



Ministero  
dei beni e delle  
attività culturali  
e del turismo



PAESAGGI SICURI: Strategie di prevenzione e adattamento

Accordo

tra

Segretariato Regionale del Ministero dei Beni e delle  
Attività Culturali e del Turismo della Liguria

e

Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica  
del Consiglio Nazionale delle Ricerche

## **RAPPORTO SU “AZIONE 2 – ATTIVITÀ C Validazione e verifica dei risultati della modellazione”**



## AUTORI

Il documento è stato redatto da:

- Mauro Rossi
- Michele Santangelo
- Ivan Marchesini
- Massimiliano Alvioli
- Francesco Bucci
- Mauro Cardinali
- Fausto Guzzetti
- Federica Fiorucci

Tutte le persone sopra riportate sono ricercatori presso la sede di Perugia dell'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).



## INDICE

AUTORI .....	2
INDICE.....	3
SOMMARIO.....	4
DOCUMENTI APPLICABILI E DI RIFERIMENTO .....	5
ABBREVIAZIONI E ACRONIMI .....	6
1 APPROCCI E DATI UTILIZZATI NELLE ATTIVITÀ DI VALIDAZIONE E VERIFICA	7
2 FRANE DI TIPO SCIVOLAMENTO.....	10
3 FRANE DI TIPO CROLLO .....	12
4 FRANE DI TIPO COLATA.....	15
5 CONSIDERAZIONI FINALI .....	17
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	18



## SOMMARIO

Obiettivo del documento è descrivere le attività di validazione e verifica dei risultati della modellazione della suscettibilità e pericolosità posta da differenti tipologie di frana (frane superficiali o di scivolamento, colate, crolli) realizzate nelle aree di studio del progetto e descritte nel documento [DR-003]. Parte delle attività di validazione e verifica già riportate in tale documento verranno riprese e dove necessario ampliate.

Il documento descrive inizialmente gli approcci e i dati utilizzati per la validazione e verifica dei risultati modellistici (Capitolo 1). Successivamente il documento elenca i risultati delle attività di validazione e verifica e le relative considerazioni per le frane di tipo scivolamento (Capitolo 2), crollo (Capitolo 3) e colata rapida (Capitolo 4). Il Capitolo 5 sintetizza alcune considerazioni finali, mentre Il Capitolo 6 riporta la bibliografia di riferimento.



## DOCUMENTI APPLICABILI E DI RIFERIMENTO

- DA-001      Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, del 27 febbraio 2004. Indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del sistema di allertamento nazionale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile. Supplemento ordinario n. 39 alla Gazzetta Ufficiale n. 59 del 11 marzo 2004
- DA-002      Accordo di Programma quadro tra la Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, e il Consiglio Nazionale delle Ricerche, del 8 giugno 2011.
- DA-003      Accordo tra il Segretariato Regionale del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo della Liguria e l'istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Firmata digitalmente il 15 febbraio 2017. Oggetto: Sito UNESCO "Porto Venere, Cinque Terre e Isole (Palmaria, Tino e Tinetto)" Progetto Paesaggi Sicuri: strategie di prevenzione e adattamento.
- DR-001      Rapporto su "Azione 1 – attività a: raccolta e organizzazione dei dati e delle informazioni disponibili nelle banche dati regionali, degli enti e degli istituti di ricerca che hanno cooperato nel tempo con la regione Liguria circa il censimento dei fenomeni franosi e delle aree di instabilità nella zona del sito UNESCO". Accordo tra il Segretariato Regionale del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo della Liguria e il CNR IRPI. Versione 1.1, dell'8 marzo 2017, 5 pp.
- DR-002      Rapporto su "Azione 2 – Attività A: Identificazione della Modellistica ottimale per i differenti tipi di dissesto idrogeologico". Accordo tra il Segretariato Regionale del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo della Liguria e il CNR IRPI. Versione 1.0, dell'8 maggio 2017, 30 pp.
- DR-003      Rapporto su "Azione 2 – Attività B: Modellazione della pericolosità posta dai differenti tipi di frana (frane superficiali, colate, crolli) presenti nell'area di studio". Accordo tra il Segretariato Regionale del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo della Liguria e il CNR IRPI. Versione 1.0, dell'8 dicembre 2018, 46 pp.



## ABBREVIAZIONI E ACRONIMI

CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
IFFI	Inventario Fenomeni Franosi in Italia
IRPI	Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational Scientific and Cultural Organization</i>



## 1 APPROCCI E DATI UTILIZZATI NELLE ATTIVITÀ DI VALIDAZIONE E VERIFICA

La complessità e le differenze delle diverse tipologie di frana (scivolamenti, crolli, colate) presenti nell'area oggetto di studio (corrispondente con una parte del sito UNESCO Porto Venere, Cinque Terre e Isole), non hanno consentito di utilizzare un singolo approccio modellistico. Come già descritto nel documento [DR-003], gli approcci modellistici sono stati selezionati in funzione:

1. della finalità e del possibile utilizzo dell'analisi;
2. dell'estensione dell'area di studio;
3. della qualità e tipologia di dati in input disponibili;
4. della coerenza spaziale e confrontabilità dei risultati;
5. dell'esperienza del modellatore nell'utilizzo dello specifico approccio modellistico;
6. della disponibilità dei *software* di modellazione.

