



Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica



PROVINCIA  
AUTONOMA  
DI BOLZANO  
ALTO ADIGE



## Dal rischio residuo al rischio accettabile: nuove prospettive nella gestione del rischio da frana

16 maggio 2025 – Aula magna CNR, Roma

***Analisi del rischio da frane a cinematica lenta per le reti stradali***

*Prof. Dario Peduto*



*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno*

- Le reti stradali rivestono un ruolo decisivo nello sviluppo economico di una società (Castelli, 2017)



- A causa della loro tipica estensione lineare, sono esposte al rischio generato da numerosi pericoli



Alluvioni



Terremoti



Frane

## Le reti stradali possono essere affette da diverse tipologie di frana

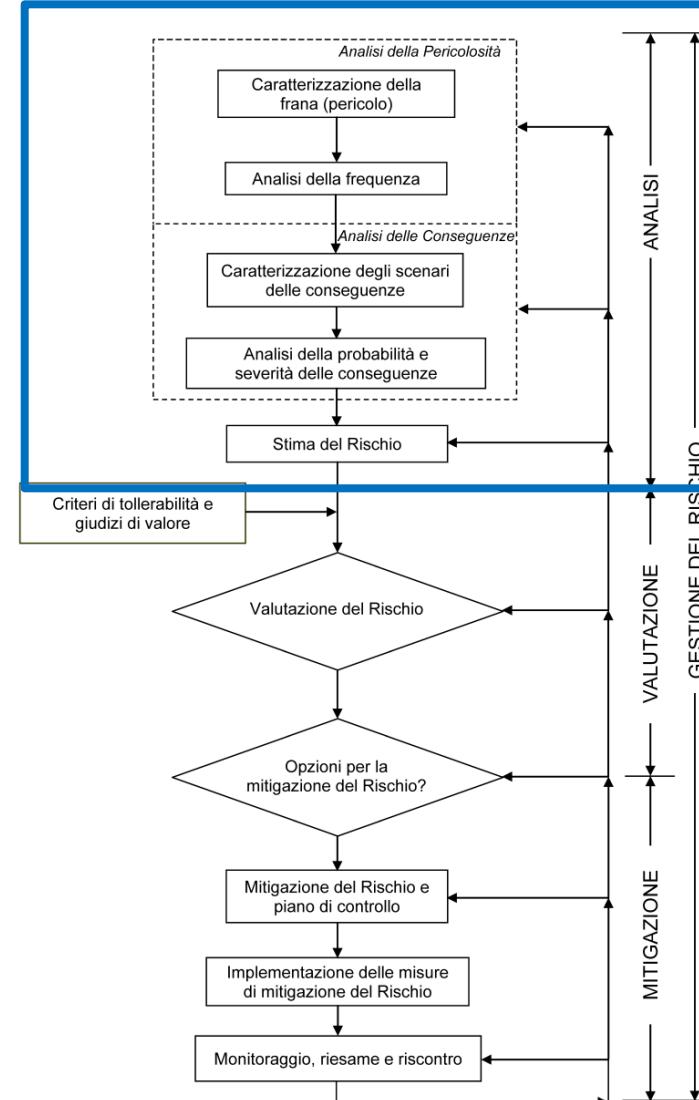


Classe	Descrizione	Velocità tipica	Velocità (m/s)
7	Estremamente rapido	5 m/sec	5
6	Molto rapido	3 m/min	$5 \cdot 10^{-2}$
5	Rapido	1,8 m/ora	$5 \cdot 10^{-4}$
4	Moderato	13 m/mese	$5 \cdot 10^{-6}$
3	Lento	1,6 m/anno	$5 \cdot 10^{-8}$
2	Molto lento	16 mm/anno	$5 \cdot 10^{-10}$
1	Estremamente lento	< 16 mm/anno	$< 5 \cdot 10^{-10}$

(Cruden e Varnes, 1996)

## Le frane generano **rischi** per le persone transitanti, per le stesse strade e per le attività economiche

- *Danni diretti* (ad esempio, alla pavimentazione stradale con gli associati costi di riparazione)
- *Danni indiretti* (ad esempio, la riduzione delle attività economiche dovute alle restrizioni di accesso in un'area)



Analisi della pericolosità

Analisi delle conseguenze

Stima del rischio

Il processo di gestione del rischio da frana (modificata da Fell et al., 2005).

## L'analisi del rischio può essere:

### Qualitativa (prioritizzazione)

Le analisi qualitative del rischio descrivono l'entità delle conseguenze e la probabilità che queste ultime si verifichino mediante scale nominali, descrittive o numeriche (Fell et al. 2008)

#### Punteggi

→ **frane di primo distacco in rocce o terreni** (Bunce et al. 1997, Budetta 2004, Li et al. 2009, Ferlisi et al. 2012, Budetta and Nappi 2013, Vishal et al. 2017, Wong 1998, Lowell and Morin 2000, ODOT 2001, Liang et al. 2006)

#### Matrici

→ **differenti tipologie di frana** (Pellicani et al., 2017)

### Quantitativa (perdita della vita)

Le analisi quantitative del rischio (QRA) si basano su stime numeriche della probabilità di accadimento (della generica tipologia di frana) e delle associate conseguenze (riferite a uno o più elementi esposti) (Fell et al., 2008).

#### Rischio per l'individuo

→ **frane di primo distacco in rocce o terreni**

#### Curve F-N

Rischio per persone su veicoli fermi/in movimento

### Frane a cinematica lenta



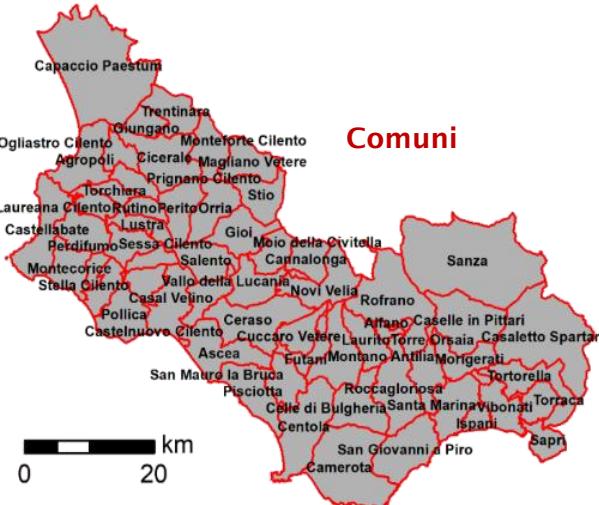
Numericamente limitati sono i contributi specificamente orientati alla stima quantitativa del rischio per frane affette da frane esistenti (Vranken et al., 2013; Argyroudis et al., 2019; Ferlisi et al., 2021; Peduto et al., 2025).

**Gli obiettivi** dello studio da perseguire a grande scala (1:5.000) riguardano:

- la **stima quantitativa del rischio** per danni diretti a una rete stradale esposta al rischio da frane a cinematica lenta assunta non danneggiata.

I **principali elementi di novità** sono:

- La stima della probabilità di accadimento di frane a cinematica lenta di assegnata intensità mediante dati DInSAR (**pericolosità**).
- Generazione di curve empiriche di fragilità e di vulnerabilità per sezioni stradali affette da frane a cinematica lenta sulla base dell'uso congiunto di dati DInSAR e di danno (**vulnerabilità**).
- Uso delle curve di fragilità generate per analizzare le **prestazioni** di una rete stradale per la quale non si dispone di dati di danno e i dati DInSAR sono limitati.



