

**PROGRAMMA PER IL SUPPORTO  
AL RAFFORZAMENTO DELLA GOVERNANCE  
IN MATERIA DI RIDUZIONE DEL RISCHIO  
AI FINI DI PROTEZIONE CIVILE:**

**RISCHIO IDROGEOLOGICO E IDRAULICO**

**A21\_TI5**

Relazione accompagnatoria della mappa di suscettività da alluvione

18.05.2020



CIMA  
POLIMI  
IRPI  
CAMI lab  
CiNiD

## Azione

A21

**Potenziamento dei sistemi di previsione e di allertamento: mappatura della pericolosità dei fenomeni idrogeologici e idraulici non analizzati nei PAI e/o PGRA**

## Partner

Fondazione Politecnico di Milano

## Autori

**Giovanni Menduni**

**Daniele Bignami**

**Ilaria Boschini**

**Silvano Dal Sasso**

**Michele Del Vecchio**

**Luciana Giuzio**

**Maria Antonia Pedone**

**Danilo Spina**

**Federica Zambrini**

## Note / Dettagli

### **A21\_TI5**

Relazione accompagnatoria della mappa di suscettività da alluvione

## Sommario

Introduzione .....	4
Generalità sulle alluvioni.....	4
Il problema della mappatura .....	4
L'approccio "puramente geomorfologico" .....	5
L'approccio modellistico .....	6
L'uso delle carte PAI/PGRA nella pianificazione di emergenza.....	6
Approcci distinti.....	7
L'analisi di suscettività da alluvione.....	7
Generalità .....	7
Il metodo WoE .....	8
Il modello digitali del terreno .....	9
Il reticolo di drenaggio .....	9
Fattori predisponenti .....	12
Dati di addestramento del modello .....	12
La individuazione di unità territoriali omogenee di riferimento .....	16
La distribuzione spaziale dei depositi alluvionali .....	17
La definizione del dominio di applicazione del metodo .....	19
Applicazione del metodo .....	20
Bibliografia .....	24

## Introduzione

### Generalità sulle alluvioni

Gli eventi alluvionali rappresentano, a livello globale, la tipologia di disastri naturali con maggior frequenza e che hanno interessato il più alto numero di individui nell'ultimo ventennio (EM-DAT; <http://www.emdat.be/>). Sebbene l'aumento della frequenza di questi eventi venga spesso messo in correlazione con i cambiamenti climatici in corso, lo sviluppo economico e sociale delle aree potenzialmente allagabili è il maggiore responsabile dell'aumento dei danni associati a tali eventi (Domeneghetti, Carisi, Castellarin, & Brath, 2015) (Bouwer, Bubeck, & Aerts, 2010).

Circa la metà di tutte le perdite e danni da catastrofi naturali in tutto il mondo è attribuibile alle inondazioni (Kron, 2005). Il servizio meteorologico nazionale degli Stati Uniti riporta che, tra tutte le calamità legate al clima che si verificano nel Paese, le inondazioni sono la principale causa di vittime (French, Ing, Von Allmen, & Wood, 1983). La mappatura dei pericoli e dei rischi di alluvione si rivela la pietra angolare di qualsiasi politica di gestione a diverse scale spaziali e temporali (Merz, Kreibich, Schwarze, & Thielen, 2010).

Considerando la mappatura del rischio di alluvione, vale la pena un cenno alle definizioni. La Comunità europea nella sua "Direttiva sulle alluvioni" (Unione Europea, 2007) propone la definizione, appunto, di "alluvione" nella forma di "la copertura temporanea da acqua di terra normalmente non coperta da acqua". Ciò include inondazioni da fiumi, torrenti montani, corsi d'acqua effimeri del Mediterraneo e inondazioni dal mare nelle zone costiere e può escludere inondazioni dal sistema fognario". Kron (Kron, 2005) riporta la definizione tipica dei contratti assicurativi come "copertura temporanea della terra dall'acqua a seguito della fuoriuscita delle acque superficiali dai loro confini normali o delle forti precipitazioni". Barredo presenta un'ampia rassegna dell'argomento con un'organizzazione in categorie (Barredo, 2007).

Il termine "rischio di alluvione" in idrologia è comunemente usato come sinonimo della probabilità di avere un'alluvione in un determinato luogo e intervallo di tempo. Il concetto di "rischio di alluvione" tiene conto delle conseguenze dovute alla stessa alluvione in termini di danni. Laddove non vi siano persone esposte o valori che possono essere influenzati da un'inondazione, anche se il pericolo è piuttosto elevato, non vi è alcun rischio. Allo stesso modo, il danno (rischio attualizzato) può verificarsi solo quando le persone sono danneggiate e/o i loro beni danneggiati (Kron, 2005).

### Il problema della mappatura

Il riconoscimento e la perimetrazione delle aree inondabili è un problema complesso sia per le incertezze legate alla definizione delle forzanti di tipo idrologico sia per quelle legate alla parametrizzazione dei modelli di propagazione dell'onda di piena in alveo e nei territori di esondazione (Horrit, 2000), (Horritt & Bates, 2002), (Werner, Hunter, & Bates, 2005). La calibrazione di modelli matematici più o meno complessi, accoppiati a modelli digitali del terreno sempre più accurati e precisi, necessita di una conoscenza molto dettagliata e onerosa del territorio (Di Baldassarre, Schumann, & Bates, 2009). Tale approccio si adatta particolarmente allo studio di contesti territoriali localizzati ma non risulta sostenibile alla scala di vasti territori (scala di bacino o regionale).

D'altro canto, il comportamento idraulico dell'onda di piena è fortemente condizionato dalle caratteristiche morfologiche del bacino, così come è vero il viceversa. Le caratteristiche geometriche della corrente durante un evento di piena seguono leggi di scala che dipendono dalle dimensioni caratteristiche del bacino idrografico e dalla morfologia del fiume. Per tale motivo è comunque utile affrontare lo studio dell'esposizione al pericolo di inondazione attraverso una dettagliata descrizione delle caratteristiche morfologiche del bacino idrografico e del corso fluviale, tenendo presente che la geometria della corrente è controllata in modo marcato dall'area drenante a monte secondo leggi di scala dipendenti dalla forma morfologica caratteristica del fiume. Tali caratteristiche possono influenzare in modo marcato la scelta dei

parametri di modelli speditivi, basati su indici morfologici sintetici, per la delimitazione delle aree esposte al pericolo di inondazione.