In particolare:

- per gli scivolamenti (*Slide*) è stata realizzata una zonazione della suscettibilità basata su una modellazione di tipo statistico utilizzando il *software* LAND-SE (Rossi et al., 2010; Rossi and Reichenbach, 2016);
- per i crolli (*Fall*) ed in particolare per le cadute massi, è stata realizzata una zonazione della suscettibilità basata su una modellazione fisicamente basata utilizzando il *software* STONE (Guzzetti et al., 2004, 2002); nella modellazione sono state stimate anche la velocità e l'altezza massima raggiunta dai blocchi nelle simulazioni informazioni utili alla stima della pericolosità;
- per le colate (*Flow*) è stata realizzata una zonazione della suscettibilità basata su una modellazione concettuale utilizzando il *software* "r.randomwalk" (Mergili et al., 2015).

Tali modelli sono stati eseguiti ripetutamente (i.e. attraverso diverse *simulazioni* o *ensemble* di modelli) simulando diverse assunzioni modellistiche e simulando possibili variazioni dei parametri di input. Come in precedenza si ribadisce che differenti modelli e *software* di modellazione sono disponibili nel mercato e nella letteratura scientifica e che da essi si possono ottenere risultati anche significativamente differenti. Questo è particolarmente applicabile nei casi in cui siano realizzate modellazioni ad una diversa scala spaziale o su siti specifici o su singoli versanti per i quali si dispone di informazioni puntuali di tipo geotecnico ed idrologico. Si ribadisce inoltre che anche la risoluzione spaziale dei dati di input disponibili può influire significativamente sui risultati modellistici.

Le attività di verifica e validazione, o più in generale le attività di valutazione di un modello dovrebbero prevedere, ove possibile, il confronto dei risultati modellistici con dati di



*benchmark* raccolti nelle zone modellate. In generale, nel caso di modelli di suscettibilità da frana, il *benchmark* da utilizzare nel confronto è costituito da dati sulla occorrenza di frana nelle aree di studio ed in particolare da carte inventario dei fenomeni franosi. A partire da tale confronto, per una corretta ed esaustiva valutazione di un modello devono essere fornite:

- i. misure del grado di *fitting* del modello (capacità del modello di “predire” i dati originali),
- ii. misure delle performance del modello in fase di validazione (capacità del modello di “predire” dati indipendenti spazialmente o temporalmente);

Per le valutazioni di cui ai punti (i) e (ii) sono in genere utilizzate diverse metriche: tabelle di contingenza (o matrici di confusione), grafici di contingenza (grafici *Fourfold*), mappe degli errori, curve ROC (*Receiver Operating Characteristic*) con relativa stima dell'area sottesa da tali curve ( $AUC_{ROC}$ ), grafici di variazione dei valori di sensibilità (hit rate), specificità (true negative rate) e del coefficiente kappa di Cohen (Fawcett, 2006), e curve del tasso di successo e predizione (*success rate* e *prediction rate curve*; (Chung and Fabbri, 1999)).