59 Comuni il cui territorio si estende per circa 1.600 km<sup>2</sup>

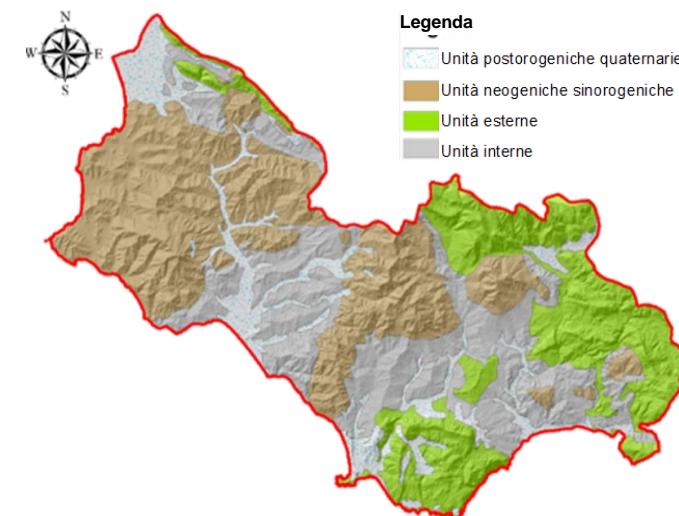
## Cartografia disponibile

Carta topografica della Regione Campania

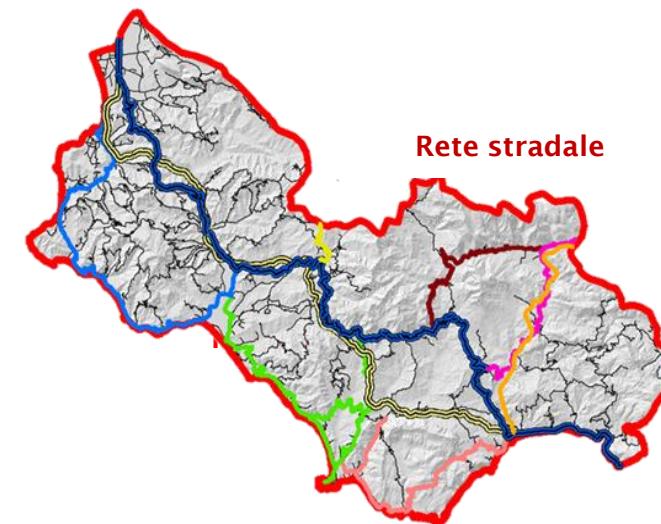
- Carta della rete stradale (1:5.000)
- Modello Digitale del Terreno (DTM)

Carte tematiche

- Carta Geologica (1:25.000)
- Carta Inventario dei fenomeni franosi (1:5.000, PsAI-Rf 2012 - ex AdB Sinistra Sele)

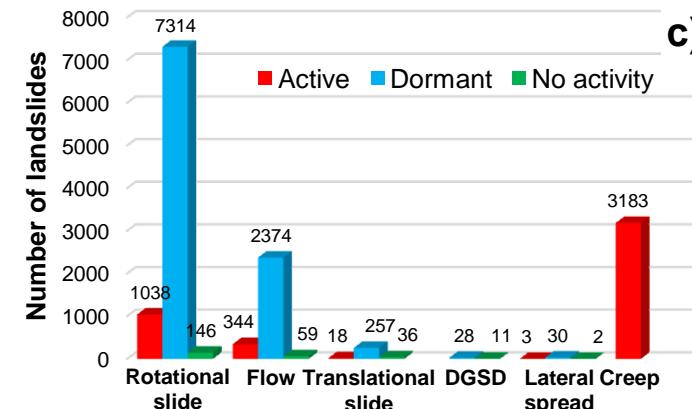
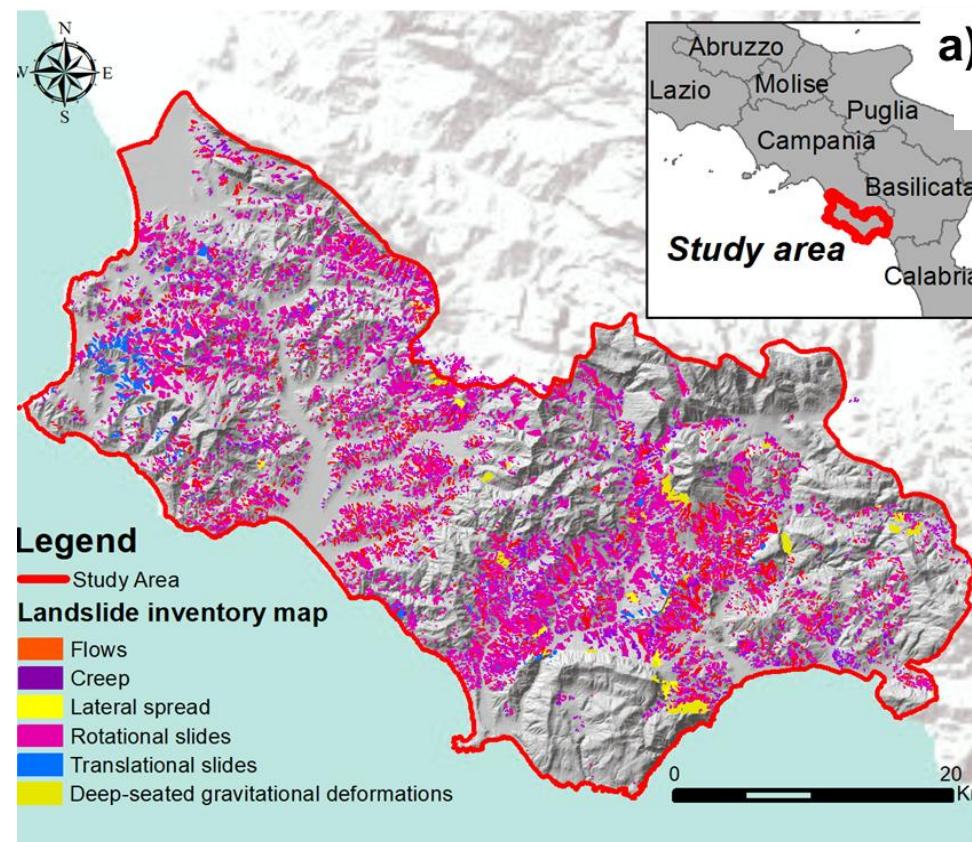


**Carta geologica**



## Legend

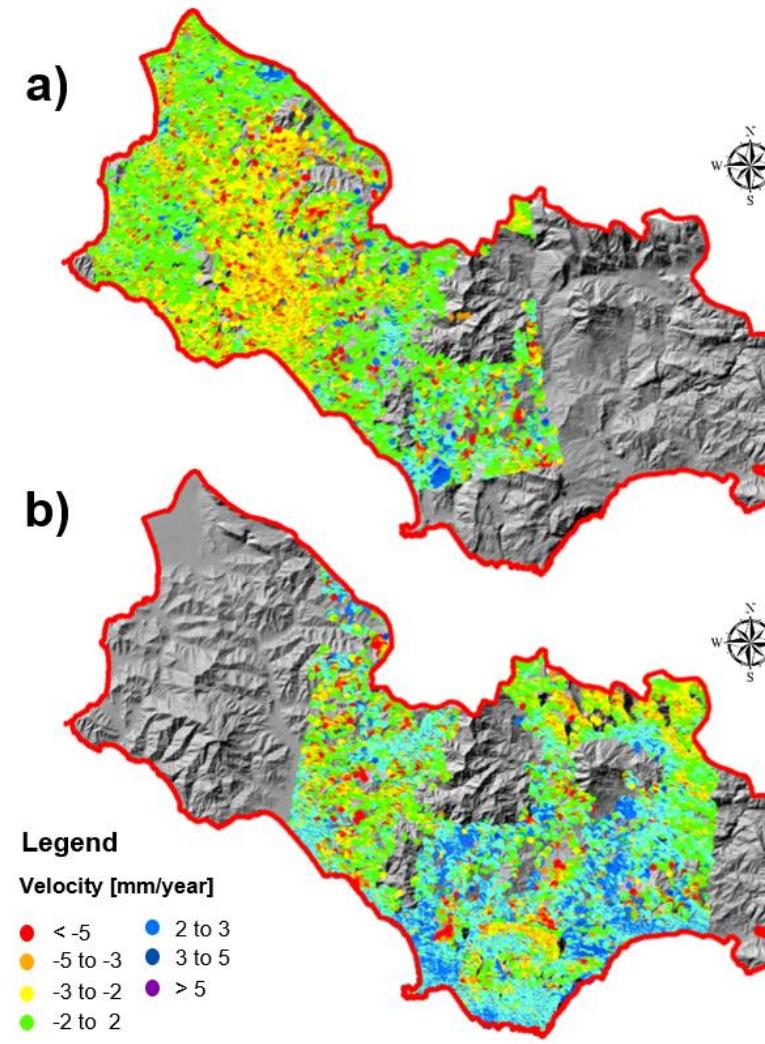
- State road 18
- State road 517
- State road 517 Var.
- former State road 488
- former State road 267
- former State road 447
- former State road 562
- Provincial road 18
- Provincial road 430
- Minor roads
- Study Area



- Carta inventario (scala 1:5000) delle frane a cinematica lenta all'interno dell'area di studio;
- e c) numero di processi di frana (per un totale di **14.843**) distinti per tipologia/stato di attività.

