fango possono arrecare seri danni ai centri abitati come nell'evento di Sarno del 1998 e Casamicciola Terme del 2022 coinvolgendo le infrastrutture elettro-energetiche. Infatti, la loro dinamica è caratterizzata da più fasi che evolvono molto velocemente nel tempo, coinvolgendo man mano volumi sempre maggiori. Nello specifico degli elettrodotti, le situazioni di maggiore criticità sono quelle in cui i tralicci sono localizzati a mezza costa sul versante (settori di transito di una colata) oppure nella zona pedemontana (settore di accumulo di una colata).

4.2 Approccio metodologico per la stima della suscettibilità da frana in Campania

Lo studio per l'intera Regione Campania è stato condotto a partire da una suddivisione del territorio in tre macrocontesti differenti (Carbonatico, Vulcanico e Terrigeno) a cui si riferiscono 36 contesti territoriali sulla base delle caratteristiche litologiche dell'area (Figura 4.2). Alle mappe litologiche è stato sovrapposto un *database* caratterizzato da 13305 punti che rappresentano i tralicci di alta tensione attualmente presenti sul territorio regionale.



Contesto	n°	Contesto	n°
Monti Suio - Monte Camino	1	Campi Flegrei	19
Monti di Venafro	2	Monte Maggiore	20
Monti del Matese	3	Monti Tifatini	21
Monte Massico	4	Monti Taburno Camposauro	22
Flysch del Matese	5	Monti di Durazzano	23
Flysch medio volturno	6	Monti Del Partenio - Avella	24
Flysch di Dugenta	7	Monti di Lauro - Pizzo D'Alvano	25
Flysch di Cusano	8	Monti Lattari	26
Alto Sannio	9	Monti Picentini	27
Basso Sannio	10	Monti Marzano	28
Alta Val Sele	11	Monti Alburni	29
Valle Tanagro	12	Monti Chianiello-Soprano	30
Cilento Roccadaspide	13	Monti di Sapri	31
Cilento Casalbuono	14	Monti Cervati-Motola	32
Lambro Mingardo	15	Monti Maddalena	33
Alento	16	Monte Bulgheria	34
Picentini sud	17	Monti di Buonabitacolo	35
Somma Vesuvio	18	Roccamonfina	36

Figura 4.2 – Suddivisione della Campania in macrocontesti e contesti territoriali (da Allegato 2).

Nel caso dei contesti carbonatici e vulcanici, in tutti i settori a suscettibilità/pericolosità elevata dal Piano per l'Assetto Idrogeologico - PAI, ogni versante è stato suddiviso su base geomorfologica in funzione del possibile innesco di una frana incanalata o sub-triangolare. Inoltre, per stabilire l'interazione tra frane e rete esistente, si è ipotizzata una frana di progetto con criterio geomorfologico sulla base dell'esperienza maturata dal DICEA dallo studio di circa 300 colate rapide avvenute in Campania [50] [49] [47] [46] [51] [52] [53] [54] [55]. È stata evidenziata, inoltre, anche la possibile interazione di fenomeni alluvionali torrentizi con la rete in aree di conoidi alluvionali attivi. Altro aspetto importate è stato quello di mettere in evidenza eventuali situazioni di criticità (dovuta al posizionamento del traliccio nei pressi di un impluvio o alla base di un versante regolare con energia di rilievo elevata), ma anche quelle prive di una pericolosità oggettiva (nel caso di tralicci localizzati in zone di spartiacque/displuvio o zone distali).
Successivamente, per ogni elemento in cui si sia rilevata l'interazione tra traliccio e frana, sono state stimate alcune grandezze utili a prevedere scenari di impatto più o meno critici, tra le quali:

1) i tiranti massimi di fango e detrito che potrebbero impattare sull'opera, espressi in (m);
2) la velocità media del flusso detritico-fangoso, espresso in (m/s);
3) il volume della potenziale frana (intendendo quello relativo all'intera frana di progetto), espresso in (m^3).

Per quanto riguarda le velocità di impatto sono stati considerati tre intervalli (Figura 4.3): $v < 10$ m/s; $10 < v < 25$ m/s e $v > 25$ m/s. Ognuno di essi è tipico di una ben definita zona di versante. I valori più alti con $v > 25$ m/s si riferiscono ai settori di transito ed incanalamento della colata generalmente posti in prossimità della rottura di pendenza posizionata al piede del versante e allo sbocco degli impluvi; i valori medi, invece, ($10 < v < 25$ m/s) sono tipici del settore di innesco della frana, che corrisponde alla parte sommitale del versante. Infine, le velocità più basse ($v < 10$ m/s) sono tipici della parte terminale dell'accumulo in prossimità del conoide di deiezione.

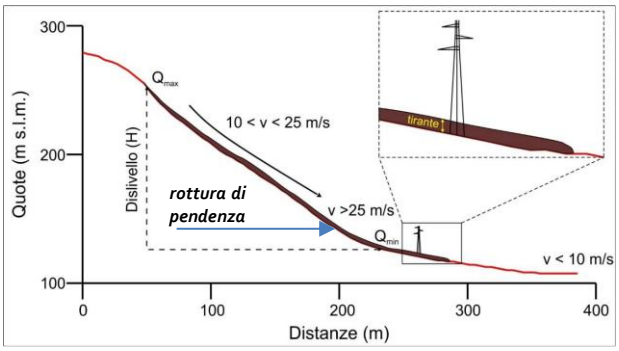


Figura 4.3 – Esempio di una frana che impatta su un traliccio con indicazione delle velocità e del tirante (da Allegato 2, prot: 23012219).

Utilizzando la relazione esistente tra energia di rilievo della frana potenziale e l'area coinvolta riportata in [51], sono stati calcolati i volumi di frana (m^3) che potrebbero avere effetti distruttivi sui tralicci. L'energia di rilievo della frana potenziale che potrebbe innescarsi in corrispondenza di una porzione di versante, indicata con H (m), è calcolata come differenza tra la quota massima dell'area di innesco e la quota della rottura di pendenza presente alla base del versante. Tale punto è scelto come riferimento in quanto si presume che la colata inizi a perdere velocità, rallentando e depositando il materiale trasportato. Secondo le relazioni mostrate in Tabella 4.1 è possibile calcolare la probabile estensione di una frana A (m^2) in funzione di H.

Tabella 4.1 – Relazioni tra energia di Rilievo H ed estensione della potenziale frana A [51].

Contesto Carbonatico (versanti incisi)	$A = \left(H/_{10.707}\right)^{1/0.3326}$
Contesto Carbonatico (versanti regolari)	$A = (H - 60.611)/_{0.007}$
Contesto Vulcanico Flegreo	$A = (H - 50.438)/_{0.0173}$

La stima dei volumi mobilitabili avviene, infine, moltiplicando l'estensione della potenziale frana A con lo spessore delle coperture piroclastiche mobilitabili sul versante h_{prc} (m). Quest'ultimo parametro viene stimato a partire dalle carte degli spessori della copertura piroclastica esistenti. Queste stime sono state inserite all'interno dei campi associati ad ogni singolo traliccio esaminato e racchiuse in un file vettoriale di tipo shapefile consultabile in qualunque applicazione GIS. La Tabella 4.2 mostra i campi del file vettoriale contenente tutte le informazioni definite per ogni singolo traliccio.