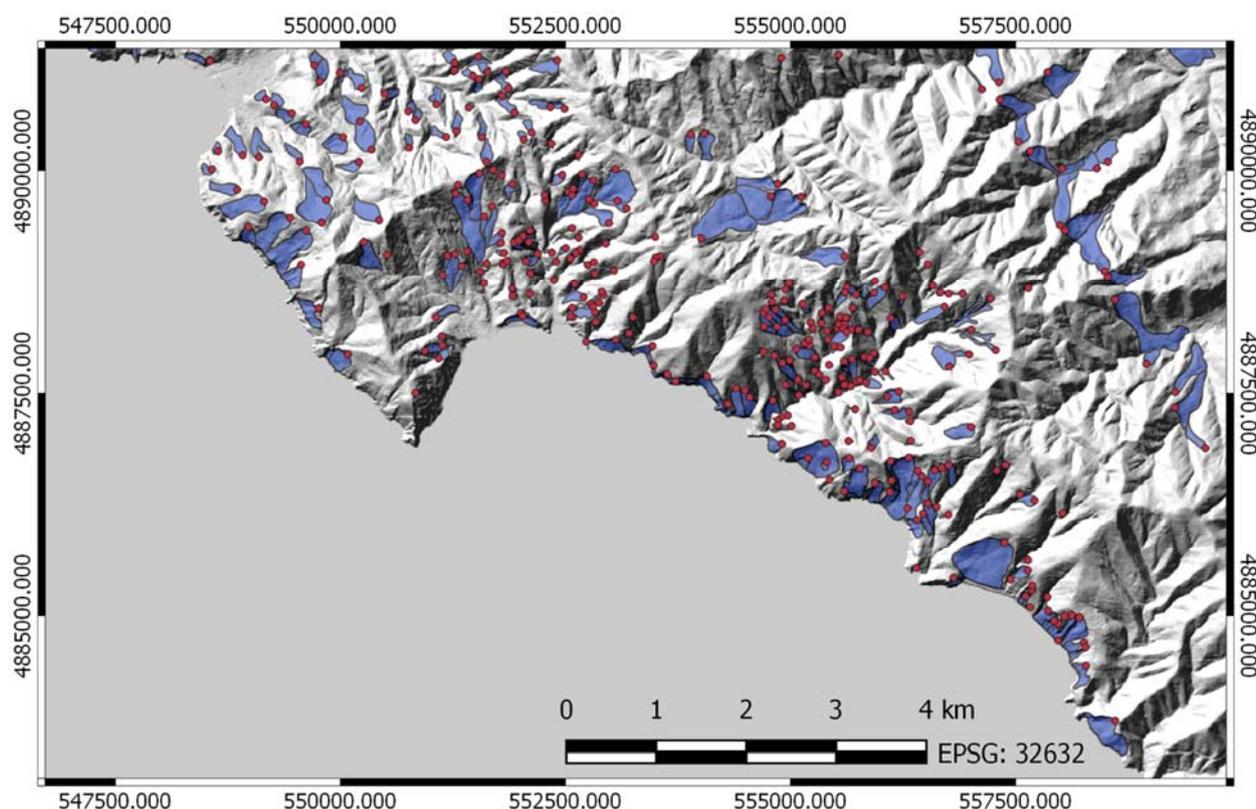


Figura 1. Estratto dell'inventario IFFI della Regione Liguria. Poligoni blu: corpi di frana. Punti rossi: punto identificativo frana.

Come descritto nel Capitolo §2.3 del documento [DR-003] per la zona oggetto di studio si disponeva della carta inventario dei fenomeni franosi realizzata dalla Regione Liguria a scala 1:10000 nell'ambito del Progetto IFFI. La mappa visibile in Figura 1, riporta sia i



poligoni di frana che i relativi punti di identificazione (PIF). Tali informazioni sono state utilizzate in sede di modellazione in modi differenti:

- i. i poligoni relativi alle frane di scivolamento (che sono in maggioranza) sono state utilizzate come variabile dipendente o di raggruppamento (variabile da predire) del modello di suscettibilità statistico per le frane di scivolamento (Capitolo §3 del [DR-003]);
- ii. i poligoni corrispondenti alle frane di tipo colata rapida (molto limitati nell'area di studio) sono stati utilizzati per l'identificazione delle aree sorgenti di colata e per la calibrazione del modello di suscettibilità per le colate rapide (Capitolo §5 del [DR-003]).

Nell'inventario utilizzato non sono presenti informazioni ufficiali su crolli anche se la loro occorrenza è possibile nell'area di studio, pertanto per la loro modellazione sono stati assunti parametri modellistici sulla base di valutazioni euristiche e sulla similitudine tra le litologie affioranti nell'area di studio e quelle precedentemente modellate in aree differenti (Capitolo §4 del [DR-003]).

Vista la differenza dei dati di frana a disposizione nell'area di studio per le tre differenti tipologie di frana, sono state realizzate attività di verifica e validazione differenziate e in particolare:

- a. per i modelli di suscettibilità per frane di tipo scivolamento sono state eseguite valutazioni quantitative utilizzando differenti metriche statistiche (largamente descritte nel Capitolo §3 del [DR-003]) e valutazioni qualitative riportate nel **Capitolo §2** del presente documento;
- b. per i modelli di suscettibilità per frane di tipo crollo sono state eseguite valutazioni qualitative riportate nel **Capitolo §3** del presente documento;
- c. per i modelli di suscettibilità per frane di tipo colata rapida sono state eseguite valutazioni qualitative riportate nel **Capitolo §4** del presente documento.



## 2 FRANE DI TIPO SCIVOLAMENTO

Le performance dei modelli di suscettibilità singoli (LDA, QDA, LRM) e combinato (CFM) per le frane di tipo scivolamento sono state analizzate in termini di (i) curve ROC e aree sottese dalla curva AUCROC (Figura 6 in [DR-003]) e (ii) in termini di grafici e tabelle di contingenza (Figura 7 in [DR-003]). L'area sottesa dalla curva ROC ( $AUC_{ROC}$ ) è un indice della performance dei modelli di suscettibilità, un valore uguale a 1 indica una perfetta predizione dei dati osservati, un valore di 0.5 indica una pessima performance del modello, un valore minore di 0.5 indica una predizione invertita. I valori di  $AUC_{ROC}$  calcolati mostrano una migliore performance del modello combinato sia in calibrazione che in validazione avendo rispettivamente i seguenti valori:

- Modello CFM  $AUC_{ROC}$  0.724 sia in calibrazione che in validazione;
- Modello QDA  $AUC_{ROC}$  0.720 in calibrazione e 0.721 in validazione;
- Modello LRM  $AUC_{ROC}$  0.704 sia in calibrazione che in validazione;
- Modello LDA  $AUC_{ROC}$  0.703 sia in calibrazione che in validazione.

Da tali valori già riportati in [DR-003], pur se con differenze minime il modello CFM è risultato il migliore, seguito dai modelli singoli QDA, LRM e LDA. In funzione del valore  $AUC_{ROC}$  tale modello risulta buono ma non ottimo.

A seguito di tali analisi quantitative basata sull'analisi della carta inventario di frana esistente, si è proceduto ad una analisi qualitativa in ambiente GIS verificando le predizioni modellistiche in diversi contesti geomorfologici. Tale analisi ha avuto lo scopo di verificare a campione e in maniera euristica la bontà del modello di suscettibilità, in quei luoghi ove la cartografia delle frane esistente sembrava lacunosa.