### **L'approccio "puramente geomorfologico"**

Gli approcci geomorfologici consentono di delimitare le aree soggette a pericolosità alluvionale a partire dalla caratterizzazione geomorfologica del bacino fluviale. La struttura metodologica è adatta a studi su larga scala poiché si basa principalmente su analisi di DTM e richiede, in aggiunta, per la calibrazione, soltanto la disponibilità di una mappatura delle aree allagabili relativa ad una porzione, di estensione anche contenuta, del territorio di interesse. Sebbene questi approcci siano particolarmente indicati per applicazioni su larga scala, la variabilità delle condizioni climatiche, idrologiche e topografiche del territorio richiederebbe che la calibrazione dei parametri morfologici debba essere condotta in maniera specifica. Inoltre, è necessario tenere presente che questo tipo di analisi speditive, basate su indici geomorfologici, prescindono dalla descrizione dei processi fisici di deflusso superficiale delle acque, dalla loro propagazione nello spazio e nel tempo e dalla loro interazione con le infrastrutture. In ogni caso, però, la mappatura che ne risulta permette comunque una prima identificazione delle intersezioni critiche, che potranno essere poi oggetto di analisi di maggior dettaglio.

In letteratura sono reperibili diversi approcci geomorfologici per l'identificazione di zone soggette ad allagamenti e classificazione del pericolo. Beven e Kirby (Beven & Kirby, 1979) dimostrano che le aree esposte a pericolo di inondazione risultano fortemente legate ad alcune caratteristiche geomorfologiche del territorio e mostrano una forte dipendenza dall'indice topografico che può essere definito in funzione dell'area drenata per unità di larghezza del contorno di cella e dalla pendenza locale.

Manfreda et al. (Manfreda, Di Leo, & Sole, 2011) propongono un indice topografico modificato in cui l'area drenata tiene conto della pendenza locale mediante un esponente adimensionale che fornisce la misura del raggio idraulico come descrittore dell'esposizione alle alluvioni. Degiorgis e colleghi (Degiorgis, et al., 2012) studiano la relazione tra diverse caratteristiche morfologiche derivate dal DEM e la pericolosità da alluvione mediante classificatori binari lineari a scala di bacino. Altri autori (Nardi, Vivoni, & Grimaldi, 2006) propongono un approccio idro-geo-morfologico che stima il livello idrico lungo la rete fluviale e identifica l'area allagata come differenza di quota con le aree circostanti.

Più recentemente, Manfreda e colleghi (Manfreda, et al., 2015) e Samela ed altri (Samela, Troy, & Manfreda, 2017), (Samela, Albano, Sole, & Manfreda, 2018) hanno messo a punto un indice sintetico di pericolosità denominato GFI (Geomorphic Flood Index) che è funzione di un valore caratteristico del tirante idrico in corrispondenza della sezione del corso d'acqua ( $h_r$ ) più prossima al punto di interesse secondo un percorso idraulico (stimato in funzione dell'area contribuyente) e la differenza di quota tra il punto considerato ed il punto più vicino del corso d'acqua ( $H$ ). L'indice GFI viene calcolato per ogni cella del bacino, per poi identificare, mediante il processo di calibrazione, una soglia al di sopra della quale un'area è da considerarsi allagabile. Il valore di soglia da adottare viene identificato in fase di calibrazione minimizzando gli errori di ottenuti dal confronto con le aree allagabili fornite dal PGRA, limitatamente alle aree mappate da quest'ultimo.

Gli approcci geomorfologici consentono di delimitare le aree soggette a pericolosità alluvionale a partire dalla caratterizzazione geomorfologica del bacino fluviale. La struttura metodologica è adatta a studi su larga scala poiché si basa principalmente su analisi di DTM e richiede, in aggiunta, per la calibrazione, soltanto la disponibilità di una mappatura delle aree allagabili relativa ad una porzione, di estensione anche contenuta, del territorio di interesse. Sebbene questi approcci siano particolarmente indicati per applicazioni su larga scala, la variabilità delle condizioni climatiche, idrologiche e topografiche del territorio richiederebbe che la calibrazione dei parametri morfologici debba essere condotta in maniera specifica. Inoltre, è necessario tenere presente che questo tipo di analisi speditive, basate su indici geomorfologici, prescindono dalla

descrizione dei processi fisici di deflusso superficiale delle acque, dalla loro propagazione nello spazio e nel tempo e dalla loro interazione con le infrastrutture. In ogni caso, però, la mappatura che ne risulta permette comunque una prima identificazione delle intersezioni critiche, che potranno essere poi oggetto di analisi di maggior dettaglio.

### **L'approccio modellistico**

La mappatura delle pericolosità del territorio nel nostro Paese è stata storicamente affidata alla modellazione idrologica e idraulica, sino dalla prima produzione dei Piani di assetto idrogeologico dei primi anni '2000. L'inondazione in un sito assegnato è un processo stocastico funzione del tempo e dello spazio. La scarsità dei dati a disposizione, vista la dispersione che accompagna il fenomeno, impedisce una modellazione basata su analisi empirica. La necessità di ottenere comunque una caratterizzazione probabilistica, ha portato generalmente ad operare trasferendo la probabilità dell'evento al suolo, a quella della precipitazione che lo ha determinato, procedendo poi con una modellazione complessiva del fenomeno (Fenicia, et al., 2013).

Questa "ipotesi di isofrequenza" che conserva intatta la probabilità della causa prima attraverso l'intera catena di trasformazione idrologica, è in realtà molto forte e, assai frequentemente, disattesa in natura. I fenomeni alluvionali sono difatti condizionati da una serie interminabile di fattori contingenti (anch'essi di carattere fortemente stocastico) che condizionano i risultati dei modelli in maniera severa. La modellazione proposta, quella che osserviamo nei PAI/PGRA è dunque "una" realizzazione del processo tra le tante possibili a partire dalla precipitazione di probabilità fissata. Vi sono casi nei quali la morfologia dei siti, i caratteri idraulici dell'asta fluviale, la presenza (o l'assenza) di opere idrauliche, rendono la soluzione relativamente stabile rispetto alla dinamica intrinseca dei processi. Altre volte non è così, e i poligoni ottenuti risultano strettamente limitati al ristretto ambito delle ipotesi assunte (Smith & Ward, 1988).