Tabella 4.2 – Informazioni definite per ogni singolo traliccio analizzato (da Allegato 2).

ID traliccio	numero progressivo da 1 a 13305
Contesto territoriale	indicazione del contesto (tra i 36 individuati) in cui il traliccio ricade
Elaborato (SI/NO):	se il traliccio è localizzato esternamente ad uno dei 38 contesti territoriali in quanto se ubicato in area di pianura alluvionale non è stato elaborato.
Interessato (SI/NO):	indicazione dell'esistenza di interazione tra il traliccio ed un potenziale fenomeno da frana o alluvionale torrentizio.
Settore geomorfologico:	indicazione, ove significativo del settore geomorfologico su cui insiste il traliccio (crinale/spartiacque; settore distale, base versante, versante, versante alto, conoide apicale, conoide distale, conoide mediale, impluvio)
Tipo fenomeno:	indicazione del fenomeno che può avere effetti sul traliccio (frana incanalata, frana sub-triangolare, fenomeno alluvionale torrentizio)
Criticità:	eventuale situazione di particolare criticità dovuta al posizionamento del traliccio nei pressi di un impluvio o alla base di un versante regolare con energia di rilievo elevata.
Velocità media	indicazione della velocità media del flusso detritico-fangoso che potrebbe impattare sul traliccio. In particolare, valori di velocità < 10 km/h sono stati associati ai punti posti in aree distali rispetto alla rottura di pendenza, valori di velocità > 25 km/h sono stati attribuiti ai punti posti nella parte bassa del versante ed immediatamente a valle della rottura di

	pendenza, mentre velocità comprese tra 10-25 km/h attribuite ai punti ubicati nel settore medio-alto del versante.
Quota massima	indicazione della quota massima di un potenziale innesco di una frana da colata rapida dedotta dalla consultazione del PAI, ed utile per il calcolo dei volumi.
Quota minima:	indicazione della quota minima utile alla formulazione dei volumi. Il valore è relativo alla quota del traliccio se posto a monte della rottura di pendenza del versante; è relativo alla rottura di versante se il traliccio è posizionato a valle di essa
Dislivello (H):	indicazione dell'energia di rilievo della potenziale frana di progetto, calcolata dalla differenza tra quota massima e quota minima.
Area potenziale	indicazione dell'area potenziale della frana di progetto
Tirante massimo	indicazione del tirante massimo del flusso detritico-fangoso che può impattare il singolo traliccio
Volume medio	indicazione del volume medio relativo alla frana di progetto calcolato dal prodotto tra l'area potenziale ed il tirante massimo.

Dall'analisi effettuata per la Regione Campania risulta che il 18,4% dei tralicci analizzati (521 su 2835) sono suscettibili al possibile impatto di un eventuale fenomeno di colata detritica (Tabella 4.3 e Figura 4.4) di cui ben il 76.4% ricade nella tipologia di colata rapida sub-triangolare. Gli eventi di dissesto sono localizzati principalmente in corrispondenza dei rilievi denominati Monti Lattari, Monti Picentini, Monte Matese e Monti di Avella – Pizzo d'Alvano. Si sottolinea che dei 521 tralicci potenzialmente interessati da frane, 347 sono situati in aree dove c'è un potenziale pericolo di frana caratterizzata da valori di tiranti maggiori di 1 metro e velocità maggiori di 10 m/s e di questi solo una piccola percentuale ricade in aree con tiranti maggiori di 2 metri e velocità superiori di 25 m/s che rappresentano quindi le situazioni più critiche dove le strutture potrebbero cedere a causa dell'impatto.
Un approfondimento di queste analisi è riportato nell'Allegato 2 del presente rapporto nel quale sono evidenziate le situazioni più critiche per i tralicci, corredate anche da documentazione fotografica relativa ad eventi storici passati. A conclusione dello studio condotto in collaborazione con UNINA, è possibile evidenziare come gli elettrodotti più vulnerabili alle colate detritiche sono quelli costituiti da tralicci costruiti in prossimità di impluvi (sede di potenziali colate incanalate) oppure situati a mezza costa in corrispondenza di versanti molto pendenti e con spessori consistenti di depositi piroclastici in quanto (sede di potenziali colate sub-triangolari).

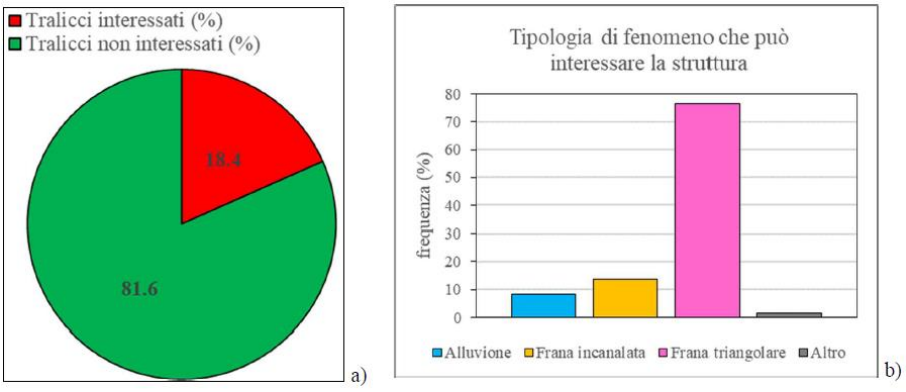


Figura 4.4. – Frequenza (%) dei tralicci interessati e non interessati da un fenomeno alluvionale torrentizio o da frana (a) e frequenza (%) del tipo di fenomeno esaminato (alluvione, frana di colata incanalata, frana di colata triangolare e altro) (b) (da Allegato 2).

Tabella 4.3 – Risultati principali ottenuti dallo studio dei tralicci localizzati nei contesti vulcanici e carbonatici.