In Figura 2 si riportano alcuni esempi di corrette predizioni del modello di suscettibilità di zone instabili in assenza di frane mappate nella carta inventario IFFI della Regione Liguria (Poligoni blu: corpi di frana; Punti rossi: punto identificativo frana, PIF). Da tali esempi si intuisce come la carta inventario esistente in alcuni punti sia incompleta. È infatti ragionevole ritenere che la carta inventario utilizzata, realizzata a scala regionale per tutto il territorio ligure, possa riportare solo una parte di tutte le frane presenti nel territorio. Tale campione di frana comunque da un lato può risultare rappresentativo (dal punto di vista statistico) della franosità esistente e quindi utile e significativo per la generazione del modello di suscettibilità, dall'altro può non essere idoneo alle stime delle performance in validazione in particolare nei posti dove le frane sono presenti ma non sono mappate. Tale problema si può riflettere sui valori di  $AUC_{ROC}$  diminuendoli e sui valori della tabella di contingenza aumentando i valori dei *False Positive* (FP corrispondenti a zone predette in frana con assenza di frane osservate) e diminuendo quello dei *True Positive* (TP corrispondenti alle zone instabili correttamente predette dal modello). Avendo a disposizione una migliore e più completa carta di inventario delle frane è lecito attendersi da un lato un risultato modellistico



della suscettibilità simile o leggermente migliore, dall'altro un sensibile miglioramento dei valori rappresentativi delle performance dei modelli.

Per le ragioni sopra esposte si ritiene che il modello di suscettibilità da frana di tipo scivolamento generato sia buono anche se le performance espresse dai valori di AUC<sub>ROC</sub> e dai valori della tabella di contingenza, riportati nel presente capitolo e nel Capitolo §3 del [DR-003], non sono elevatissimi.

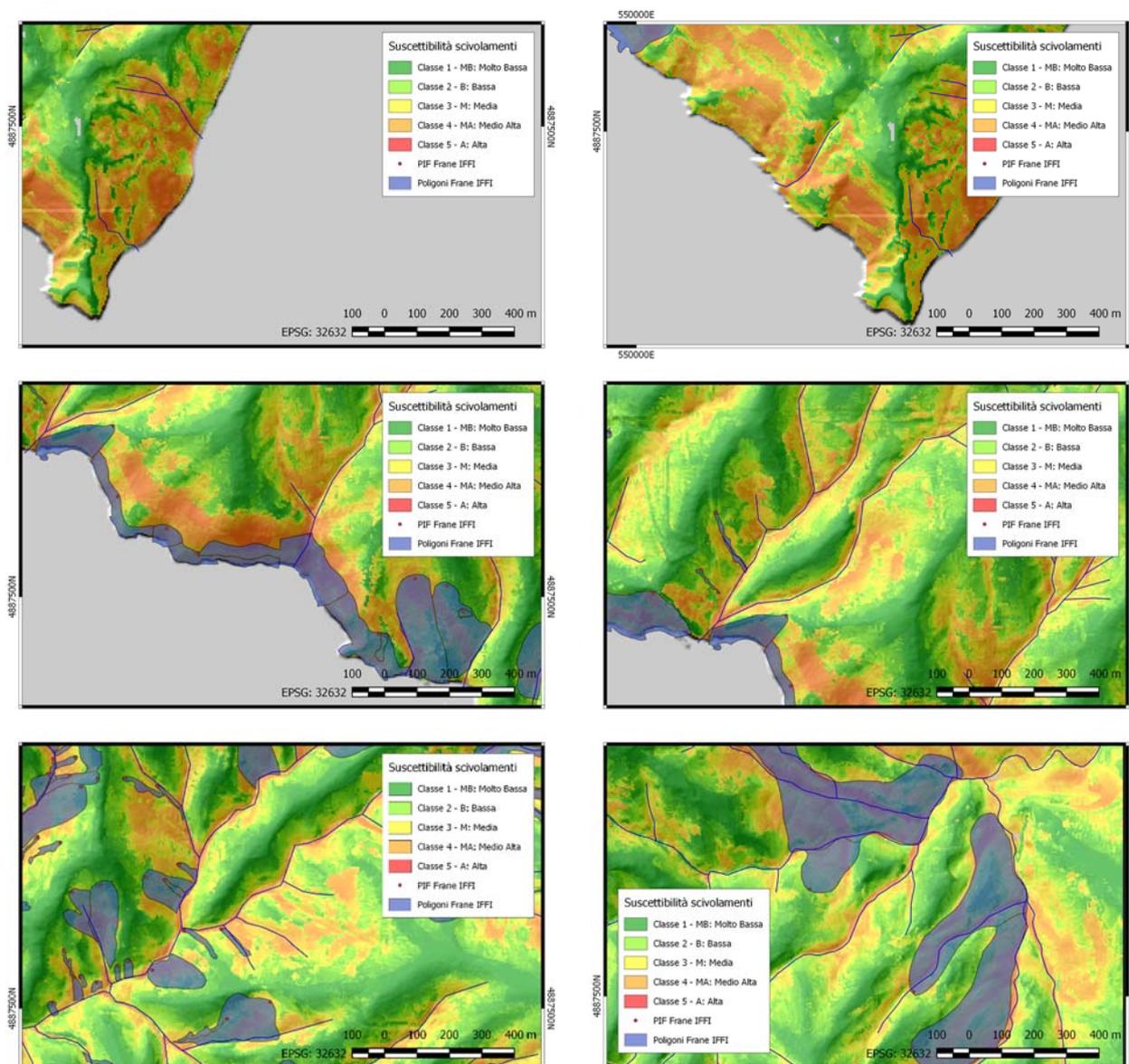


Figura 2. Esempi di corrette predizioni del modello di suscettibilità di zone instabili (campiture dall'arancione al rosso) in assenza di frane mappate nella carta inventario IFFI della Regione Liguria (Poligoni blu: corpi di frana; Punti rossi: punto identificativo frana, PIF).