Orbita ascendente: 42 immagini  
CSK tra maggio 2011 e marzo 2014

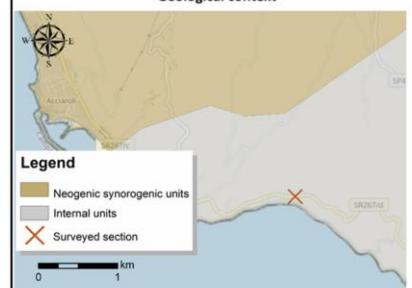
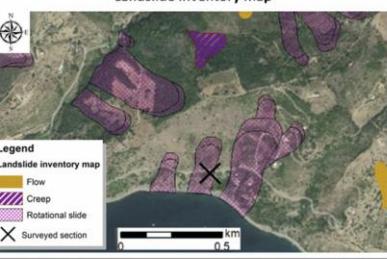
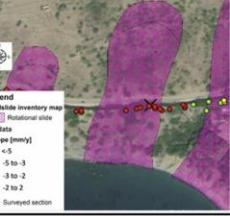
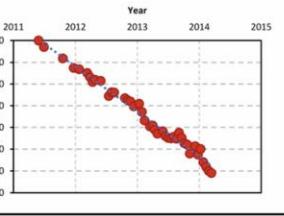
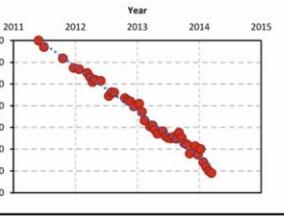
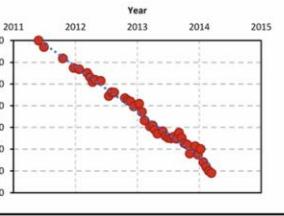
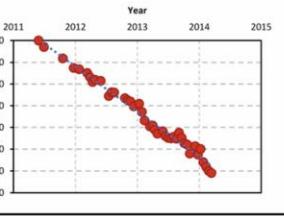
Orbita descendente: 42 immagini  
CSK tra ottobre 2011 e dicembre  
2013



Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare

Distribuzione spaziale dei PS (con l'associata velocità media annuale lungo la LOS) ottenuta dalle immagini COSMO-SkyMed acquisite in orbita a) ascendente e b) descendente.

Sezioni rilevate: 486

FACT-SHEET		DATE: 2018/03/18				
<b>SECTION 1: Area and road stretch information</b>						
Region	Campania	Road	former State road 267			
Province	Salerno	Coordinates	40°10'17.9"N 15°03'12.4"E			
Municipality	Pollica	Typology	Cut slope section			
<b>SECTION 2: Background data</b>						
<b>Geological context</b>  <b>Legend:</b> Neogenic synorogenic units (yellow), Internal units (grey), Surveyed section (red X).	<b>Landslide inventory map</b>  <b>Legend:</b> Landslide inventory map: Flow (yellow), Creep (purple), Rotational slide (pink). Surveyed section (red X).	<b>Road stretch position</b> <input type="checkbox"/> Head <input checked="" type="checkbox"/> Body <input type="checkbox"/> Foot <b>State of activity</b> <input checked="" type="checkbox"/> Active <input type="checkbox"/> Dormant <input type="checkbox"/> Inactive				
<b>SECTION 3: Damage data</b>						
<b>Photos</b>  Google Image 2010 → Google Image 2017 → Photo taken during the survey 2018						
<b>Recorded damage</b>		<b>SECTION 4: PSI data</b>				
Category	Severity level	 <b>Legend:</b> Landslide inventory map: Flow (yellow), Creep (purple), Rotational slide (pink). Surveyed section (red X).				
D <sub>0</sub>	Negligible					
D <sub>1</sub>	From very low to low					
D <sub>2</sub>	From moderate to severe					
D <sub>3</sub>	Very severe					

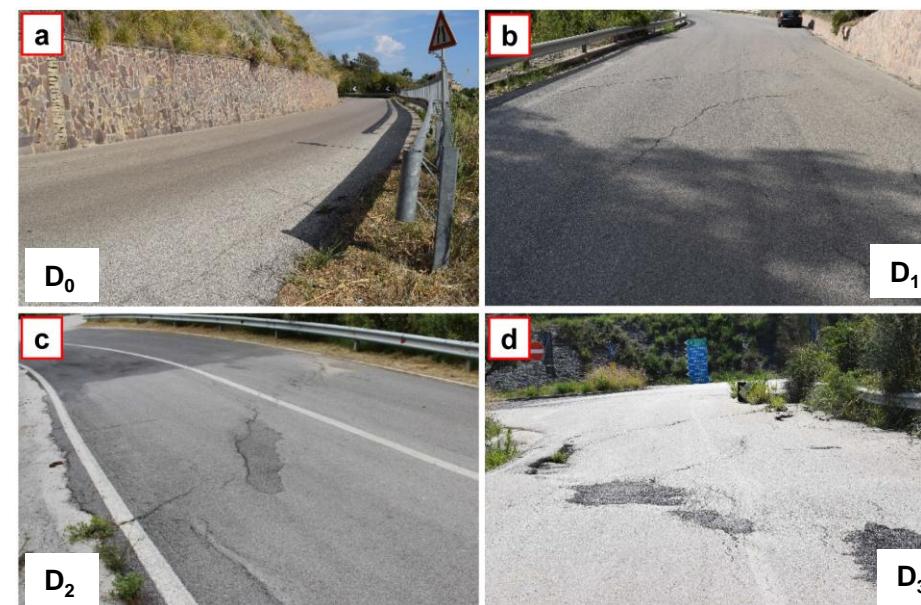
## Classifica del danno

**Livello di severità D<sub>0</sub> (trascurabile):** deformazioni e fessure della pavimentazione stradale sono assenti o raramente visibili

**Livello di severità D<sub>1</sub> (da molto basso a basso):** deformazioni e fessure interessano localmente la pavimentazione stradale senza perdite di funzionalità

**Livello di severità D<sub>2</sub> (da moderato a grave):** deformazione e fessure interessano sensibilmente la pavimentazione stradale coinvolgendo parzialmente o interamente le corsie e/o i bordi della carreggiata con necessaria riduzione dei limiti di velocità

**Livello di severità D<sub>3</sub> (molto grave):** deformazioni e fessure compromettono definitivamente la continuità della pavimentazione stradale coinvolgendo parzialmente o interamente le corsie e/o i bordi della carreggiata con necessarie restrizioni al traffico (ad esempio, senso unico alternato).