Contesto	Macrocontesto	Tralicci esaminati	Tralicci interessati	Tralicci non interessati	Tipologia fenomeno				Situazione di criticità
					Alluvionale torrentizio	Frana incanalata	Frana triangolare	Altro	
Mti di Buonabitacolo	C	18	1	17			1		
Campi Flegrei	V	148	12	136			10	2	1
Mte Maggiore	C	39	5	34		1	4		
Mte Marzano	C	6		6					
Mte Massico	C	52	3	49			3		
Mte Matese	C	340	62	278	16	3	43		3
Mti Alburni	C	70	7	63		3	4		
Mti Cervati - Motola	C	40		40					
Mti della Maddalena	C	217	21	196	12	1	6	2	4
Mti di Sapri	C	100	13	87		2	11		1
Mti di Venafro	C	33	8	25		4	4		
Mti Durazzano	C	105	22	83		1	21		
Mti Lattari	C	632	170	462	6	19	142	3	25
Mti Lauro - Pizzo d'Alvano	C	148	40	108		1	39		3
Mti Marzano	C	33		33					
Mti Partenio-Avella	C	111	31	80		10	21		6
Mti Picentini	C	257	92	165	4	21	65	2	13
Mti Picentini sud	C	210	7	203			7		
Mti Suio e Camino	C	47	9	38		1	8		
Mti Taburno-Camposauro	C	94	18	76	5	4	9		2
Mti Tifatini	C	32		32					
Roccamonfina	V	65		65					
Vesuvio	V	38		38					
Totale (n°)		2835	521	2314	43	71	398	9	58
Totale (%)			18.4	81.6	8.3	13.6	76.4	1.7	2.05

5 - CENNI SULLA VULNERABILITÀ SISMICA DELLE STRUTTURE E INFRASTRUTTURE DEL SEE

La vulnerabilità, in questo caso riferita alle componenti strutturali e non strutturali del sistema elettrico, può essere espressa attraverso curve di fragilità, le quali possono essere ottenute sia per mezzo di prove sperimentali o attraverso studi di modellazione numerica. La fragilità esprime la probabilità di superamento di un prescritto stato limite (p.e. quello del collasso) di un sistema in funzione di un parametro caratteristico d'intensità dell'azione sismica. In questo modo è possibile definire scenari di danno possibili e, quindi soluzioni migliorative da introdurre nella programmazione e pianificazione di piani di intervento e di gestione territoriale, in condizioni ordinarie e, soprattutto, straordinarie.

Come già descritto nel precedente Rapporto di RdS del 2022 [1] la regione Campania è caratterizzata da una forte presenza del patrimonio strutturale e infrastrutturale del settore elettro-energetico nazionale. In particolare, sono presenti 166 cabine primarie, 10.889 tralicci, 17 grandi dighe, 135 campi fotovoltaici, e 1.183 aerogeneratori [1] (Figura 5.1). Molte di queste si trovano nell'area dell'Irpinia caratterizzata da una pericolosità sismica da alta a molto alta e oggetto degli studi specifici di sismologia computazionale presentati nella precedente sezione (Sezione 2). Come si può osservare da Figura 5.1 numerose cabine primarie e un grande parco eolico sono presenti proprio sulla sorgente sismogenetica che ha generato il terremoto di Mw 6,9 del 1980. La vulnerabilità di componenti importanti delle cabine primarie quali trasformatori di tensione e di corrente è stata analizzata in dettaglio nel precedente triennio di Ricerca di Sistema [2] [3], per questo motivo di seguito si focalizzerà l'analisi solo sugli aerogeneratori.

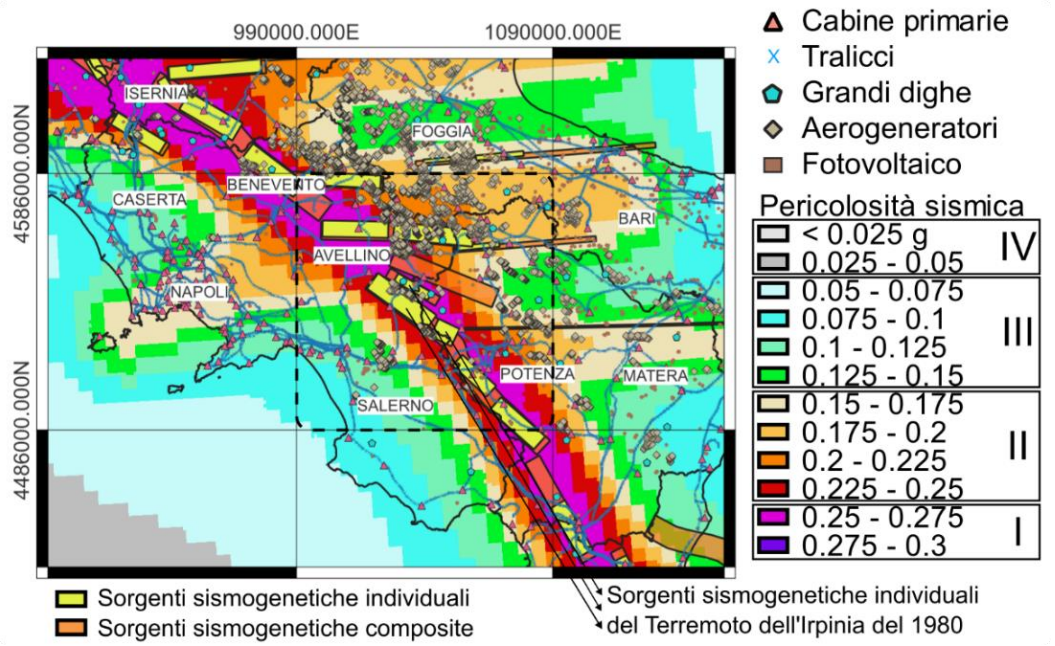


Figura 5.1 – Mappa della pericolosità sismica e distribuzione di cabine primarie, tralicci, grandi dighe, aerogeneratori e fotovoltaico sull'area di studio. Sono inoltre riportate le sorgenti sismogenetiche e composite. In tratteggio è riportato il perimetro dell'area in cui sono effettuate le simulazioni numeriche del Terremoto dell'Irpinia del 1980 (elaborazione RSE con dati di pericolosità e delle sorgenti sismiche da INGV [56] [14]).

Un aerogeneratore (o turbina eolica) è una struttura alta e stretta con una massa concentrata al suo *top* (come un pendolo invertito); per questo motivo può essere soggetto a deformazioni indotte da carichi orizzontali derivanti per esempio dal vento o dalle eccitazioni sismiche. Dal

lavoro di *review* effettuato da [57], e dal quale sono tratte parte delle informazioni di seguito riportate, si evince che per lo meno fino a qualche anno fa, la comunità ingegneristica ha avuto una prevalente opinione sul fatto che il carico sismico avesse una rilevanza limitata sulle turbine eoliche soprattutto se paragonato al carico legato al vento. Il motivo era legato al limitato numero di aerogeneratori danneggiati a seguito di grandi terremoti (p.e. i terremoti di *North Palm Spring*, in California del 1986 e quello di Tohoku del 2011 in Giappone). Infatti, il lungo periodo di vibrazione solitamente individuati per le normali strutture di sostegno delle turbine eoliche (p.e. da 1,5 s sino a 12 s), corrisponde alla parte di *strong motion* di terremoti di bassa intensità (Figura 5.2). Quindi la struttura è parzialmente "autoisolata" dalla parte più distruttiva delle eccitazioni del terremoto. Questi aspetti potrebbero tuttavia far pensare, in maniera errata, che le turbine eoliche possano essere considerate come delle strutture antisismiche, sottovalutando così il rischio senza approfondite valutazioni sulle effettive prestazioni sismiche. Di seguito vengono elencati i principali motivi per cui il rischio sismico degli aerogeneratori non debba essere sottovaluto:

- In primo luogo, rispetto alle considerazioni fatte in precedenza, solo negli ultimi anni c'è stata una diffusione notevole di grandi parchi eolici in zone ad elevata pericolosità sismica, per questo motivo le statistiche di cui sopra ormai non sono molto rappresentative;
- in aggiunta, se si ragiona solo in termini di singole unità, effettivamente in caso di forte terremoto, la vulnerabilità di un aerogeneratore può essere considerata bassa; ma se si considera poi un parco eolico che contiene numerose strutture costose, il rischio totale aumenta per le conseguenze significative (per esempio perdite economiche) derivate proprio da una modalità di guasto comune delle singole unità.
- Danni locali in aree critiche di una turbina eolica, quali la torre di sostegno o la struttura di fondazione, sottoposta alle sollecitazioni sismiche, possono essere dannosi per l'intera integrità del sistema infrastrutturale [57].