A questo fatto si aggiunge quello che molti dei fenomeni inondativi nel nostro Paese sono legati a fenomeni diversi dall'inondazione diretta per insufficiente capacità di smaltimento di un corso d'acqua. Si tratta dei casi di ristagno per insufficiente drenaggio, di malfunzionamento o collasso di opere idrauliche, di esondazione di rii minori e quant'altro. La integrale copertura modellistica isofrequente di queste casistiche è ovviamente impensabile: per questo fatto, storicamente, le Autorità deputate alla mappatura hanno generalmente proceduto con un approccio gerarchico, partendo dalla modellazione delle aste principali e per poi proseguire, a seconda della disponibilità delle risorse, verso altri tronchi, talvolta limitando l'analisi a una soglia prefissata in termini di area drenata, ordine di Horton o quant'altro.

L'approccio appena delineato, seguendo la *mission* istituzionale delle Autorità di bacino distrettuali, non comporta in realtà problemi soverchi e, al contrario, presenta numerosi vantaggi. Trattandosi difatti di mappe a supporto di norme di Piano (e dunque della regolazione del territorio) offrono un approccio chiaro, trasparente e soprattutto facilmente replicabile, specialmente dove tutti gli elementi modellistici siano stati chiaramente esplicitati. Questo tutela i cittadini e aiuta a limitare eventuali ricorsi. Per le aree poi, ove gli studi non siano disponibili, può essere lo stesso strumento normativo a intervenire con indicazioni ad hoc (ad esempio affidare agli stessi proponenti lo studio, da svolgersi con la metodologia di riferimento) che tutelano comunque il territorio.

### **L'uso delle carte PAI/PGRA nella pianificazione di emergenza**

Il mosaico nazionale delle carte di pericolosità da alluvione è stato redatto a cura di ISPRA e reso disponibile a partire dalla seconda metà della scorsa decade (Trigila & Iadanza, 2018). I vari stralci erano comunque distribuiti dalle Autorità a partire dalla adozione dei Piani, spesso in formato immagine o PDF. Una sorta di meccanismo automatico ha nei fatti posto queste carte tematiche alla base dell'analisi di scenario nella pianificazione di emergenza comunale, costituendone in numerosi casi, la fonte principale o addirittura la

sola. Si tratta di un approccio generalmente non conforme alle necessità della pianificazione di protezione civile, per le ragioni che indichiamo sommariamente nel seguito.

Si tratta innanzitutto di una analisi non completa del territorio, vista la dichiarata non copertura integrale da parte della modellazione, riferita solo a tratti prefissati di reticolo. Offre poi, come detto, una delle possibili realizzazioni del processo stocastico della inondazione, senza proporre in generale una adeguata analisi di sensibilità a cambiamenti nelle condizioni iniziali e al contorno. Ignora, per ipotesi, l'occorrenza di processi inondativi non necessariamente derivanti da insufficiente capacità di smaltimento, ad esempio rotte arginali per livelli al disotto di quello di tracimazione, ristagni dovuti a malfunzionamenti di opere idrauliche (ad esempio, inondazione di sottopassi), crisi di tratti tombinati e quant'altro.

Resta fermo il principio che le carte di pericolosità offerte dai PAI/PGRA costituiscono comunque un elemento conoscitivo di grande utilità per indirizzare l'analisi di eventi particolarmente significativi. Altrettanto vero è che queste, come ribadito più volte nei diversi documenti di indirizzo che a vario livello hanno guidato la pianificazione, vadano integrate con ulteriori analisi.

### **Approcci distinti**

Ferma restante la necessità della consultazione degli studi disponibili, anche a servizio della pianificazione locale e di area vasta diversa da quella dell'Autorità distrettuale, tali ulteriori analisi possono e debbono essere svolti mediante due approcci concorrenti ma sostanzialmente distinti. Il primo, che possiamo chiamare "dal basso" o *bottom up* richiede la sintesi della conoscenza del territorio da parte dell'Ente di prossimità, raccogliendo la memoria storica delle passate inondazioni e/o cogliendone i segni sul territorio, individuando i punti critici ove si riscontrano problemi di inondazione, riconoscendo i punti di osservazione dai quali poter sintetizzare, sulla base di semplici indicatori, l'eventuale insorgere di una crisi. Questo tipo di informazioni è cruciale per la definizione degli scenari di rischio e dei relativi modelli di intervento.

In maniera sinergica e concorrente è opportuno effettuare analisi "dall'alto" o *top down* nella quale, sulla base di aspetti essenzialmente morfologici e di caratteristiche di uso del suolo, si individuano aree territoriali più propense all'alluvionamento basati su procedure automatiche di individuazione delle forme del territorio a partire dal modello digitale del terreno (Stepinski & Jasiewicz, 2011). In questo senso si riscontrano in letteratura approcci (citiamo quelli più recenti in ambito nazionale che riportano anche buone *review* dello stato dell'arte) (Samela, et al., 2015) (Samela, Troy, & Manfreda, 2017) (Manfreda, et al., 2015) che propongono indici basati sulla caratterizzazione geomorfologica del territorio e atti a individuare aree intrinsecamente prone ad essere alluvionate. Tali modelli possono provare una buona efficacia, specialmente ove si voglia procedere speditivamente su scala regionale. Una evoluzione di tale tipo di impostazione è offerta dalla analisi di suscettività.

### **L'analisi di suscettività da alluvione**

#### **Generalità**

L'analisi di suscettività da alluvione si basa comunque sulla interpretazione di fattori predisponenti di ordine prevalentemente geomorfologico, ma li integra con modelli interpretativi addestrati sulla base di osservazioni. Tali modelli di inferenza, cosiddetti *data driven* utilizzano diverse tecnologie, tra le quali le reti neurali artificiali (ANN) (Pradhan & Buchroithner, Comparison and validation of landslide susceptibility maps using an artificial neural network model for three test areas in Malaysia, 2010), i processi gerarchici analitici (AHP) (Yalcin, 2008), la regressione logistica (LR) (Pradhan, 2010) e *fuzzy logic* (Pradhan, 2011). L'utilizzo di metodi *machine learning* è indirizzato in alcuni lavori recenti (Lamovec, Veljanovski, Mikoš, & Oštir, 2013), (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2013).

In questo caso si è scelto di utilizzare la tecnica cosiddetta *weight of evidence* (WoE) inizialmente introdotta per affrontare problemi decisionali in condizione di incertezza in vari campi (Agterberg, Bonham-Carter, &

Wright, 1990) e utilizzata con successo anche per la analisi di suscettività da frana e da alluvione (Dahal, et al., 2008) (Regmi, et al., 2013).