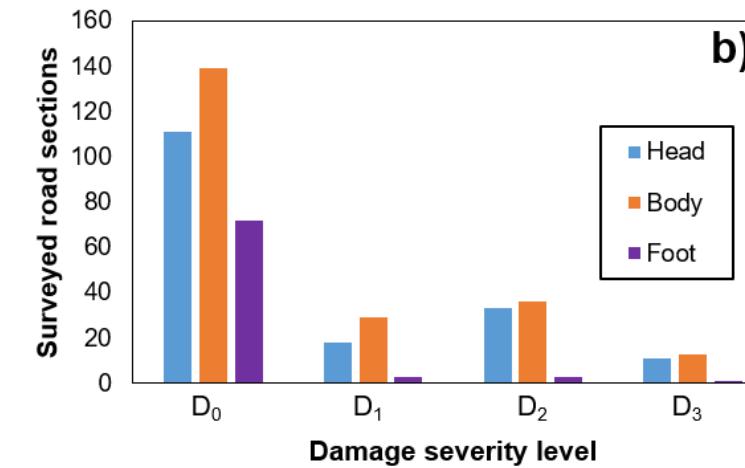
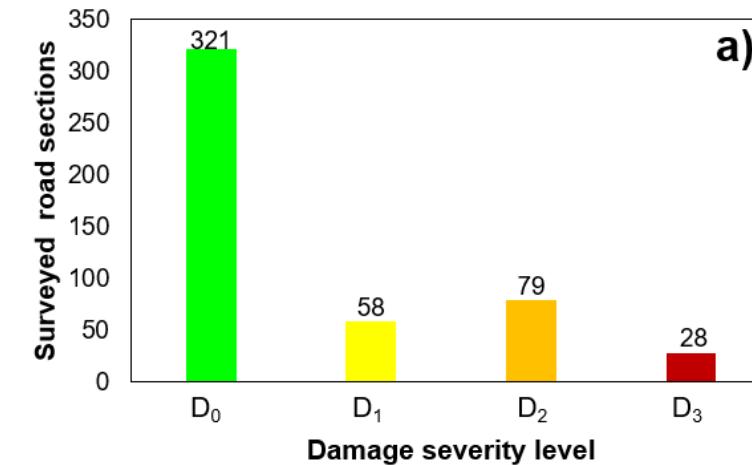
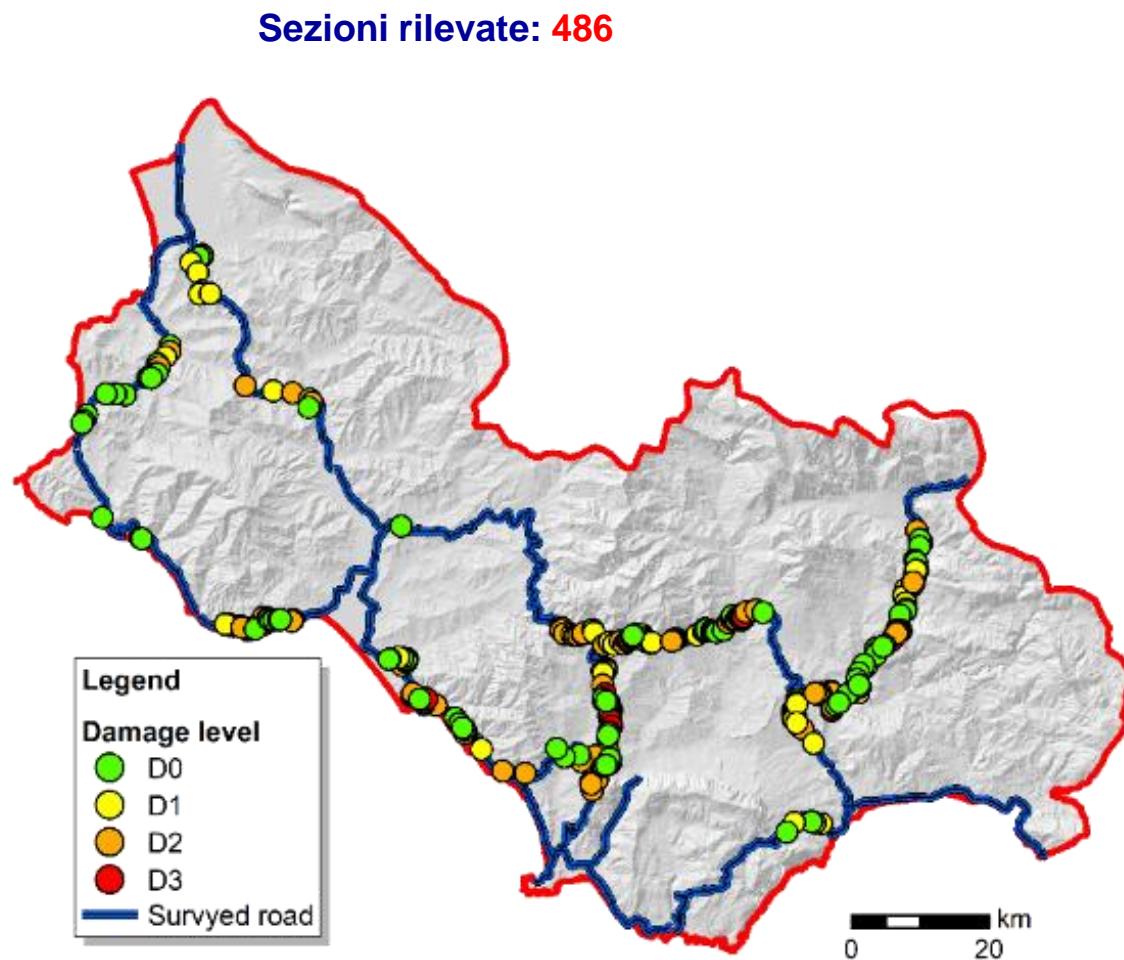
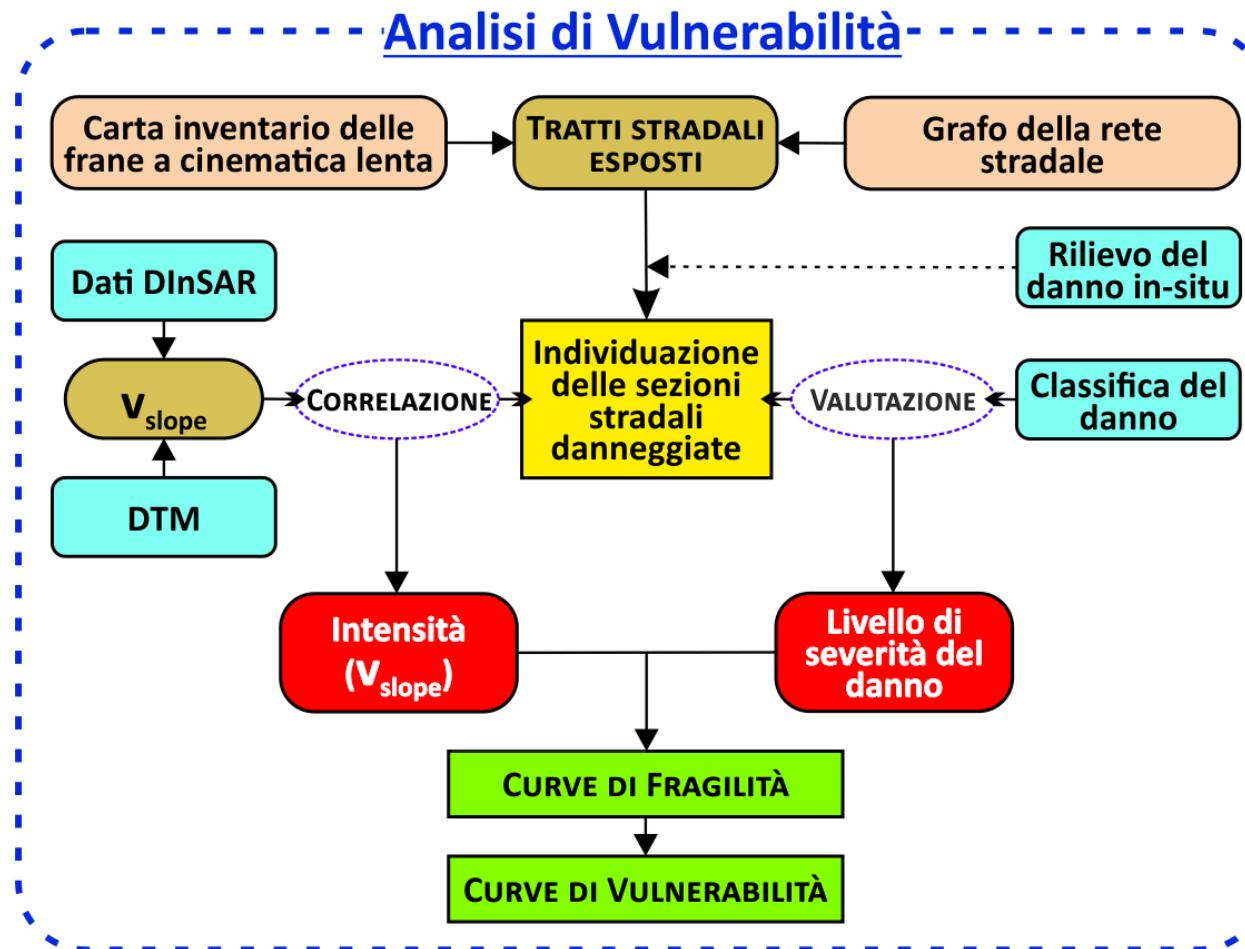
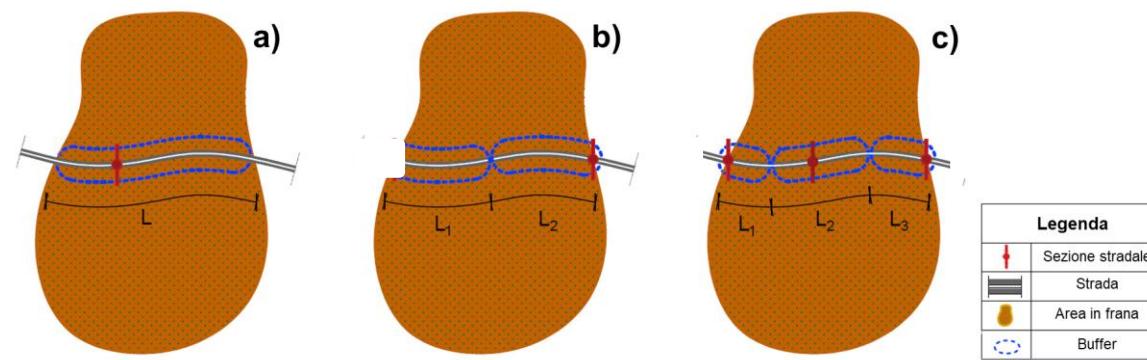