Per le considerazioni fatte fin qui, si evince dunque che la vulnerabilità sismica degli aerogeneratori non debba essere sottovalutata e la valutazione del rischio dovrebbe essere effettuata in modo integrato (per esempio riferendosi ad un parco eolico) e non come esposizione isolata di ogni singolo elemento.

Un aspetto molto importante da considerare riguarda poi gli effetti dell'interazione suolo-struttura, che recenti studi hanno dimostrato essere di primaria importanza per la risposta dinamica di un sistema strutturale così sottile come la turbina eolica [57]. Entrando nello specifico, sia le forme modali che le frequenze naturali di un aerogeneratore possono essere modificate a causa dell'interazione suolo-struttura, la quale influenza anche lo smorzamento complessivo del sistema dipendendo principalmente dalle proprietà delle fondazioni e dall'altezza della turbina [58].

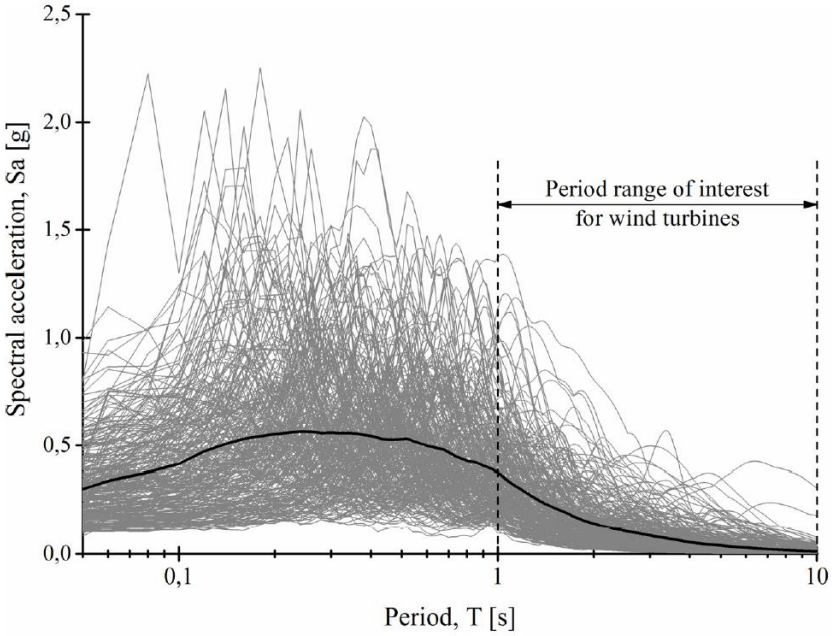


Figura 5.2 – Spettro di risposta elastico di 300 movimenti sismici selezionati tenendo conto di diverse caratteristiche sia sismologiche (magnitudo del terremoto, distanza sorgente-sito, ecc.) che parametri di *strong motion* del terremoto (ampiezza, durata, contenuto di frequenza (da [57]).

Nel lavoro di [59] è stata effettuata un'analisi di risposta *multi-hazard* nel dominio del tempo di una turbina eolica offshore di 5 MW attraverso l'utilizzo di un codice aeroelastico. È stato dimostrato che la domanda strutturale (definita in termini di deflessioni della sommità della torre e del momento base) era guidata primariamente dalle eccitazioni sismiche, mentre il carico ambientale (vento e onde) contribuisce in modo significatamene minore. Figura 5.3 mostra l'analisi di *fragility* condotta sulla base dei risultati delle analisi numeriche considerando tre scenari: OS1 (turbina in movimento), OS2 (arresto in emergenza), OS3 (turbina eolica ferma). La turbina eolica ferma è risultata essere quella meno vulnerabile al pericolo sismico rispetto agli altri due scenari caratterizzati da vulnerabilità quasi identica. Dalle curve di fragilità si può inoltre osservare che è molto probabile che le apparecchiature sensibili presenti nella navicella possano subire danni anche per intensità sismica da bassa a moderata (Sa(T1)=0,25 g).

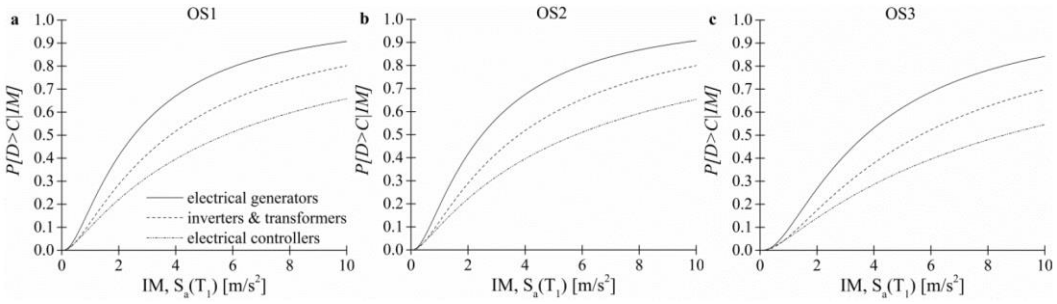


Figura 5.3 – Curve di fragilità in termini di capacità basata sull'accelerazione delle apprecchiature contenute nella navicella della turbina a vento e per tre scenari: OS1 (turbina in movimento), OS2 (arresto in emergenza), OS3 (turbina eolica ferma; da [59]).

In un altro interessante lavoro [60] basato sul calcolo della *fragility* di una turbina da 2,4 MW alta 80 m è stata sottolineata l'importanza del tipo di terreno sul quale le turbine eoliche sono situate. Infatti, la *fragility* è più alta per terreni soffici rispetto a quelli rigidi. Inoltre, le analisi hanno

mostrato che la vulnerabilità è anche dipendente dal *design* specifico degli aerogeneratori, anche se caratterizzati dalla stessa altezza. Considerando infatti due turbine eoliche prodotte da due diverse compagnie e aventi la stessa altezza ma differente capacità, geometria della torre di supporto e tipo di acciaio utilizzato, l'accelerazione di picco del suolo può differire di circa il 16% [60].