## Il metodo WoE

Per l'analisi di suscettività un metodo geo-statistico ampiamente applicato in letteratura è il cosiddetto *Weight of Evidence* (WoE): proposto da Bonham-Carter et al. (1990) come applicazione nell'ambito della ricerca mineraria è particolarmente ricorrente in letteratura per la valutazione della suscettività da dissesti geomorfologici di versante (Neuhäuser et al., 2007; Lee et al., 2002), più recentemente, da fenomeni alluvionali (Tehrany et al., 2017 e 2014; Rahmati et al., 2016). Si tratta di un approccio statistico multifattoriale basato sulla probabilità bayesiana e facilmente implementabile in ambiente GIS. Vengono considerati separatamente i contributi di ogni classe dei fattori predisponenti al verificarsi dell'evento, determinata l'indipendenza reciproca tra i fattori considerati e valutata una probabilità a posteriori del verificarsi dell'evento di interesse combinando i diversi contributi.

Nel metodo WoE, che si basa sul teorema di Bayes, indicando con "B" ogni fattore predisponente considerato, con "B<sub>i</sub>" ciascuna delle sue classi, e con "A" l'evidenza dell'evento, la probabilità di avere "s" data la classe "B<sub>i</sub>" sarà pari a:

$$P(A|B_i) = \frac{P(B_i|A) \cdot P(A)}{P(B_i)}$$

dove  $P(B_i|A)$  è la probabilità di trovare la classe "B<sub>i</sub>" al verificarsi dell'evento "A",  $P(A)$  è la probabilità di avere un evento nell'area di studio, mentre  $P(B_i)$  è la probabilità di trovare una determinata classe di un fattore predisponente.

Di conseguenza, la probabilità condizionata di trovare "A" fuori dalla classe "B<sub>i</sub>" sarà pari a:

$$P(A|\bar{B}_i) = \frac{P(\bar{B}_i|A) \cdot P(A)}{P(\bar{B}_i)}$$

dove  $P(\bar{B}_i)$  è la probabilità di non avere la classe "B<sub>i</sub>" mentre la  $P(\bar{B}_i|A)$  è la probabilità di non avere la classe "B<sub>i</sub>" dato l'evento "A". Tali probabilità, che vengono calcolate come rapporti tra aree andando a valutare la relazione spaziale che intercorre tra il verificarsi dell'evento e la presenza o assenza di una determinata classe di fattore predisponente, permettono successivamente di ottenere dei pesi di ciascuna classe in base a quanto questa sia correlata positivamente o negativamente all'insorgenza dell'evento.

I pesi  $W^+$  e  $W^-$  sono espressi come:

$$W^+ = \ln \frac{P(B_i|A)}{P(B_i)}$$

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B}_i|A)}{P(\bar{B}_i)}$$

Il peso positivo  $W^+$  rappresenta il rapporto tra la probabilità di trovare una classe dove si è verificato l'evento e la probabilità di trovare la stessa classe in un luogo in cui non si è verificato l'evento. Esso quantifica la relazione che intercorre tra una classe di un fattore predisponente e il verificarsi dell'evento, cioè indica l'influenza di tale classe sul verificarsi dell'evento. Il peso negativo  $W^-$ , al contrario, rappresenta il rapporto tra la probabilità di non trovare una classe dove si è verificato l'evento e la probabilità di non trovare la stessa classe in un'area priva di evento, definendo così l'entità di anti-correlazione tra la classe di un fattore e l'evento.

Il peso di contrasto  $C$  è definito come differenza tra i due pesi ( $C = W^+ - W^-$ ) e indica l'entità della relazione spaziale tra la classe del fattore predisponente e il verificarsi dell'evento: un peso di contrasto uguale o prossimo allo 0 indica l'assenza di relazione tra la classe del fattore e l'evento, mentre i valori di contrasto positivi e negativi rivelano una relazione spaziale positiva o negativa della propensione di aree con determinate caratteristiche ad essere interessate dall'evento alluvionale.

I pesi di influenza  $W^+$  e  $W^-$  e conseguentemente il peso di contrasto  $C$  permettono, attraverso una combinazione lineare di tutti i valori di  $C$  per ciascuna classe, di calcolare la probabilità a posteriori del verificarsi dell'evento espressa attraverso un indice di suscettività da alluvione  $P_A(A) = \sum w_i \cdot \ln P(A)$ .

### Il modello digitale del terreno

Ai fini di operare in maniera omogenea sul territorio del progetto, si è provveduto a raccogliere i modelli digitali del terreno disponibili presso le 5 Regioni, a correggere le anomalie e a svilupparne uno apposito e collaudare un modello digitale del terreno a servizio dell'analisi di suscettività (e d in ogni caso disponibile per le altre eventuali esigenze del progetto). Il passo è stato fissato in quello massimo tra le diverse fonti di informazione e dunque in 5 metri. Le attività sono descritte nel dettaglio in un apposito report.

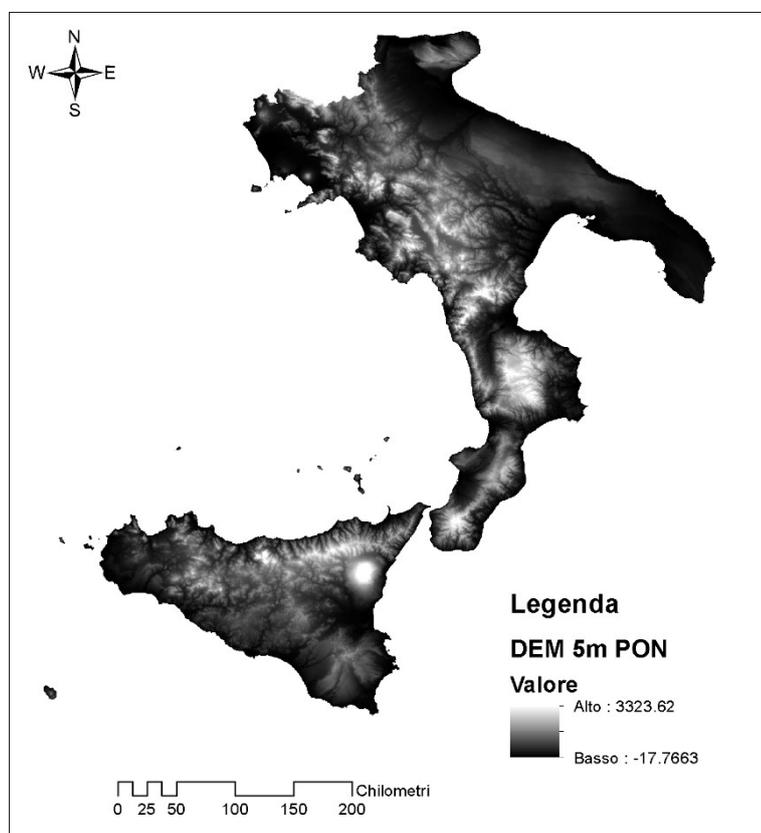


Figura 1. Il modello digitale del terreno a servizio del progetto PON

### Il reticolo di drenaggio

Si è inoltre ricavato e verificato il reticolo di drenaggio come emerge dai database topografici delle diverse carte tecniche regionali ottenendo un insieme di archi ragionevolmente coerente per modalità di rilevamento e cartografazione.