### 3 FRANE DI TIPO CROLLO

Nella carta inventario IFFI non sono presenti informazioni ufficiali su aree sorgenti e accumuli di crolli anche se la loro occorrenza è possibile nell'area di studio. La mancanza di tali informazioni ha reso da un lato impossibile eseguire una specifica calibrazione del modello sull'area di studio dall'altro ha reso impossibile realizzare attività di verifica e validazione quantitative.

Il problema relativo alla calibrazione del modello di suscettibilità da crollo in mancanza di dati osservati relativi alle aree sorgenti e di accumulo è stato risolto nel seguente modo. Le aree sorgenti utilizzate dal modello come zone di distacco dei massi (zone dalle quali i massi iniziano a muoversi) sono state individuate selezionando celle con pendenza superiore a 45° e curvature tangenziali e di profilo positive. Cautelativamente le aree sorgenti sono state individuate in tutte le possibili classi di uso del suolo (anche laddove erano presenti aree coperte da foreste, da oliveti o da altri seminativi arborati). I parametri modellistici per la simulazione delle traiettorie e la determinazione delle zone di accumulo sono stati selezionati sulla base di valutazioni euristiche e sulla similitudine tra le litologie affioranti nell'area di studio e quelle precedentemente modellate in aree differenti (Capitolo §4 del [DR-003]). Date le scelte effettuate è lecito quindi attendersi possibili differenze tra risultati ottenuti dal modello utilizzato rispetto ad un modello ottimale specificamente calibrato nell'area di studio.

L'assenza di dati osservati come già accennato in precedenza non ha permesso una valutazione quantitativa, pertanto si è proceduto ad una analisi qualitativa in ambiente GIS verificando le previsioni modellistiche in diversi contesti geomorfologici e di copertura del suolo. Tale analisi ha avuto lo scopo di verificare a campione e in maniera euristica la bontà del modello di suscettibilità.

Come visibile in Figura 3, il modello predice ampie aree suscettibili a crollo lungo la linea di costa (dove risulta elevata anche la suscettibilità a frane di tipo scivolamento). Tali previsioni risultano ragionevoli anche in funzione della pendenza molto elevata che caratterizza tali aree. Si ritiene quindi che qualora in queste zone siano presenti massi in condizioni di instabilità, la mappa identifica ragionevolmente le aree a maggiore suscettibilità.

Con una estensione molto più limitata, il modello predice aree suscettibili a crollo anche lungo i principali impluvi e lungo le zone di testata di bacino (Figura 4). Tali zone caratterizzate da alta pendenza sono in genere in corrispondenza di aree coperte da foreste, da oliveti o da altri seminativi arborati considerate anch'esse cautelativamente in sede di individuazione delle aree sorgenti. In tali condizioni, le previsioni della mappa di suscettibilità a frane di crollo sono peggiorative ma cautelative e rappresentano le condizioni di predisposizione al dissesto in caso di rimozione della vegetazione.