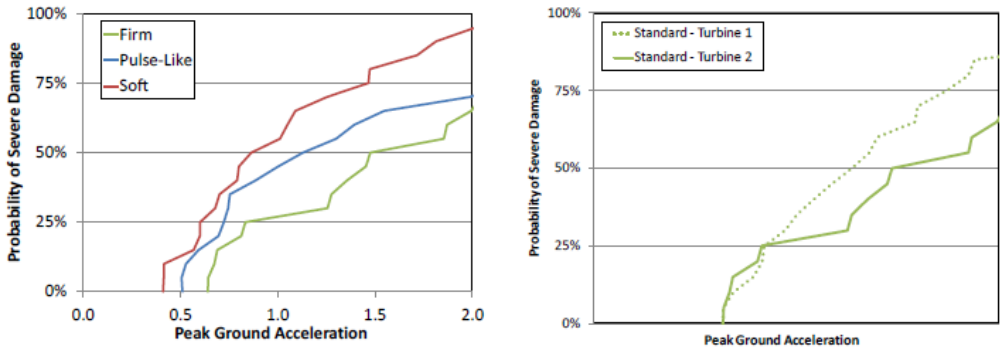


Figura 5.4 – Curve di fragilità per una turbina eolica da 2,4 MW alta 80 m e considerando diversi tipi di suolo (a sinistra). Curve di fragilità per due diversi aerogeneratori (di stessa altezza) soggetti agli stessi *ground motion* (a destra) (da [60]).

Questa prima analisi sulla vulnerabilità degli aerogeneratori proseguirà nella prossima annualità. Insieme alle valutazioni di pericolosità ed esposizione si cercherà infine di dare una stima del rischio sismico di queste strutture nell'area di studio considerata.

6 - CONCLUSIONI

L'attività di ricerca nel 2023 è stata rivolta alla valutazione della pericolosità sismica e da frana attraverso la realizzazione di analisi alla scala regionale. I risultati principali fin qui ottenuti sono di seguito descritti.

Per quanto riguarda lo studio delle forzanti sismiche è stato costruito un modello numerico 3D per simulare la propagazione delle onde sismiche nell'area dell'Irpinia. Il modello numerico è stato verificato attraverso simulazioni numeriche indipendenti e validato sulla base delle registrazioni disponibili. È stata effettuata una massiccia analisi numerica parametrica per controllare la sensitività di diversi parametri *input*, riguardanti sia la sorgente che i modelli di velocità del sottosuolo, sui risultati simulati. Nonostante alcune semplificazioni fatte sino ad adesso, i risultati delle simulazioni numeriche che hanno riprodotto il terremoto dell'Irpinia di Mw 6,9 del 1980, sono in buon accordo con le osservazioni, sia nel dominio del tempo che nel dominio spettrale. Un buon accordo è stato raggiunto inoltre nei valori di picco, nella durata e nel contenuto in frequenza. Il campo di velocità dell'onda sismica a diversi istanti temporali e la distribuzione spaziale dei valori di picco (nelle gamme di alta e bassa frequenza) mostrano un modello realistico ed evidenziano caratteristiche di direttività della sorgente nelle direzioni Nord e Nord-Ovest; nelle aree molto vicine alla faglia, dove le caratteristiche della distribuzione dello scorrimento cosismico sul piano di faglia giocano un ruolo significativo, i valori di picco tendono a mostrare discrepanze maggiori rispetto alle registrazioni disponibili. In aggiunta, l'attenuazione dei valori di picco simulati con la distanza è in ottimo accordo con le osservazioni del terremoto dell'Irpinia e di altri terremoti mondiali di magnitudo simile, specialmente nelle componenti dei movimenti ad alta frequenza. Infine, nella regione di *footwall* del campo vicino, le simulazioni numeriche tendono a dare valori più elevati rispetto alle previsioni o alle registrazioni, essendo molto sensibili alle assunzioni sulla distribuzione delle asperità di scorrimento sul piano di faglia. Comunque, va considerato che i modelli di *ground motion*, a brevi distanze dalla faglia, tendono ad essere scarsamente vincolati dalle osservazioni. Sulla base di quanto ottenuto, nel corso del 2024 verrà migliorato il modello numerico considerando, per esempio, diverse sorgenti di rottura. Successivamente verranno generati vari scenari di scuotimento del suolo in modo da valutare i possibili effetti che terremoti significativi possono avere sulsistema elettro energetico.

Per quanto riguarda invece la pericolosità da frana, le mappe di suscettibilità prodotte per l'area esaminata situata in Alta Valtellina forniscono una rappresentazione della pericolosità locale, evidenziando i sostegni situati in zone sicure rispetto quelli potenzialmente a rischio. I risultati ottenibili utilizzando il metodo LOGIT, il quale si è dimostrato robusto e relativamente semplice da implementare, sono fortemente dipendenti dalla qualità dei dati a disposizione. Un censimento frane non accurato o parziale, unito a dati territoriali aggregati o a bassa risoluzione, può perturbare significativamente il risultato finale degradando sensibilmente l'informazione in esso contenuto. Di conseguenza, si ritiene che le mappature ottenute a partire dai dati territoriali ad alta risoluzione siano da preferire rispetto a quelle ricavate tramite le informazioni aggregate delle *Slope Units*. Queste differenze sono ben evidenziate dalle statistiche eseguite sui sostegni esistenti che mostrano una più dettagliata classificazione per i dati risoluti (*HighRes*) rispetto a quelli aggregati (*Slope Units*). Infine, si è notato come anche la scelta della tipologia di frana da esaminare sia importante ai fini di una corretta analisi della suscettibilità da frana e per predisporre misure di mitigazione efficaci e idonee al tipo di fenomeno franoso atteso. Dall'area situata in Alta Valtellina si passerà nel corso del 2024 all'applicazione della metodologia al caso pilota della Campania.

Uno studio parallelo, incentrato sempre sulla pericolosità da frana valutata a scala di versante, è stato applicato alla regione Campania. Attraverso la generazione di mappe di suscettibilità basate sulla geologia e la geomorfologia di dettaglio del territorio, sono stati valutati i possibili impatti che le frane da colata rapida (*debris flow*) possono avere sugli elettrodotti. Dall'esame di 2835 strutture risulta che il 18% di esse ricade in aree ad alta suscettibilità per possibile impatto per frana. Un altro aspetto rimarchevole dello studio condotto è stata l'analisi quantitativa della