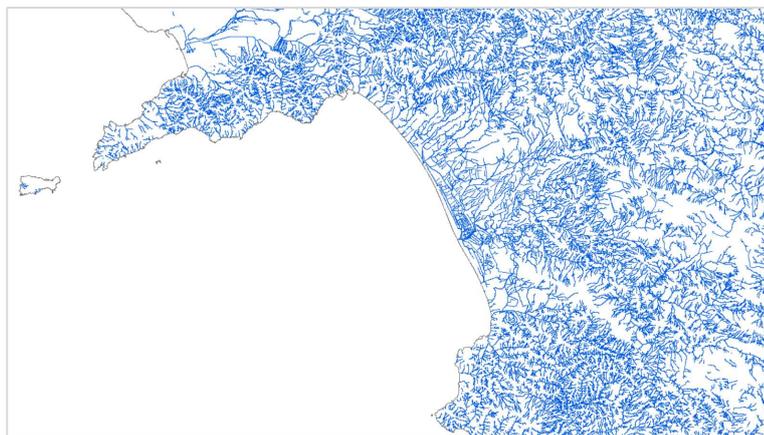


Figura 2. Esempio del reticolo di drenaggio nell'area della costiera amalfitana

Si tratta di dati che comunque presentano una componente fortemente eterogenea con tracciati record molto diversi. I criteri di formazione del database topografico sono apparsi comunque consistenti. I risultati delle estensioni dei reticoli sono riportati nella seguente tabella.

Regione	Superficie [kmq]	L [km]	L/S [1/km]
Basilicata	10073	34'059	3.4
Campania	13670	34'401	2.5
Puglia	19540	29'890	1.5
Calabria	15221	71'431	4.7
Sicilia	25832	103'436	4.0
<b>totale</b>	<b>84338</b>	<b>273'218</b>	

Tabella 1. Lunghezza del reticolo CTR per le 5 regioni e relativo rapporto con la superficie del territorio

Altresì si è composto il mosaico litologico derivando i dati dalle carte geologiche in scala 1:100000 del Servizio Geologico d'Italia, visto che le carte derivanti dal progetto CARG 1:50000 non coprono per intero il dominio di calcolo. Da questo si sono ricavati i tipi idrologici di suolo in accordo con il metodo SCS-CN (Mishra & Singh, 2003).

	A [km <sup>2</sup> ]	B [km <sup>2</sup> ]	C [km <sup>2</sup> ]	D [km <sup>2</sup> ]	Totale [km <sup>2</sup> ]
<b>BASILICATA</b>	537	4218	3316	1898	9969
<b>CALABRIA</b>	320	5070	6957	2730	15077
<b>CAMPANIA</b>	3109	7280	1011	2145	13545
<b>PUGLIA</b>	7465	10387	250	1091	19193
<b>SICILIA</b>	2272	8710	6620	8068	25670

Tabella 2. Distribuzione assoluta dei tipi idrologici di suolo sulle 5 regioni del PON

La Tabella 1 riporta i dati assoluti delle superfici interessate per le 5 regioni. Gli stessi dati sono riportati in forma relativa nella successiva tabella che illustra le percentuali per i diversi gruppi idrologici: da "A" (bassa propensione al deflusso) a D (terreni molto impermeabili).

	A	B	C	D
BASILICATA	5%	42%	33%	19%
CALABRIA	2%	34%	46%	18%
CAMPANIA	23%	54%	7%	16%
PUGLIA	39%	54%	1%	6%
SICILIA	9%	34%	26%	31%

Tabella 3. Distribuzione percentuale dei tipi idrologici di suolo sulle 5 regioni del PON

I dati appena presentati consentono una conferma, per quanto del tutto qualitativa, della relativa omogeneità della rappresentazione scelta per il reticolo di drenaggio.

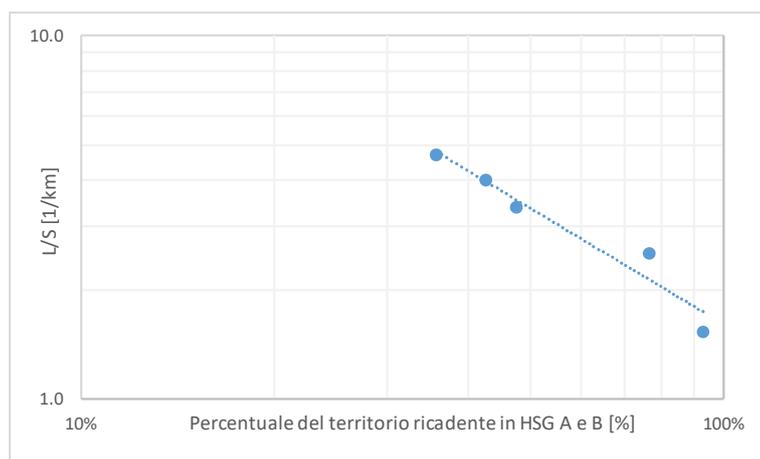


Figura 3. Rapporto tra la lunghezza complessiva del reticolo di drenaggio e superficie del territorio espresso in funzione della percentuale di suolo permeabile individuato tramite la somma delle aree coperte dai tipi idrologici di suolo A e B

L'immagine mostra il rapporto tra la lunghezza complessiva del reticolo di drenaggio e la superficie del territorio, graficato in funzione della percentuale di suolo molto o mediamente permeabile. Quest'ultimo dato è rappresentato tramite la somma delle aree coperte dai tipi idrologici di suolo A e B. L'immagine mostra una buona consistenza dei dati, attraverso una legge di scala ben evidenziata. Non si tratta ovviamente delle classiche leggi di scala relative alla densità di drenaggio (Hack, 1957) che hanno senso a scala di bacino idrografico mentre qui si tratta di dati di interi territori valutati massivamente.