Diagramma di flusso delle attività da svolgere per l'analisi della vulnerabilità fisica di una rete stradale da frane a cinematica lenta

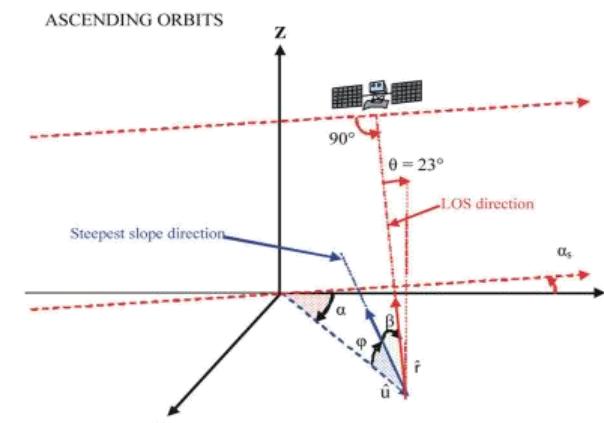
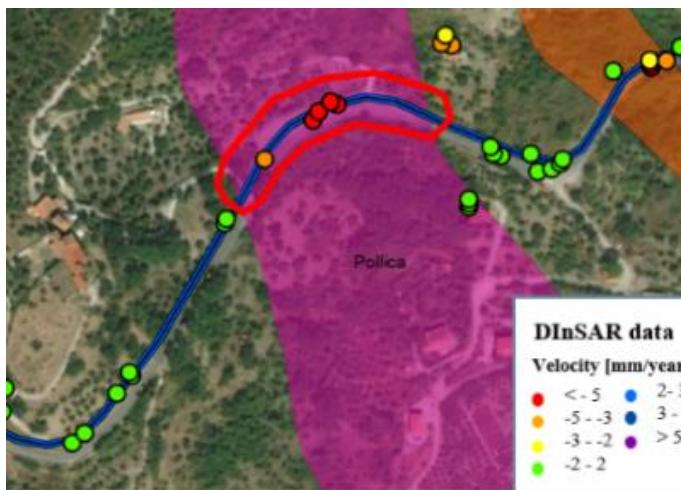




Al fine di associare al livello di severità del danno registrato il valore di un parametro indicativo dell'intensità della frana (IM) si considera, per ogni sezione stradale individuata, un **buffer** disposto simmetricamente rispetto alla linea di mezzeria.

Il buffer ha una larghezza pari a 40 m nella direzione ortogonale alla linea di mezzeria e una lunghezza (lungo la linea di mezzeria) variabile in base al numero di sezioni stradali danneggiate e alla loro posizione relativa.

Proiezioni dei valori di  $v_{LOS}$  (velocità lungo la LOS) per ottenere  $IM = v_{slope}$  (velocità lungo la direzione di massima pendenza)



(Cascini et al., 2010, 2013)

n. di sezioni oggetto di rilievo  
considerate per le analisi

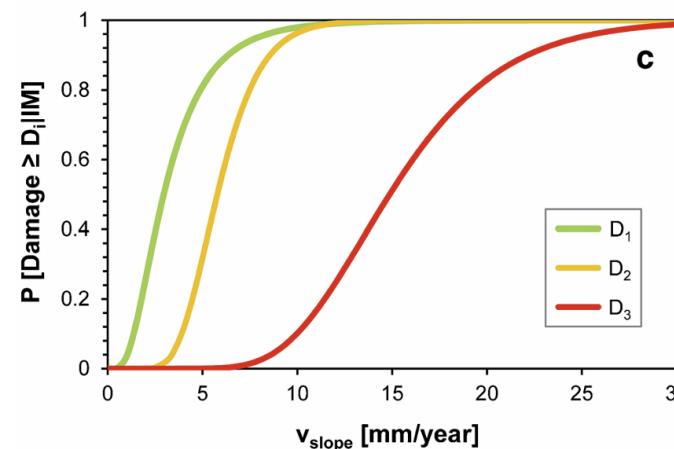
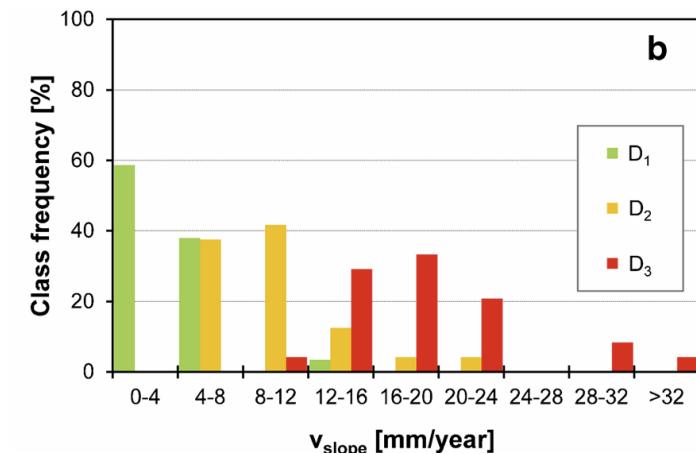
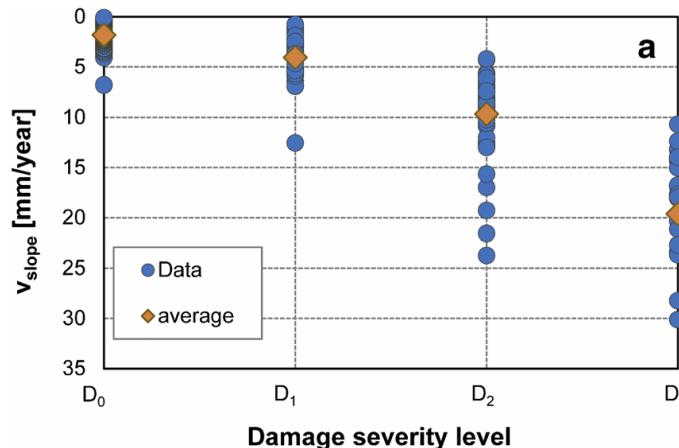
$$Y = 168$$

$D_0 = 67$  sezioni

$D_1 = 29$  sezioni

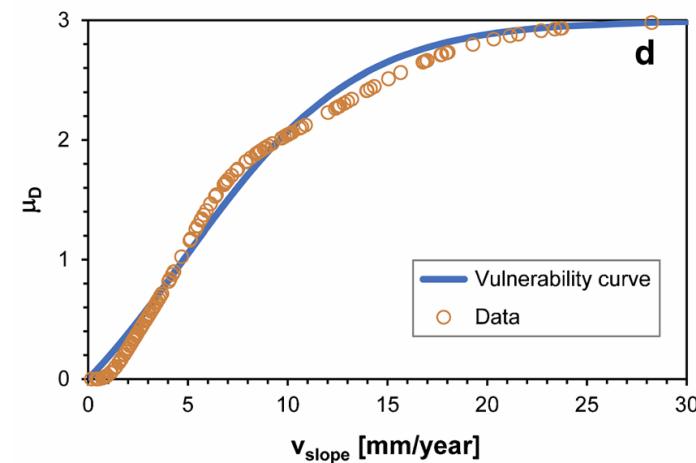
$D_2 = 48$  sezioni

$D_3 = 24$  sezioni



Le **curve empiriche di fragilità** sono state generate adottando una funzione di distribuzione cumulata di tipo log-normale (Shinozuka et al. 2000, 2003):