magnitudo delle colate detritiche, la quale è direttamente legata all'eventualità di generare danni strutturali seri. Questa valutazione è stata possibile effettuarla dal calcolo dei tiranti e della velocità di impatto. In molti casi quando le velocità ed i tiranti sono bassi l'opera potrebbe resistere all'impatto e non avere danni strutturali rilevanti. Questo avviene soprattutto per i flussi iperconcentrati di fenomeni alluvionali torrentizi dove l'aggradazione dei sedimenti sull'opera è prolungata nel tempo (decine di minuti) a differenza dell'impatto di un cumulo di frana che avviene in pochi secondi. Considerando quindi solo i tralicci impattati da fenomeni con intensità più elevata, caratterizzati quindi da tiranti maggiori ad 1 metro e velocità maggiori di 10 m/s, la percentuale di cui sopra si riduce al 12%. Da questa, poi solo il 5% dei casi potrebbe essere potenzialmente coinvolto in un fenomeno con velocità maggiori di 25 m/s e tiranti maggiori di 2 metri. È da sottolineare che circa il 2% del totale dei tralicci si trovano in situazioni di maggiore criticità in quanto ubicati alla base di versanti molto acclivi con presenza di coperture oppure molto prossimi ad impluvi.
Infine, è stata effettuata una analisi bibliografica sulla vulnerabilità sismica degli aerogeneratori che si aggiunge a quanto effettuato nel precedente triennio di RdS riguardo a componenti importanti delle cabine primarie quali trasformatori di tensione e di corrente. Dallo studio effettuato sugli aerogeneratori, si sottolinea quanto sia importante considerare la pericolosità sismica per la progettazione di queste strutture energetiche in quanto i tempi di inattività dovuti ai danni di un evento sismico significativo possono comportare perdite monetarie significative per le parti interessate. Danni che potrebbero avere un effetto economico di maggiore rilevanza qualora gli aerogeneratori facessero parte di un grande parco eolico. Sulla base di quanto detto, la valutazione del rischio dovrebbe essere effettuata considerando non solo le singole unità, soprattutto nei casi in cui queste vanno a costituire grandi parchi eolici in aree ad alta pericolosità sismica. Un'ultima nota riguarda l'importanza di considerare l'interazione tra suolo e struttura per la valutazione della vulnerabilità sismica delle turbine eoliche, in quanto gli effetti di questa interazione possono modificare sia le forme modali che le frequenze naturali di queste strutture energetiche.

7 - BIBLIOGRAFIA

[1] N. Bernardo, L. Vadacca e A. Abbate, «Valutazione integrata delle pericolosità geologiche per il sistema elettro-energetico italiano: individuazione di un caso pilota strategico,» Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale. Rapporto RSE n. 22014047, 2022.

[2] N. Bernardo, F. Polidoro e L. Vadacca, *Analisi delle forzanti sismiche e rischio idrogeologico, misure sperimentali per l'amplificazione sismica locale e curve di fragilità di elementi strutturali e non del sistema elettrico,* Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, Rapporto RSE n. 20010707, 2020.

[3] N. Bernardo, V. Vadacca, F. Polidoro e F. Colucci, «Risultati sperimentali sul comportamento di componenti delle stazioni elettriche nei confronti di eventi sismici significativi,» Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale. Rapporto RSE n. 21010379, 2021.

[4] I. Mazzieri, M. Stupazzini, R. Guidotti e C. Smerzini, «SPEED: SPectral Elements in Elastodynamics with Discontinuous Galerkin: a non-conforming approach for 3D multi-scale problems,» *nt. J. Numer. Meth. Eng.,* vol. 12, pp. 991-1010, 2013.

[5] C. Doglioni, P. Harabaglia, G. Martinelli, F. Mongelli e G. Zito, «A geodynamic model of the southern apennines accretionary prism,» *Terra Nova,* vol. 8, pp. 540-547, 1996.

[6] R. Westaway, «A geodynamic model of the southern apennines accretionary prism,» *J. Geophys. Res,* vol. 98, n. 21, pp. 741-772, 1993.

[7] G. Valensise e D. Pantosti, «The investigation of potential earthquakes sources in peninsular italy: A review,» *J. of Seismology,* vol. 5, p. 287–306, 2001.

[8] R. Devoti, A. Esposito, G. Pietrantonio, A. R. Pisani e F. Riguzzi, «Evidence of large-scale deformation patterns from GPS data in the italian subduction boundary,» *Earth Planet Sci. Lett,* vol. 311, p. 230–241, 2011.

[9] N. D'Agostino, «Complete seismic release of tectonic strain and earthquake recurrence in the apennines (italy),» *Geophys. Res. Lett,* vol. 41, p. 1155–1162, 2014.

[10] L. Ferranti, M. Palano, F. Cannavò, M. E. Mazzella, J. S. Oldow, E. Gueguen e a. et, «Rates of geodetic deformation across active faults in southern italy,» *Tectonophysics,* vol. 621, p. 101–122, 2014.

[11] P. Bernard e A. Zollo, «The Irpinia (Italy) 1980 earthquake: detailed analysis of a complex normal fault,» *Journal of Geophysical Research,* vol. 94, pp. 1631-1648, 1989.

[12] M. Cocco e F. Pacor, «The rupture process of the 1980 Irpinia, Italy, earthquake from the inversion of strong motion waveforms,» *In: F. Lund (Editor), New Horizons in Strong Motion: Seismic Studies and Engineering Practice. Tectonophysics,* vol. 218, pp. 157-177, 1993.

[13] A. Rovida, M. Locati, R. Camassi, B. Lolli, P. Gasperini e A. Antonucci, «Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0,» *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV),* 2022.

[14] D. W. Group, «Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).https://doi.org/10.13127/diss3.3.0,» 2021.

[15] G. Ameri, A. Emolo, F. Pacor e F. Gallovic, «Ground-motion simulations for the 1980 M 6.9 Irpinia earthquake (Southern Italy) and scenario events,» vol. 101, n. 3, pp. 1136-1151, 2011.

[16] A. Dello Russo, S. Sica, S. Del Gaudio, R. De Matteis e A. Zollo, «Near-source effects on the ground motion occurred at the Conza Dam site (Italy) during the 1980 Irpinia earthquake,» *Bull Earthquake Eng,* vol. 15, pp. 4009-4037, 2017.

[17] C. Cauzzi, D. Fah, V. Pessina, E. Faccioli e C. Smerzini, «Topographic amplification from recorded earthquake data and numerical simulations,» *15th WCEE, Lisbona, September 2012,* 2012.

[18] A. Zollo, A. Orefice e V. Convertito, «Source parameter scaling and radiation efficiency of microearthquakes along the Irpinia fault zone in southern Apennines, Italy,» *J Geophys Res Solid Earth,* vol. 119, pp. 3256-3275, 2014.

[19] M. Lancieri e A. Zollo, «Simulated shaking maps for the 1980 Irpinia earthquake, Ms 6.9: insightson the observed damage distribution,» *Soil Dyn Sand Earthq Eng,* vol. 29, pp. 1208-1219, 2009.

[20] D. Giardini, «Teleseismic observation of the November 23 1980, Irpinia earthquake,» *Ann. Geophys,* vol. 36, pp. 17-25, 1993.

[21] F. Pingue, G. De Natale e P. Briole, «Modeling of the 1980 Irpinia earthquake source: Constrains from geodetic data,» *Ann. Geophys,* vol. 36, pp. 27-40, 1993.

[22] S. Sangaraju, R. Paolucci e C. Smerzini, «3D physics-based ground motion simulation of the 2016 Kumamoto earthquakes,» *Proc. of the 6th IASPEI/IAEE,* 2021.

[23] R. Paolucci, F. Gatti, M. Infantino, C. Smerzini, A. G. Ozeebe e M. Stupazzini, «Broadband ground motions from 3D physicsbased numerical simulations using artificial neural networks,» *Bull. Seismol. Soc. Am,* vol. 108, pp. 1272-1286, 2018.