L'osservazione consente tuttavia di comprendere l'ampia variabilità presentata dai valori riportati in Tabella 1 confortando una sostanziale omogeneità nel dettaglio dei rilievi.

L'uso del suolo è stato ricavato dal classico progetto Corine Land cover 2012<sup>1</sup> a livello 3, anch'esso restituito alla scala 1:100:000. I tematismi sono stati riaggregati assegnando alle componenti litologiche, diversi gruppi idrologici di suolo (HSG) in accordo al metodo SCS-CN (Mishra & Singh, 2003). La base delle due informazioni, è stata derivata in via automatica una carta del parametro CN sul territorio delle 5 regioni.

<sup>1</sup> <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>

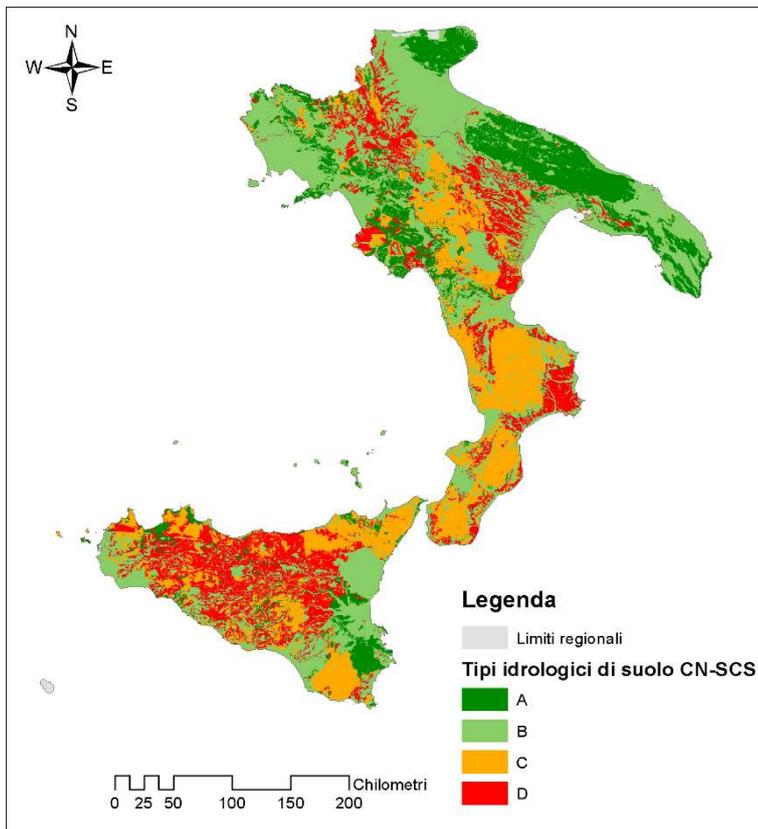


Figura 4. Tipi idrologici di suolo per le 4 regioni continentali

### Fattori predisponenti

La scelta dei fattori predisponenti costituisce, assieme al metodo statistico, uno degli elementi chiave dell'analisi di suscettività. Nel caso di specie, si è seguito un approccio molto vicino ai lavori di letteratura più recenti (Tehrany, et al., 2017) che addestra il modello tramite il classico WoE.

Nel caso di specie si sono individuati due parametri di prossimità in forma di distanza orizzontale e verticale dal reticolo di drenaggio, la pendenza come parametro di morfologia locale e l'indice CN per dar conto del comportamento idraulico locale del territorio.

### Dati di addestramento del modello

Una delle ragioni per l'impiego ancora relativamente modesto delle analisi di suscettività da alluvione, rispetto all'uso ormai ampiamente consolidato per il dissesto gravitativo di versante (Reichenbach, Rossi, Malamud, Mihir, & Guzzetti, 2018), sta nel carattere intrinseco degli effetti al suolo che condiziona in maniera determinante la disponibilità dei dati a disposizione. Si riscontrano difatti risalenti analisi di suscettività anche a servizio della redazione di Piani per l'assetto idrogeologico in contesti di rilievo nazionale (Catani, Casagli, Ermini, Righini, & Menduni, 2005) mentre la casistica di analisi in campo del rischio idraulico, in analogo contesto, è pressoché assente. Il fatto è che la frana riporta generalmente effetti al suolo consistenti e permanenti, nella maggior parte dei casi suscettibili di analisi, tanto da terra che da telerilevamento, che possono protrarsi per lunghi periodi e consentire di apprezzarne pienamente, non solo la geometria, ma pure la dinamica e le relative conseguenze.

L'alluvione al contrario un fenomeno generalmente effimero. Vi sono state alluvioni, ad esempio come quella del Po del 1951 e, più in generale quelle caratteristiche della pianura padana (Orlandini, Moretti, & Albertson, 2015) che effettivamente sono caratterizzate da tempi di permanenza di giorni, settimane e addirittura mesi. Più in generale i tempi sono modesti, poche ore o giorni. D'altro canto, anche per le emergenze di tipo nazionale, non è frequente un rilievo organizzato dell'estensione delle aree inondate. I

dati a disposizione, “carburante” fondamentale per l’analisi di suscettività, sono dunque relativamente scarsi, sebbene la letteratura su archivi organizzati di eventi alluvionali, segna già da tempo diversi esempi di notevole interesse (Guzzetti, Reichembach, & Cardinali, 1994).

Uno degli aspetti salienti del lavoro proposto, è stato il recupero massivo, per quanto possibile, dell’informazione di eventi storici in ambito PON, sia per quanto riguarda i dati areali che per quelli puntuali. Per quanto concerne lo strato informativo delle aree il materiale reperito può essere ricondotto alle seguenti fattispecie:

1. aree alluvionate fornite dalla Autorità di bacino distrettuale “Appennino meridionale” attraverso le diverse Unit of Management regionali;
2. aree fornite da Comuni a seguito della notizia di eventi significativi, successivamente elaborate dal gruppo di ricerca;
3. aree provenienti da immagini satellitari di vario genere (Copernicus EMS, Agenzia Spaziale Italiana), attraverso download o indirettamente attraverso gruppi di ricerca operanti nel settore (Dipartimento di Protezione Civile, Università della Basilicata);
4. aree direttamente prodotte dal gruppo di lavoro della Fondazione Politecnico di Milano, ricostruite mediante la ricerca e poi l’analisi dettagliata di fonti di cronaca, materiale fotografico e video, documentazione nei piani di protezione civile comunale.