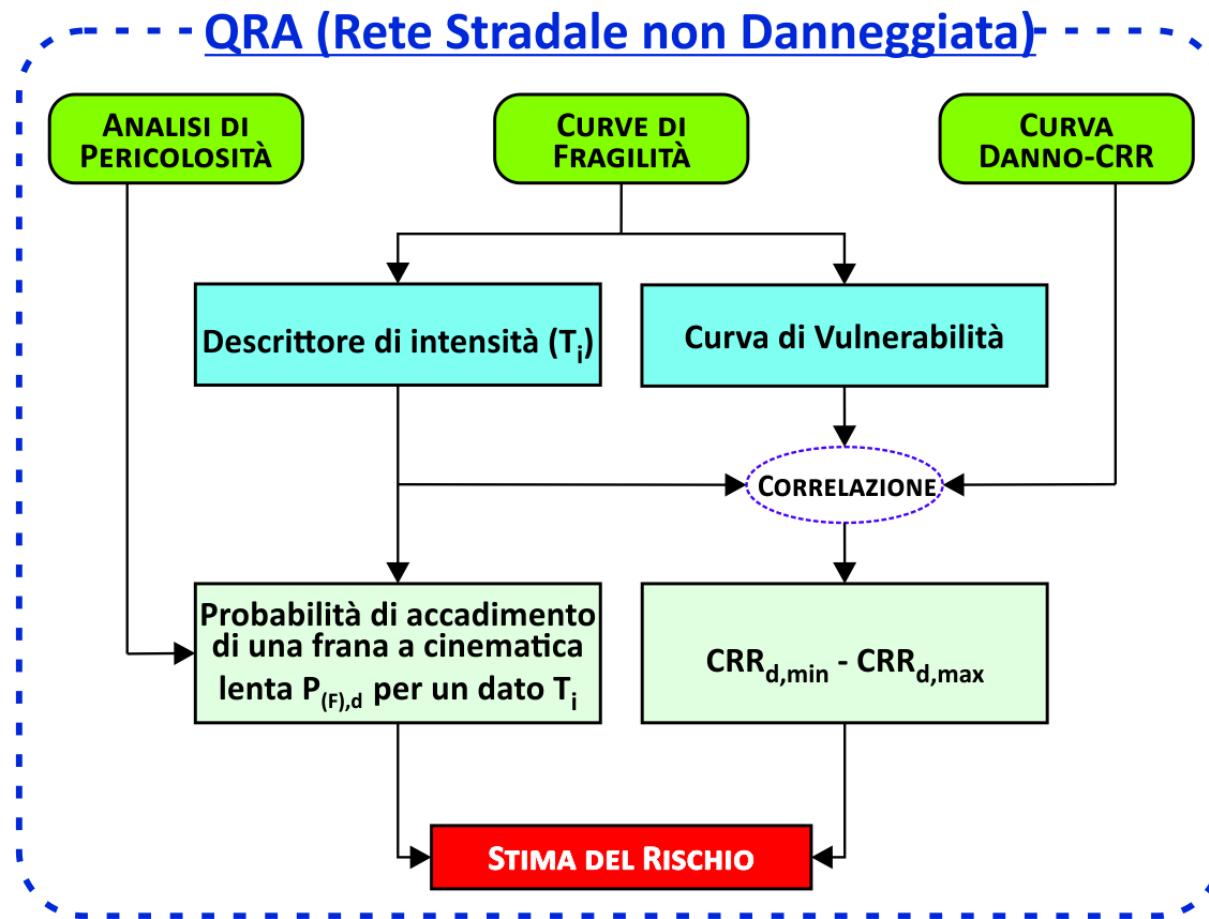
$$P(Danno \geq D_i | IM) = \Phi\left[\frac{1}{\beta_i} \ln\left(\frac{IM}{IM_i}\right)\right] \quad (i = 1, 2, 3)$$



La **curva di vulnerabilità** può essere derivata interpolando i dati  $\mu_D(IM_j)$  ottenuti come (Pitilakis e Fotopoulou, 2015):

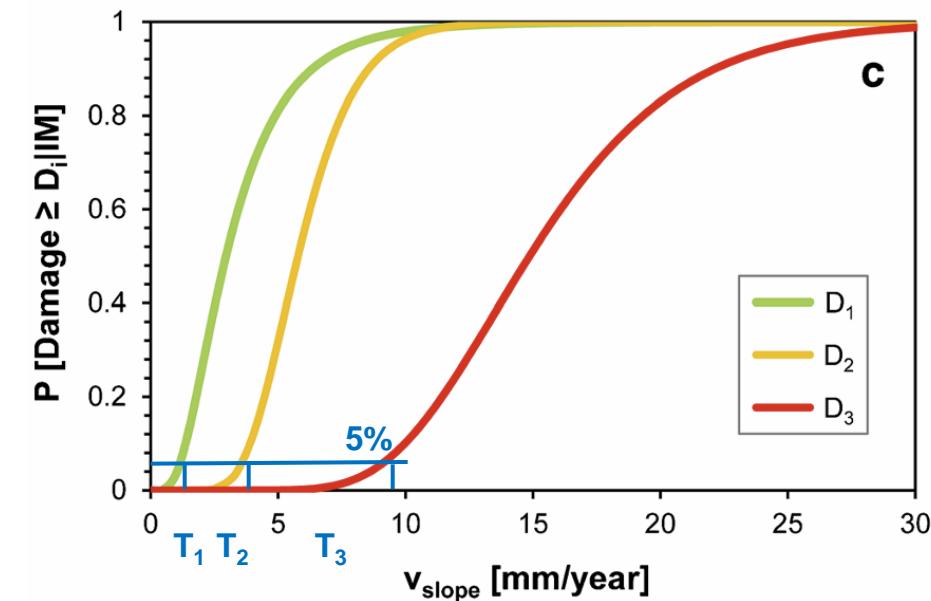
$$\mu_D(IM_j) = \sum_{i=1}^3 P_i \times d_i \quad (j = 1, \dots, Y)$$

Diagramma di flusso delle attività da svolgere per l'analisi quantitativa del rischio da frane a cinematica lenta cui è esposta una rete stradale assunta non danneggiata



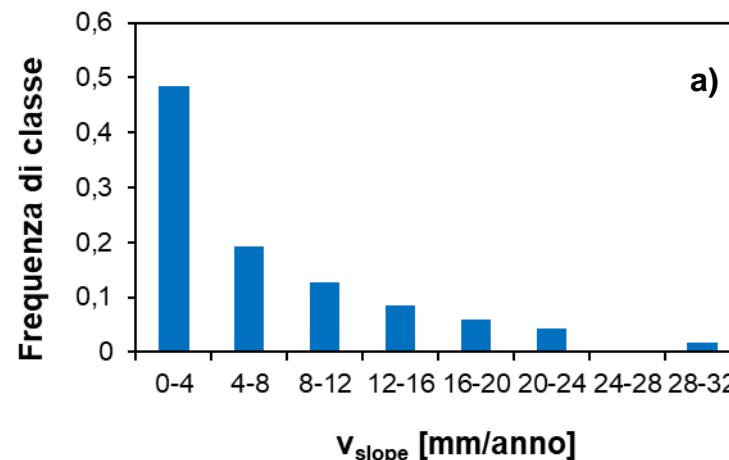
Le curve di fragilità ottenute consentono di definire **soglie di intensità** ( $T_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ) da associare ad una probabilità di raggiungimento o superamento di un determinato livello di severità del danno posta pari al 5% (Zhang e Ng, 2005).