## PAESAGGI SICURI: Strategie di prevenzione e adattamento

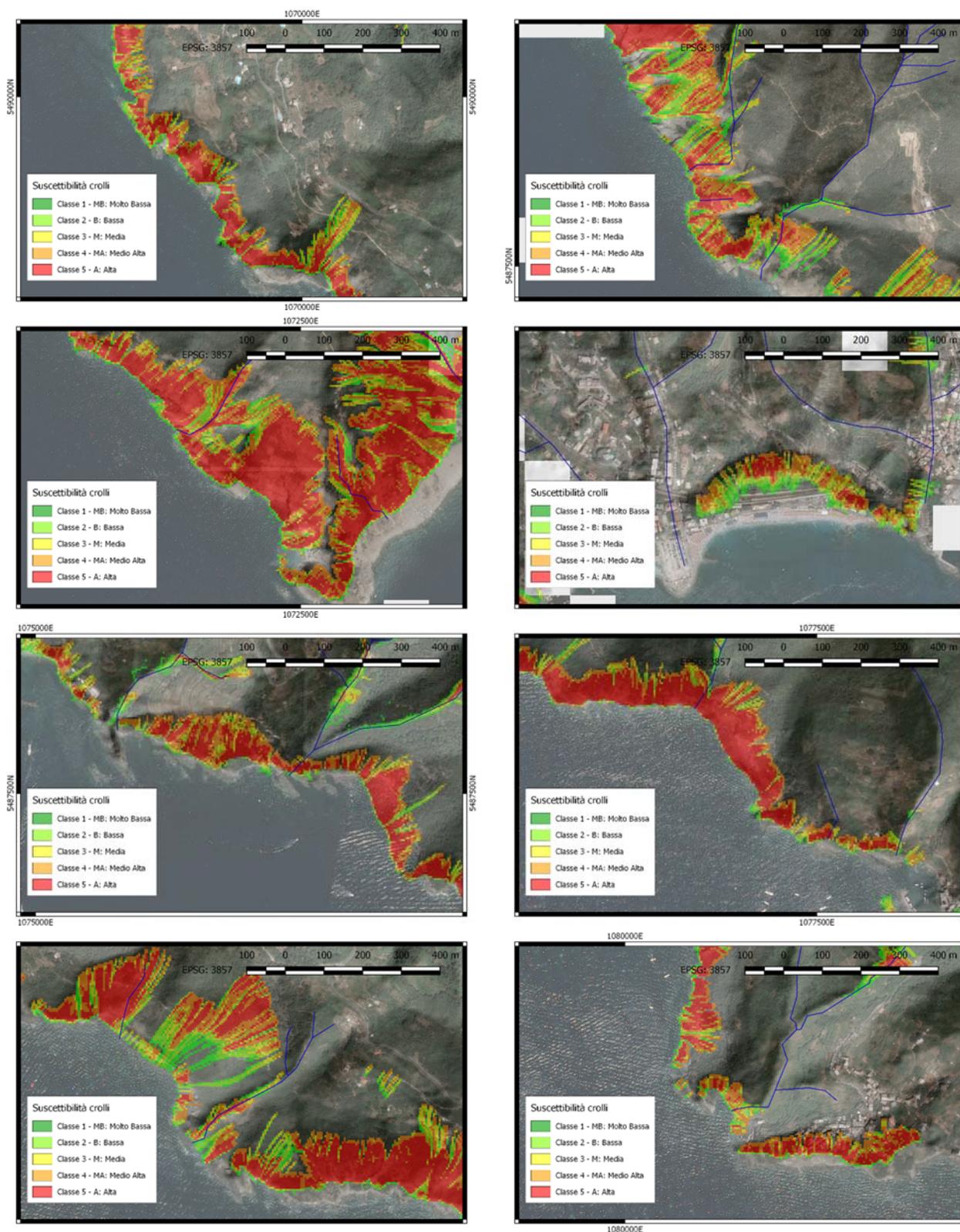


Figura 3. Esempi di aree suscettibili a crollo (campiture dall'arancione al rosso) lungo la linea di costa in corrispondenza di zone a pendenza molto elevata.



## PAESAGGI SICURI: Strategie di prevenzione e adattamento

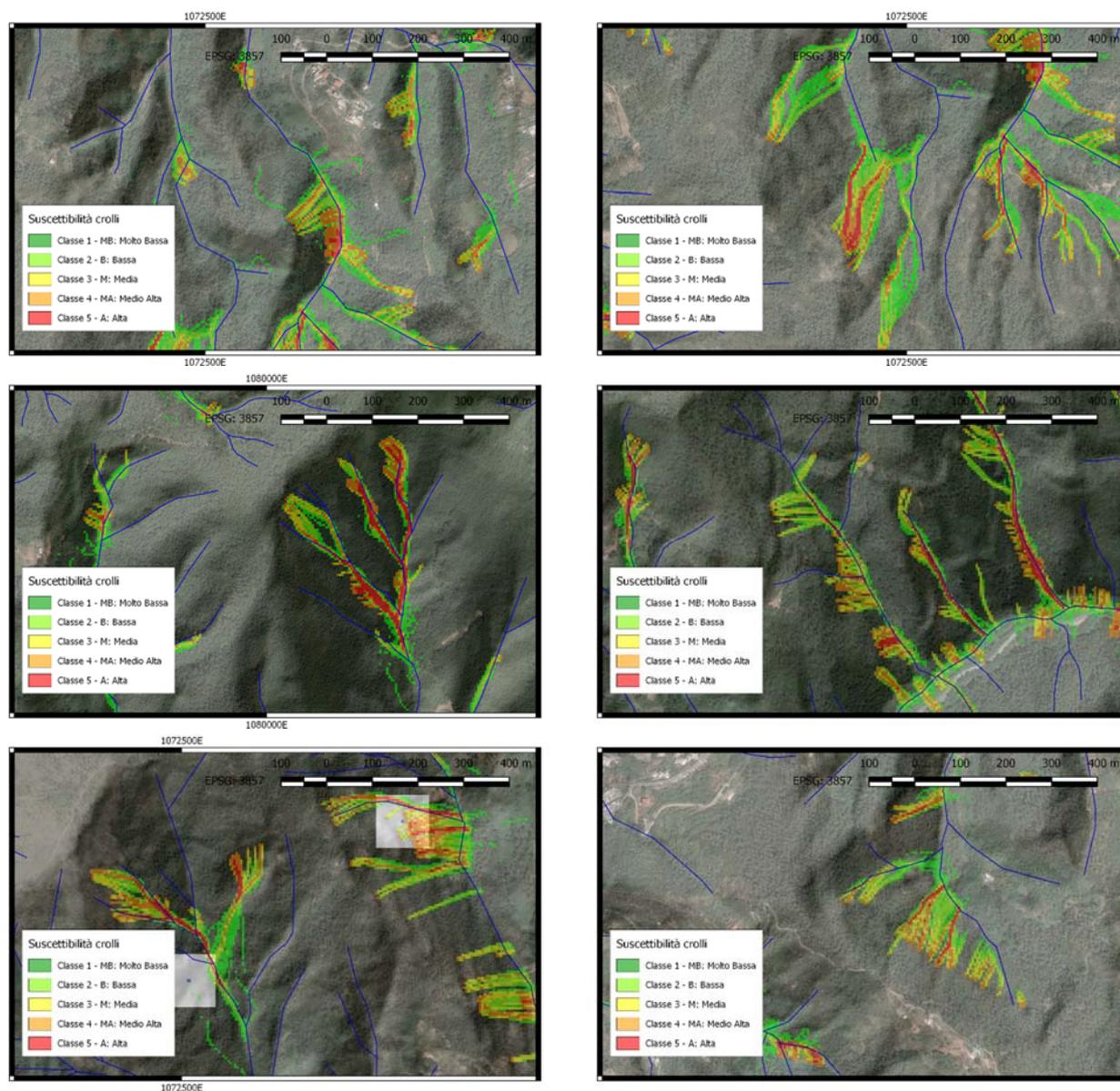


Figura 4. Esempi di aree suscettibili a crollo (campiture dall'arancione al rosso) lungo i principali impluvi e lungo le zone di testata di bacino.