Per quanto riguarda lo strato informativo dei punti invece, il materiale fa riferimento a:

1. punti critici frequentemente alluvionati, localizzati direttamente dall’Autorità di Bacino o segnalati da Comuni, privati, Prefetture, Protezione Civile e fonti di cronaca alla stessa
2. punti provenienti dalla georeferenziazione delle ricognizioni di cui alle schede di tipo “A”, “B” e “C” di cui alle ordinanze di Protezione civile connesse agli stati di emergenza.

Nello specifico sono state raccolti/perimetrati 1259,59 km<sup>2</sup> di aree storicamente inondate di cui 51,13 km<sup>2</sup> per la Basilicata, 156,75 km<sup>2</sup> per la Calabria, 177,11 km<sup>2</sup> per la Campania, 739,64 km<sup>2</sup> per la Puglia e infine 134,95 km<sup>2</sup> per la Sicilia.

Come già cennato, le fonti utilizzate sono diverse e, mentre una parte delle aree era già stata perimetrata da chi ha prodotto il dato, un’altra parte è frutto dell’attività di delimitazione geografica svolta dal gruppo di lavoro della Fondazione Politecnico di Milano, secondo la seguente procedura:

1. ricerca sui Report di evento delle Protezioni Civili regionali, sugli articoli di giornale e sul web, degli eventi occorsi negli ultimi vent’anni nelle cinque regioni PON;
2. redazione di un elenco di eventi i cui effetti al suolo abbiano provocato allagamenti e danni a persone, immobili, infrastrutture e settore produttivo;
3. ricerca di immagini e filmati, da cui si potesse definire il perimetro delle aree allagate, sia sui canali istituzionali, come ad esempio il sito dei Vigili del Fuoco, che su canali come Youtube o Youreporter;
4. perimetrazione in ambiente GIS, con il supporto di ortofoto, reticolo idraulico, DEM e toponomastica, delle aree allagate.

FONTE	SUPERFICIE km <sup>2</sup>
AdB Distretto Appennino Meridionale	909,9
Comune di Messina	4,24
Copernicus EMS	96,95
Dipartimento di Protezione Civile - Agenzia Spaziale italiana (ASI)	16,81
ex AdB Campania Sud ed Interregionale Sele	112,04
Fondazione Politecnico di Milano	114,11
Santangelo, Santo - 2002	1,33
Universita' della Basilicata - Agenzia Spaziale italiana (ASI)	4,21
<b>TOT</b>	<b>1259,59</b>

Tabella 4 - Dettaglio delle superfici raccolte suddivise per fonte di dato

Nella Tabella 4, si può leggere il dettaglio delle aree perimetrare in funzione della fonte del dato, si precisa tuttavia che per la Regione Puglia le aree fornite dalla UoM regionale Puglia e interregionale Ofanto è stato necessario un ulteriore lavoro di analisi per associare le aree agli eventi condotto utilizzando il Catalogo del Progetto AVI del CNR (GNDCI & Cardinali, 1998).

Il lavoro sul dato puntuale ha condotto alla raccolta di 6751 punti di cui 3564 per la Basilicata, 1489 per la Calabria, 1128 per la Campania e 570 per la Puglia.

FONTE	PUNTI
ex AdB Basilicata	2965
Fondazione Politecnico di Milano	3543
Protezione Civile Regione Puglia	243
<b>TOT</b>	<b>6751</b>

Tabella 5 - Dettaglio dei punti raccolti suddivisi per fonte di dato

Tra i punti georeferenziati dal gruppo di lavoro della Fondazione Politecnico di Milano ci sono quelli delle OCDPC, di cui in Tabella 6 si riporta il dettaglio.

REGIONE	FONTE	PUNTI
Puglia	2013/10/07-08 (OCDPC 135)	116
Puglia	2014/09/01-06 (OCDPC 200)	45
Calabria	2015 vari eventi (OCDPC 289)	14
Calabria	2015/08/12 (OCDPC 285)	420
Puglia	2015/10/10-15 (OCDPC 355)	79
Campania	2015/10/15 (OCDPC 298)	1128
Calabria	2015/10-11 (OCDPC 330)	370
Puglia	2016/03/11-18 (OCDPC 410)	64
Calabria	2016-2017 vari eventi (OCDPC 473)	260
Calabria	2018 vari eventi (OCDPC 545)	51
Calabria	2018 vari eventi (OCDPC 558)	374

Tabella 6 - Dettaglio dei punti georeferenziati da Fondazione Politecnico di Milano suddivisi per OCDPC

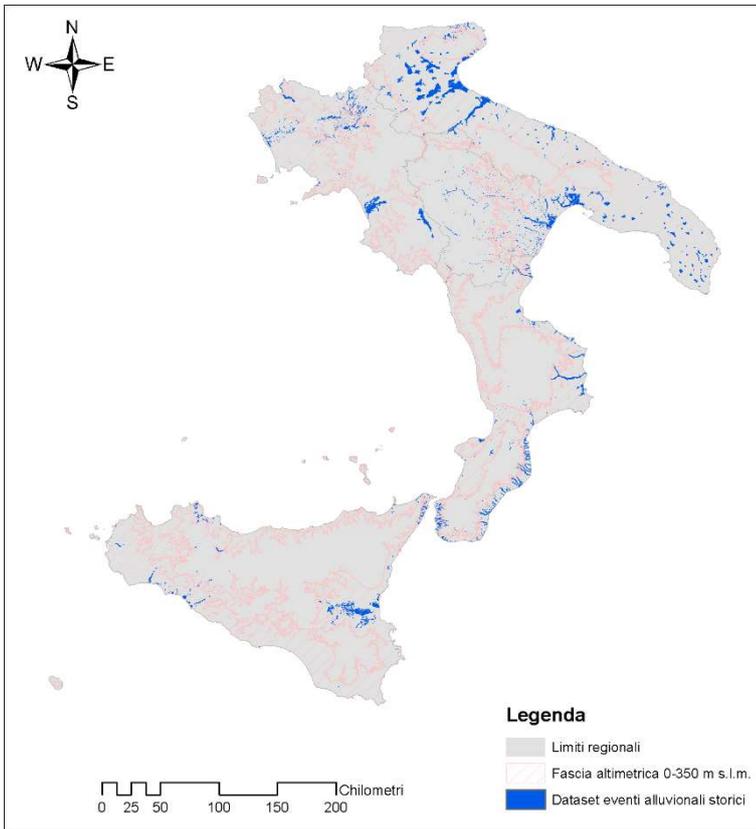


Figura 5. Sintesi dei dati relativi ai dati storici areali per l'addestramento e la validazione del modello