Soglia d'intensità	$v_{slope}$ [mm/anno]
$T_1$	1,1
$T_2$	3,5
$T_3$	8,9

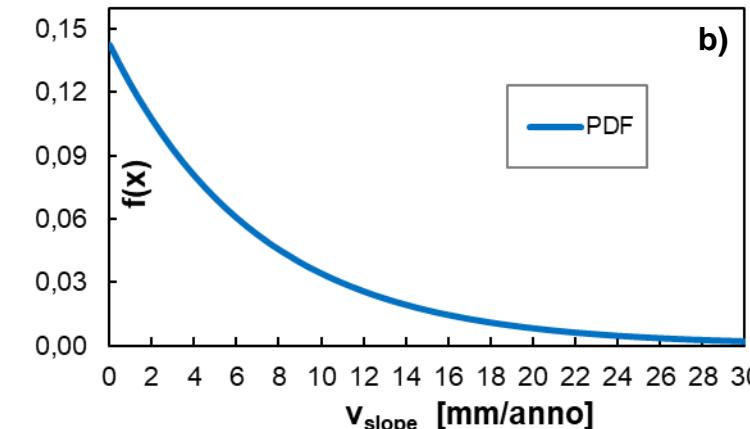


Livello d'intensità	Scala nominale
$0 < v_{slope} \leq T_1$	Trascurabile
$T_1 < v_{slope} \leq T_2$	Bassa
$T_2 < v_{slope} \leq T_3$	Moderata
$v_{slope} > T_3$	Alta

La legge di distribuzione che meglio si adatta ai dati disponibili è quella **esponenziale negativa**



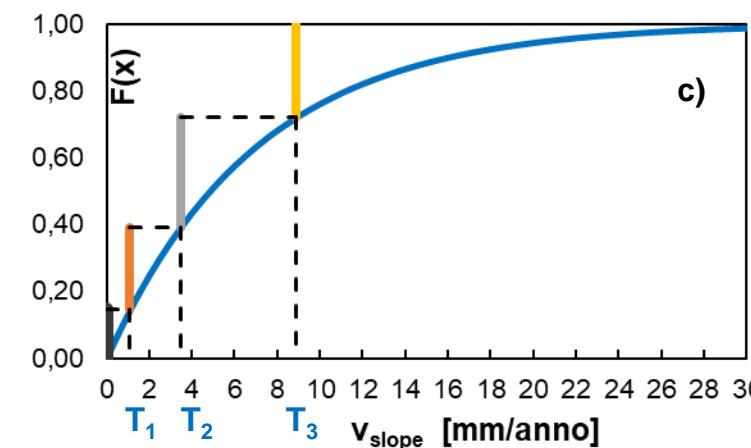
a)



b)

Probabilità di accadimento di frane di assegnata intensità

Livello d'intensità [mm/anno]	$P_{(F),d}$
$0 < v_{slope} \leq 1,1$	0,14
$1,1 < v_{slope} \leq 3,5$	0,25
$3,5 < v_{slope} \leq 8,9$	0,33
$v_{slope} > 8,9$	0,28



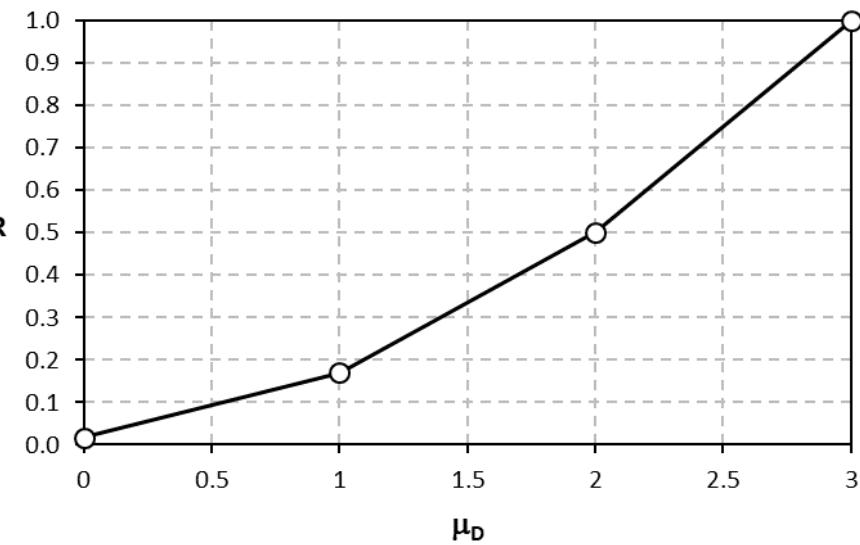
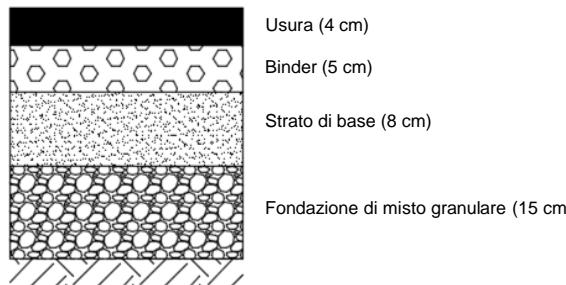
c)

a) Frequenza di classe della  $v_{slope}$ , b) funzione di densità di probabilità (FDP) e c) funzione di probabilità cumulata della  $V_{slope}$ .

Il CRR, che rappresenta il **costo relativo di riparazione (compreso tra 0 e 1)**, è dato dal rapporto tra il costo di riparazione e il costo di ricostruzione (per unità di lunghezza della strada, assunta ad esempio pari a 1 metro).

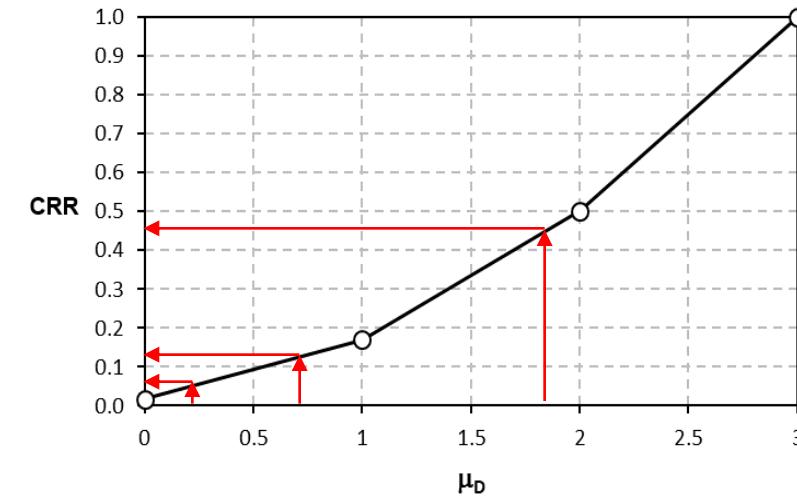
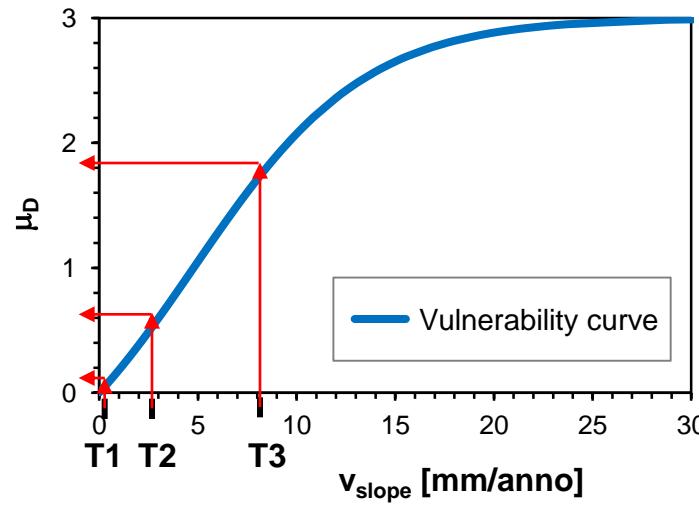
Attività	Unità di misura	Costo [€]	Livello di severità del danno			
			D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
Sigillatura delle lesioni delle pavimentazioni	m	3,99	■	-	-	-
Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di usura (4 cm di spessore)	m <sup>3</sup>	137,86	-	■	■	■
Fresatura di strati di pavimentazione in conglomerato bituminoso	m <sup>2</sup> × cm	0,42	-	-	■	■
Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di binder (5 cm di spessore)	m <sup>3</sup>	125,61	-	-	■	■
Mano d'attacco costituita da bitume modificato con elastomeri	m <sup>2</sup>	0,71	-	-	■	■
Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di base (8 cm di spessore)	m <sup>3</sup>	115,44	-	-	-	■
Fornitura e posa in opera di fondazione stradale in misto granulare stabilizzato (15 cm di spessore)	m <sup>3</sup>	19,26	-	-	-	■
Costo unitario di riparazione [€/m]			3.99	38.60	113.99	227.35

Attività richieste e costi da sostenere per la riparazione di strade con differente livello di severità del danno (ANAS, 2018).



Costo relativo di riparazione (CRR) in funzione del danno mediamente atteso ( $\mu_D$ ).