[24] R. Paolucci, I. Mazzieri, G. Piunno, C. Smerzini, M. Vanini e A. G. Ozeebe, «Earthquake ground motion modelling of induced seismicity in the Groningen gas field,» *Earth. Eng. Struct. Dynam.,* vol. 50, pp. 135-154, 2021.

[25] Y. Hisada e J. Bielak, «A Theoretical Method for Computing Near-Fault Ground Motions in Layered Half-Spaces Considering Static Offset Due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity,» *Bull. Seismol. Soc. Am.,* vol. 93, n. 3, pp. 1154-1168, 2003.

[26] G. Lanzano, L. Luzi, F. Pacor, C. Felicetta, R. Puglia, S. Sgobba e M. D'Amico, «A revised ground motion prediction model for shallow crustal earthquakes in Italy,» *Bull. Seismol. Soc. Am.,* vol. 109, n. 2, pp. 525-540, 2019.

[27] . S. Sgobba, C. Felicetta, G. Lanzano, F. Ramadan, M. D'Amico e F. Pacor, «NESS2.0: An updated version of the worldwide dataset for calibrating and adjusting ground motion models in near-source,» *Bull. Seismol. Soc. Am.,* vol. 111, n. 5, 2021.

[28] S. Kotha, G. Weatherill, D. Bindi e F. Cotton, «A Regionally Adaptable Ground-Motion Model for Shallow Crustal Earthquakes in Europe,» *Bullettin of Earthquake Engineering* , vol. 18, pp. 4091-4125, 2020.

[29] S. Kotha, G. Weatherill, D. Bindi e F. Cotton, «Near source magnitude scaling of spectral accelerations: analysis and update of Kotha et al. (2020),» *Bulletin of Earthquake Engineering,* vol. 20, p. 1343–1370, 2022.

[30] N. Bernardo, L. Vadacca e A. Abbate, «Valutazione integrata delle pericolosità geologiche per il sistema elettro-energetico italiano: individuazione di un caso pilota strategico,» Ricerca di Sistema 2022 n. 22014047, Milano, 2022.

[31] I. C. L. B. B. M. B. A. Trigila A., «Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2021,» ISPRA, Roma, 2021.

[32] M. Conforti e F. Ietto, «Modeling Shallow Landslide Susceptibility and Assessment of the Relative Importance of Predisposing Factors, through a GIS-Based Statistical Analysis,» *Geosciences,* vol. 11, 2021.

[33] R. Lombardia, «Geoportale Regione Lombardia,» 2023. [Online]. Available: https://www.geoportale.regione.lombardia.it/. [Consultato il giorno 12 2023].

[34] M. Alvioli, F. Guzzetti e I. Marchesini, «Parameter-free delineation of slope units and terrain subdivision of Italy,» *Geomorphology,* vol. 358, pp. 107-124, 2020.

[35] A. Abbate, M. Papini e L. Longoni, «Analysis of meteorological parameters triggering rainfall-induced landslide: a review of 70 years in Valtellina,» *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,* vol. 21, n. 7, pp. 2041-2058, 2021.

[36] L. Mancusi e A. Abbate, «"Strumenti per la mappatura delle minacce idrogeologiche per il sistema energetico e incidenza dei cambiamenti climatici" RSE Report RdS 21010317,» RSE, Milano, 2021.

[37] F. Guzzetti, P. Reichenbach, M. Cardinali, M. Galli e F. Ardizzone, «Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale,» *Geomorphology,* vol. 72, p. 272–299, December 2005.

[38] A. M. Youssef, H. R. Pourghasemi, B. A. El-Haddad e B. K. Dhahry, «Landslide susceptibility maps using different probabilistic and bivariate statistical models and comparison of their performance at Wadi Itwad Basin, Asir Region, Saudi Arabia,» *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* vol. 75, p. 63–87, February 2016.

[39] E. Yesilnacar e T. Topal, «Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey),» *Engineering Geology,* vol. 79, p. 251–266, July 2005.

[40] H. O. N. G. Yang e R. F. ADLER, «Predicting global landslide spatiotemporal distribution: Integrating landslide susceptibility zoning techniques and real-time satellite rainfall estimates,» *International Journal of Sediment Research,* vol. 23, p. 249–257, September 2008.

[41] Y. Xing, J. Yue, Z. Guo, C. Yang, J. Hu e A. Travé, «Large-Scale Landslide Susceptibility Mapping Using an Integrated Machine Learning Model: A Case Study in the Lvliang Mountains of China,» *Frontiers in Earth Science,* vol. 9, p. 722491, August 2021.

[42] B. William J., M. Ian P. and M. Katherine A., "PROTOCOL FOR SHALLOW-LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING," 2012.

[43] Z. Wang, Q. Liu e Y. Liu, «Mapping Landslide Susceptibility Using Machine Learning Algorithms and GIS: A Case Study in Shexian County, Anhui Province, China,» *Symmetry,* vol. 12, 2020.

[44] D. Varnes, «Slope movement types and processes,» *In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., Landslides, Analysis and Control, Transportation Research Board,* vol. 176, pp. 11-33, 1978.

[45] D. Cruden e D. Varnes, «Landslide Types and Processes,» *Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences,* n. Special Report 247, pp. 36-75, January 1996.

[46] G. Di Crescenzo e A. Santo, «Debris slides–rapid earth flows in the carbonate massifs of the Campania region (Southern Italy): Morphological and morphometric data for evaluating triggering susceptibility,» *Geomorphology,* vol. 66, pp. 255-276, 2005.

[47] G. Di Crescenzo e A. Santo, «Nuovo contributo sul ruolo svolto dai livelli pomicei nelle aree di distacco delle frane di colata rapida dei massicci carbonatici campani,» in *Convegno Nazionale La mitigazione del rischio da colate di fango a Sarno e negli altri Comuni colpiti dagli eventi del maggio 1998*, Napoli, 2 e 3 maggio 2005 - Sarno 4 e 5 maggio 2005, 2005.

[48] O. Hungr, S. Evans, M. Bovis e J. Hutchinson, «A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type,» *Environmental & Engineering Geoscience,* vol. 7, n. 3, pp. 221-238, 2001.

[49] G. Di Crescenzo e A. Santo, «Analisi geomorfologica delle frane da scorrimento-colata rapida in depositi piroclastici della Penisola Sorrentina (Campania),» *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria,* vol. 22, pp. 57-72, 1999.

[50] D. Calcaterra e A. Santo, «The January 10, 1997 Pozzano Landslide, Sorrento Peninsula, Italy,» *Eng. Geol.,* vol. 75, pp. 181-200, 2004.

[51] M. De Falco, G. Di Crescenzo e A. Santo, «Volume estimate of flow-type landslides along carbonatic and volcanic slopes in Campania (Southern Italy),» *Natural hazards,* vol. 61, pp. 51-63, 2012.