## 4 FRANE DI TIPO COLATA

Nella carta inventario IFFI le informazioni ufficiali sulle colate sono molto limitate, anche se in realtà dovrebbero essere molto diffuse come testimoniano i recenti eventi occorsi nell'area di studio. Le informazioni di colata esistenti mappate come poligoni sono stati utilizzati per l'identificazione delle aree sorgenti di colata e per la calibrazione del modello di simulazione di colata rapida (Capitolo §5 del [DR-003]). La mancanza di informazioni rappresentative su tutta l'area di studio ha comunque reso impossibile realizzare attività di verifica e validazione quantitative.

In analogia alle altre due tipologie di frana sopra descritte è stato comunque possibile analizzare qualitativamente in ambiente GIS le predizioni modellistiche del modello di suscettibilità a frane di tipo colata rapida in diversi contesti geomorfologici. Tale analisi ha avuto lo scopo di verificare a campione e in maniera euristica la bontà del modello di suscettibilità. La Figura 5 mostra alcuni esempi di aree suscettibili a colata (campiture dall'arancione al rosso):

- I. lungo i principali impluvi in corrispondenza di eventi di colata mappati dalla carta inventario IFFI (mappe nella prima e seconda riga);
- II. lungo i principali impluvi in assenza di eventi di colata mappati dalla carta inventario IFFI (mappe nella terza riga);
- III. lungo la linea di costa in presenza e in assenza di eventi di colata mappati dalla carta inventario IFFI (mappe nella quarta riga).

Ove presenti i poligoni di frana di tipo colata mappati nella carta inventario IFFI (poligoni lunghi e stretti), sembrano ben corrispondere alle aree di maggiore suscettibilità a colata predette dal modello (campiture dall'arancione al rosso). Il modello tuttavia predice zone suscettibili a frane di tipo colata in modo molto più esteso rispetto a quanto riportato nella carta inventario. Tali aree sono previste prevalentemente nelle zone di impluvio lungo le principali valli a distanza dalla costa, ma anche lungo gli impluvi che drenano direttamente in mare. Le aree distanti dalla costa risultano talora in corrispondenza di foreste, oliveti o altri seminativi arborati incluse anch'esse in sede di modellazione; in presenza di tali coperture le previsioni della mappa di suscettibilità a frane di tipo colata sono peggiorative ma cautelative e rappresentano le condizioni di predisposizione al dissesto in caso di rimozione della vegetazione.

Da una analisi geomorfologica qualitativa, le suddette predizioni risultano ragionevoli in quanto localizzate in aree caratterizzate da una morfologia compatibile con quelle solitamente riscontrate in altre località prossime a questa area di studio e dell'Appennino. In base alle medesime considerazioni è lecito ritenere che la mappatura delle colate in IFFI sia alquanto lacunosa. Si ritiene infine possibile che le aree suscettibili a colata possano subire sensibili variazioni qualora il modello che le ha generate sia calibrato con informazioni di maggior dettaglio ed accuratezza spaziale.