Lo spessore degli strati fa riferimento a strade extra-urbane secondarie secondo quanto riportato da Domenichini et al. (1993); la larghezza delle strade è stata posta pari a 7 m.



Livello d'intensità	$\mu_D$ (limite inferiore)	$\mu_D$ (limite superiore)	$CRR_{d,min}$	$CRR_{d,max}$
$0 < v_{slope} \leq T_1$	0,000	0,203	0,0175	0,0484
$T_1 < v_{slope} \leq T_2$	0,203	0,705	0,0484	0,1248
$T_2 < v_{slope} \leq T_3$	0,705	1,882	0,1248	0,4624
$v_{slope} > T_3$	1,882	-	0,4624	1,0000

## Analisi dell'evoluzione del danno mediante immagini d'archivio di Google Street View



2009



2018

$t^*$  = tempo medio necessario al completo sviluppo del danno (cioè da  $D_0$  a  $D_3$ ) in almeno una delle sezioni stradali all'interno del periodo di osservazione (da settembre 2008 al giugno 2018 = 9,9 anni).

$$t^* = 7,4 \text{ anni}$$

**Il Rischio è stato stimato su base quantitativa. Esso è compreso tra un valore minimo ( $R_{(RS),min}$ ) e uno massimo ( $R_{(RS),max}$ ) in accordo con le seguenti equazioni:**

$$R_{(RS),min} = \left[ P_{(F),0} \frac{\sum_{b=1}^A L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{0,min} + P_{(F),1} \frac{\sum_{b=1}^B L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{1,min} + P_{(F),2} \frac{\sum_{b=1}^C L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{2,min} + P_{(F),3} \frac{\sum_{b=1}^D L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{3,min} \right] \cdot \left( \frac{L_{ts}}{L_{rs}} \right) \cdot L_{rs} \cdot CU^*$$

$$R_{(RS),max} = \left[ P_{(F),0} \frac{\sum_{b=1}^A L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{0,max} + P_{(F),1} \frac{\sum_{b=1}^B L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{1,max} + P_{(F),2} \frac{\sum_{i=1}^C L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{2,max} + P_{(F),3} \frac{\sum_{b=1}^D L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{3,max} \right] \cdot \left( \frac{L_{ts}}{L_{rs}} \right) \cdot L_{rs} \cdot CU^*$$

$L_b$  = lunghezza (in metri) del b-esimo buffer coperto dai dati PSI (essendo A, B, C, D il numero totale di buffer associati a frane a cinematica lenta di intensità trascurabile, bassa, moderata o alta)

$L_{DInSAR}$  = lunghezza complessiva (in metri) dei buffer coperti da dati PSI

$L_{ts}$  = lunghezza complessiva (in metri) dell'intero campione di tratti stradali esposti

$L_{rs}$  = lunghezza complessiva (in metri) dell'intera rete stradale

$P_{(F),d}$  = probabilità di accadimento di frane a cinematica lenta aventi un assegnato livello di intensità

$CRR_{i,min}$  e  $CRR_{i,max}$  = rispettivamente corrispondenti ai valori più bassi e più alti di  $\mu_D$  per i livelli d'intensità ottenuti

$CU^*$  = costo unitario (CU) di ricostruzione da riferire al tempo  $t^*$  (in anni)

$$R_{(RS),min} = 981.133 \text{ €}$$

$$R_{(RS),max} = 2.338.276 \text{ €}$$

## Ricadute

### *Uso del QRA per fini gestionali*

Le autorità preposte potrebbero decidere di mitigare il rischio riducendo la pericolosità delle frane a cinematica lenta interagenti con le sezioni stradali coperte da dati DInSAR e aventi un livello d'intensità elevata con interventi di stabilizzazione. Le equazioni del QRA consentono di pervenire a valori di rischio residuo massimo e minimo (mantenendo fissi i valori soglia dei livelli di intensità e ponendo la probabilità  $P_{(F),3} = 0$ ).

$$R_{(RS),\min} = \left[ P_{(F),0} \frac{\sum_{b=1}^A L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{0,\min} + P_{(F),1} \frac{\sum_{b=1}^B L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{1,\min} + P_{(F),2} \frac{\sum_{b=1}^C L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{2,\min} + P_{(F),3} \frac{\sum_{b=1}^D L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{3,\min} \right] \cdot \left( \frac{L_{ts}}{L_{rs}} \right) \cdot L_{rs} \cdot CU^*$$

$$R_{(RS),\max} = \left[ P_{(F),0} \frac{\sum_{b=1}^A L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{0,max} + P_{(F),1} \frac{\sum_{b=1}^B L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{1,max} + P_{(F),2} \frac{\sum_{i=1}^C L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{2,max} + P_{(F),3} \frac{\sum_{b=1}^D L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{3,max} \right] \cdot \left( \frac{L_{ts}}{L_{rs}} \right) \cdot L_{rs} \cdot CU^*$$

$$R_{(RS),res-min} = 233.255 \text{ €} (-67,8\%)$$

$$R_{(RS),res-max} = 753.147 \text{ €} (-76,2\%)$$

- ✓ Con riferimento ad un caso di studio nella Regione Campania, le analisi con l'ausilio di dati DInSAR ad altissima risoluzione e di informazioni sulla severità del danno hanno condotto alla **stima quantitativa** – a grande scala (1:5.000) – del rischio (**QRA**) per una rete stradale esposta a frane a cinematica lenta.
- ✓ La **probabilità di accadimento di frane a cinematica lenta di assegnata intensità è stata stabilita** sulla base di curve empiriche di fragilità.

### Sviluppi

**Applicazione del QRA a scala di dettaglio** a condizione che vengano acquisiti dati di maggiore qualità e quantità sia per le singole frane a cinematica lenta sia per i singoli tratti stradali esposti. Ciò consentirebbe di stilare una **classifica dei tratti per i quali è prioritaria la mitigazione del rischio** e di pervenire a una corretta scelta/progettazione degli interventi.

### Bibliografia

- ✓ Peduto D., Nicodemo G., Luongo D., Borrelli L., Reale D., Ferlisi S., Fornaro G., Gullà G. (2025). *Multi-source data-based quantitative risk analysis of road networks to slow-moving landslides*. **Engineering Geology** 350 (2025) 108011, pages 1-27, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108011>.
- ✓ Ferlisi S., Marchese A., Peduto D. (2021) *Quantitative analysis of the risk to road networks exposed to slow-moving landslides: a case study in the Campania region (southern Italy)*. **Landslides**, 18(1): 303-319, ISSN 1612-510X, DOI 10.1007/s10346-020-01482-8.
- ✓ Ferlisi, S.; Marchese, A.; Nicodemo, G.; Peduto, D (2021) Analisi del rischio da frane a cinematica lenta per le reti stradali. In: La Geotecnica per lo sviluppo sostenibile del territorio e per la tutela dell'ambiente Roma Associazione Geotecnica Italiana Vol.1, Pag.285-304, ISBN:9788897517146.



Consiglio Nazionale  
delle Ricerche



Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica



CONSIGLIO NAZIONALE  
DEI GEOLOGI



I CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI INGEGNERI



FONDAZIONE  
CONSIGLIO NAZIONALE INGEGNERI  
**ISPRRA**  
Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale



AUTONOME  
PROVINZ  
BOZEN  
SÜDTIROL

PROVINCIA AUTONOMA  
DI BOLZANO  
ALTO ADIGE  
  
Région Autonome  
Valle d'Aoste  
Regione Autonoma  
Valle d'Aosta

PROVINCIA AUTONOMA  
DI TRENTO  
  
PROVINCIA AUTONOMA  
DI TRENTO  
Valle d'Aoste  
Regione Autonoma  
Valle d'Aosta

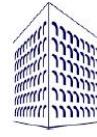


REGIONE AUTONOMA  
FRIULI VENEZIA GIULIA

**ARPA** LOMBARDIA  
Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI MILANO  
BICOCCA



Ordine degli Ingegneri  
della Provincia  
di Roma



## *Analisi del rischio da frane a cinematica lenta per le reti stradali*

---

# Grazie per l'attenzione

---



**Dario PEDUTO, PhD**  
Professore Associato di Geotecnica  
Dipartimento di Ingegneria Civile - DICIV  
Università di Salerno  
Via Giovanni Paolo II, 132 - 84084  
[www.unisa.it](http://www.unisa.it) - [dpeduto@unisa.it](mailto:dpeduto@unisa.it)