[52] G. Forte, M. Pirone, A. Santo, M. V. Nicotera e G. Urciuoli, «Triggering and predisposing factors for flow-like landslides in pyroclastic soils: the case study of the Lattari Mts. (Southern Italy),» *Engineering Geology,* vol. 257, pp. 105-137, 2019.

[53] N. Santangelo, G. Forte, M. De Falco, G. B. Chirico e A. Santo, «New insights on rainfall triggering flow-like landslides and flash floods in Campania (Southern Italy),» *Landslides,* vol. 18, n. 8, pp. 2923-2933, 2021.

[54] M. De Falco, G. Forte, E. Marino, L. Massaro e A. Santo, «UAV and field survey observations on the November 26th 2022 Celario flowslide, Ischia Island (Southern Italy),» *Journal of Map,* vol. 19, n. 1, 2023.

[55] G. Forte, L. Massaro, M. De Falco, M. Pirone e A. Santo, «Empirical relationship for the estimate of pyroclastic soil thickness using slope steepness,» *Catena,* vol. 231, 2023.

[56] M. Stucchi, C. Meletti, V. Montaldo, A. Akinci, E. Faccioli, P. Gasperini, L. Malagnini e G. Valensise, «Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale MPS04 [Data set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/sh/mps04/ag,» 2004.

[57] E. Katsanos, S. Thöns e C. T. Georgakis, «Wind turbines and seismic hazard: a state-of-the-art review,» *Wind Energy,* vol. 19, n. 11, pp. 2113-2133, 2016.

[58] V. Zania, «Natural vibration frequency and damping of slender structures founded on monopoles,» *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* vol. 59, pp. 8-20, 2014.

[59] E. Katsanosa, A. Sanz, C. Georgakisc e S. Thöns, «Multi-hazard response analysis of a 5MW offshore wind turbine,» *Procedia Engineering,* n. 199, p. 3206–3211, 2017.

[60] A. Myers, A. Gupta, C. Ramirez e E. Chioccarelli, «Evaluation of the Seismic Vulnerability of Tubular Wind Turbine Towers,» in *15 WCEE*, Lisboa, 2012.

[61] F. Sabetta e a. Pugliese, «Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions,» *Bull. seismol. Soc. Am.,* vol. 86, n. 2, pp. 337-352, 1996.

[62] C. Smerzini, C. Galasso, I. Iervolino e R. Paolucci, «Ground motion record selection based on broadband spectral compatibility,» *Earthq. Spectra,* vol. 30, n. 4, pp. 1427-1448, 2014.

[63] E. Faccioli, F. Maggio, R. Paolucci e A. Quarteroni, «2D and 3D elastic wave propagation by a pseudo-spectral domain decomposition method,» *J Seismol,* vol. 1, pp. 237-251, 1997.

[64] «Ottenimento di curve di fragilità di trasformatori di tensione e di corrente appartenenti a cabine elettriche primarie.,» Rapporto tecnico EUCENTRE EUC177/2021E _TR, 2021. prot. n. 21012001.

[65] Rapporto tecnico finale, *Analisi spaziale della pericolosità, a scala nazionale e locale, delle infrastrutture elettriche ai rischi naturali,* Università degli Studi di Milano Bicocca - Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, prot. 22001026, Dicembre 2021.

[66] ISPRA, «Le frane,» [Online]. Available: https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/dissesto-idrogeologico/le-frane. [Consultato il giorno 30 12 2022].

[67] ISTAT, «www.ISTAT.it,» [Online]. Available: https://www.istat.it/it/archivio/137001. [Consultato il giorno 30 12 2022].

[68] «www.il giorno.it,» [Online]. Available: https://www.ilgiorno.it/cronaca/riscaldamento-globale-clima-grafico-1.6992416. [Consultato il giorno 30 12 2022].

[69] M. Maugeri, S. Wang e J. Zhang, «Some observation on the dynamic behavior of jointed rock slopes under seismic loading,» in *Proc. International Symposium on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering*, Istanbul, Turchia, 1993.

[70] M. Maugeri, E. Motta e S. Wang, «Seismicity induced mass movement of high slopes and its prediction,» in *7th Congress of the I.A.E.G*, Lisbona, 1994.

[71] M. Maugeri, E. Motta e M. Sorriso Valvo, «The Senerchia landslide triggered by the 23 November 1980 earthquake,» in *Proc. 4th International Congress I.A.E.G*, New Delhi, 1982.

[72] T. Crespellani, C. Madiai e M. Maugeri, «Analisi di stabilità di un pendio in condizioni sismiche e post-sismiche,» *Rivista Italiana di Geotecnica,* n. 1, pp. 50-61, 1996.

[73] S. Martino, P. Caprari, M. Fiorucci e G. M. Marmoni, «The CEDIT Catalogue: from inventorying of earthquake-induced ground effects to analysis of scenario,» *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.,* vol. 107, pp. 441-450, 2020.

[74] «Protezione Civile,» [Online]. Available: http://www.protezionecivile.gov.it/attivita-rischi/rischio-sismico/descrizione. [Consultato il giorno 15 09 2022].

[75] INGV, «www.ingv.it,» [Online]. Available: https://www.ingv.it/it/stampa-e-urp/stampa/comunicati-stampa/5036-terremoti-in-italia-nel-2021-registrati-oltre-16-mila. [Consultato il giorno 15 09 2022].

[76] *Decreto 18 gennaio 2018 "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni" Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20 febbraio 2018Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.*

[77] A. Santo e M. De Falco, «Rapporto Tecnico Definizione della suscettibilità a franare (colate rapide di fango) in aree di versante con presenza di elettrodotti,» Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Napoli, Novembre 2023.

[78] D. M. Cruden, «A simple definition of a landslide.,» *Bulletin of Engineering Geology and the Environment,* vol. 43 (1), pp. 27-29, 1991.

8 - ACRONIMI

Acronimo	Descrizione
ANNs	*Artificial Neural Networks*
AUC	*Area Under Curve*
DF	Colate Detritiche
D2S	*Distance to Stream*
GIS	*Geographic Information System*
LOGIT	Modello di Regressione Logistica
Mw	*Magnitudo momento*
PBS	*Physics-Based Simulation*
PDISP	*Permanent Displacement*
PGA	*Peak Ground Acceleration*
PGV	*Peak Ground Velocity*
RdS	Ricerca di Sistema
ROC	*Characteristic Operating Receiver*
RSE	Ricerca Sistema Energetico
SD	*Spectral Degree*
SEE	Sistema Elettro-Energetico
SL	Scivolamenti
SPEED	*SPectral Elements in Elastodynamics with Discontinuous Galerkin*
TWI	*Topographic Wetness Index*
Vs_{30}	Velocità delle onde sismiche S nei primi 30 metri di profondità

9 - ELENCO ALLEGATI

Allegato	Descrizione	N. protocollo
1	Scenari di scuotimento per aree strategiche del sistema elettro-energetico nazionale mediante simulazioni numeriche tri-dimensionali	23011265
2	Definizione della suscettibilità a franare (colate rapide di fango) in aree di versante con presenza di elettrodotti	23012219