## PAESAGGI SICURI: Strategie di prevenzione e adattamento

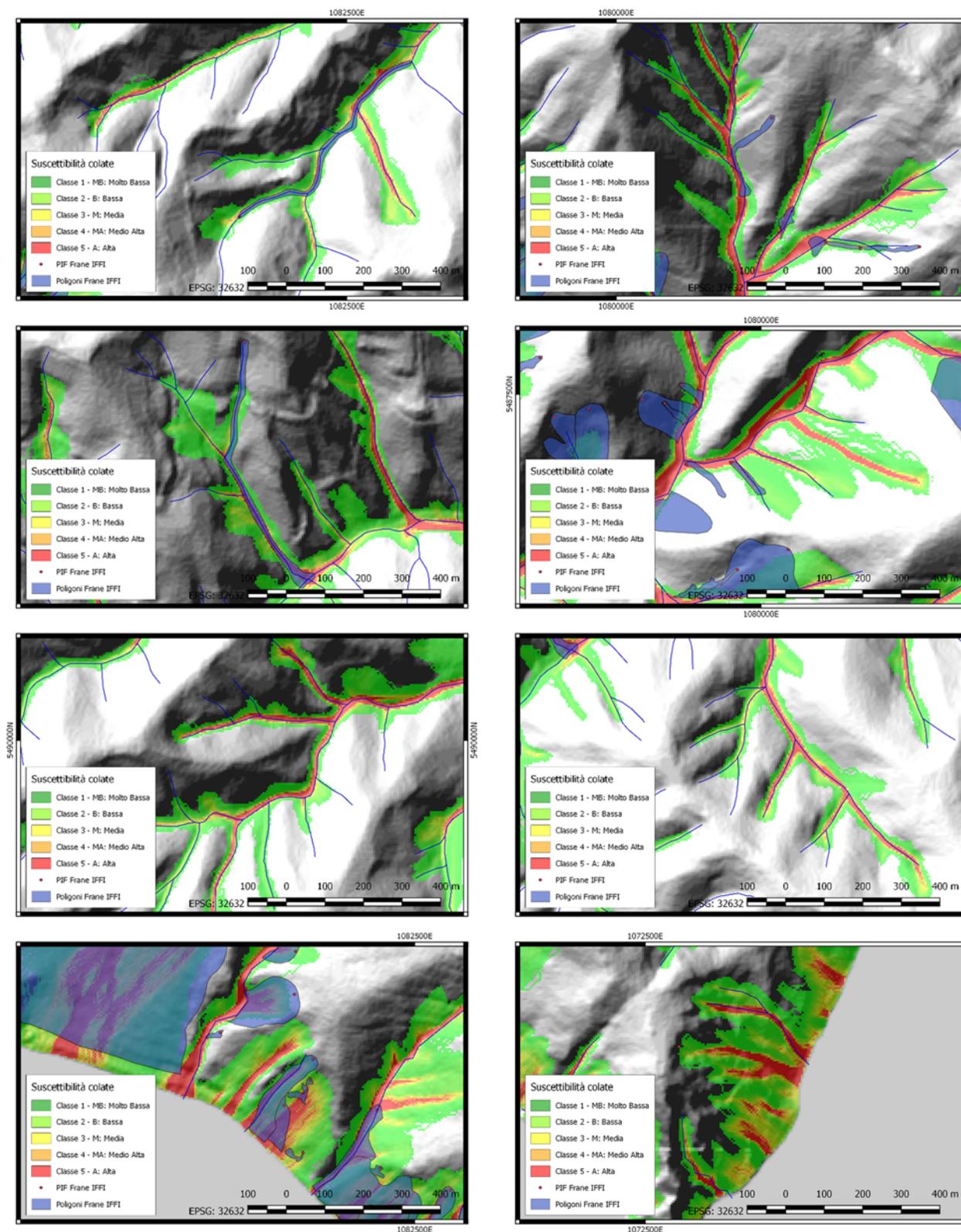


Figura 5. Esempi di aree suscettibili a colata (campiture dall'arancione al rosso) lungo i principali impluvi.



## 5 CONSIDERAZIONI FINALI

Nel presente documento sono descritti i test effettuati per la valutazione di modelli di suscettibilità per diverse tipologie di frana. I risultati dei singoli modelli in termini di suscettibilità ottenuti per le diverse tipologie di frana sono stati valutati ove possibile quantitativamente e qualitativamente. Dalle valutazioni effettuate risulta ragionevole affermare che i modelli di suscettibilità realizzati siano in diversa misura rappresentativi delle reali condizioni di propensione al dissesto del territorio.

Per tutte le tipologie di frana mappate ed in particolare per le frane di tipo crollo e colata, si ritiene che la modellazione effettuata debba essere considerata una modellazione di massima, funzionale prevalentemente alla individuazione delle zone di suscettibilità più critiche all'interno dell'area di studio. Si ricorda inoltre che nella modellazione delle frane di tipo crollo e colata, le zone ricoperte da vegetazione (foreste, oliveti, seminativi arborati) sono state considerate in analogia alle altre, pertanto in presenza di tali coperture le previsioni dei modelli di suscettibilità sono da considerarsi peggiorative, ma cautelative, e rappresentative delle condizioni di predisposizione al dissesto in caso di rimozione della vegetazione.

Si specifica che informazioni topografiche più accurate (DEM a maggior risoluzione spaziale) e informazioni ancillari addizionali (es. informazioni litologiche di maggiore dettaglio) possano permettere una migliore stima della suscettibilità.

Si ritiene inoltre che l'aggiunta di informazioni sull'occorrenza di frana di maggior accuratezza spaziale, temporale e tematica (es. realizzazione di inventari multi-temporali per diverse tipologie di frana) possa contribuire significativamente sia ad una migliore calibrazione dei modelli che ad una stima corretta delle loro performance predittive.

Si ribadisce infine che tali mappe non possono sostituire studi e analisi specifiche di versante a carattere locale (necessariamente supportate da rilievi e dati in situ), indispensabili qualora si necessiti di informazioni e previsioni di maggior dettaglio sui fenomeni studiati.



## 6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Chung, C.-J.F., Fabbri, A.G., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 65, 1389–1399.
- Fawcett, T., 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognit. Lett.* 27, 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Comput. Geosci.* 28, 1079–1093. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00025-0)
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ghigi, S., 2004. Rockfall Hazard and Risk Assessment Along a Transportation Corridor in the Nera Valley, Central Italy. *Environ. Manage.* 34, 191–208. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0021-6>
- Mergili, M., Krenn, J., Chu, H.-J., 2015. r.randomwalk v1, a multi-functional conceptual tool for mass movement routing. *Geosci. Model Dev.* 8, 4027–4043. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-4027-2015>
- Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A.C., Peruccacci, S., 2010. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. *Geomorphology* 114, 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.020>
- Rossi, M., Reichenbach, P., 2016. LAND-SE: a software for statistically based landslide susceptibility zonation, version 1.0. *Geosci. Model Dev.* 9, 3533–3543. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3533-2016>