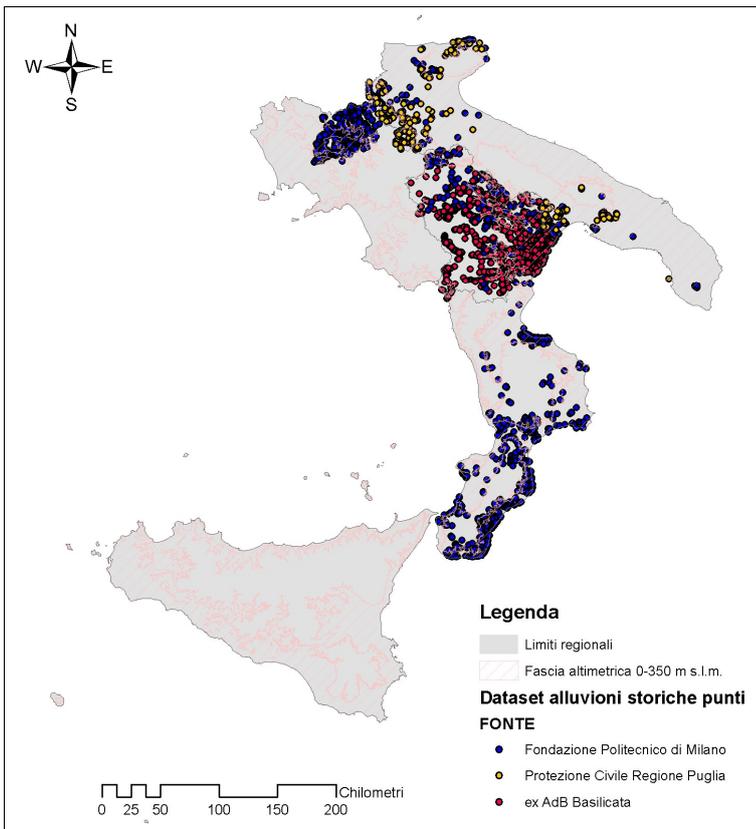


Figura 6. Sintesi dei dati relativi ai dati storici puntuali per l'addestramento e la validazione del modello

## La individuazione di unità territoriali omogenee di riferimento

Una volta disponibile un significativo *dataset* di aree vulnerate, si è proceduto alla consueta analisi di cross correlazione sui diversi fattori predisponenti nel dominio dei dati di calibrazione. I risultati, peraltro anticipati da studi specifici svolti regione per regione dal Gruppo di lavoro sul territorio del Progetto, hanno rassicurato sull'indipendenza statistica dell'informazione considerata nei diversi parametri.

A questo punto è stata svolta una analisi finalizzata a caratterizzare uno o più specifici contesti geomorfologici sui quali impostare correttamente l'addestramento del modello in fase di calibrazione. A tal fine si è operato con un classico metodo di letteratura (Stepinski & Jasiewicz, 2011), applicato all'altimetria dell'intera zona di studio. Per il calcolo si è optato per il modello digitale del terreno SRTM (VanZyl, 2001) a passo 90 metri: più grossolano di quello in uso per la suscettività e pertanto in grado di mediare spazialmente le discontinuità minori del terreno prodotte dal modello ad alta risoluzione.

L'approccio "Geomorphon" è in sostanza un metodo per la classificazione e la mappatura di landforms a partire dall'altimetria. Il modello è basato sul principio del riconoscimento tipologico dei pattern geomorfologici, piuttosto che sulla mera analisi geometrica differenziale della superficie. Al centro del metodo c'è il concetto di "geomorfone" in sostanza un fonotipo geomorfologico, un semplice schema ternario che funge da archetipo di una particolare morfologia del terreno. Gli autori individuano un numero finito di "geomorfoni" che costituiscono l'insieme completo ed esaustivo di tutti i possibili tipi assetti morfologici, inclusi elementi standard del paesaggio, nonché forme sconosciute che si trovano raramente nelle superfici naturali. Una singola scansione del DEM, assegna un geomorfone appropriato a ogni pixel, usando una procedura che si auto adatta per identificare la scala spaziale più adatta in ogni posizione.

Il metodo classifica i pattern delle forme del territorio in una gamma di diverse scale spaziali con una ragguardevole efficienza computazionale. Altresì è possibile derivare una mappa geomorfometrica per uso generale aggregando i "geomorfoni" su un piccolo numero *landform pattern* più comuni.

La classificazione del territorio delle 5 regioni ha risultato evidenze nei "geomorfoni" *flat* (pianura), *peak* (picco), *ridge* (parte convessa del versante, contrario di *hollow*), *shoulder* (costone), *spur* (sperone), *slope* (versante), *hollow* (parte concava del versante, contrario di *ridge*), *footslope* (scarpata), *valley* (valle), *pit* (depressione locale).

Geomorphons	Area [km <sup>2</sup> ]	%
SLOPE	22307	26.7%
SPUR	13147	15.7%
VALLEY	11888	14.2%
HOLLOW	11126	13.3%
RIDGE	9915	11.9%
FLAT	5631	6.7%
FOOT Slope	3144	3.8%
PIT	2625	3.1%
PEAK	2099	2.5%
SHOULDER	1660	2.0%
<b>totale</b>	<b>83543</b>	<b>100.0%</b>

Tabella 7. Distribuzione delle aree del territorio PON aggregate sui diversi "geomorfoni"

La Tabella 7 mostra la distribuzione dei "geomorfoni" sugli oltre 83.000 km<sup>2</sup> del territorio delle 5 regioni del PON. Analizzando i numeri si osserva come le *landform* più propriamente associate ai versanti (*peak*, *ridge*, *hollow*, *shoulder*, *spur*, *slope*), risultano pari ai quasi tre quarti del territorio, mentre il restante quarto

rientra nei temi tipici della pianura alluvionale (*flat, footslope, pit, valley*), in analogia peraltro con il dato nazionale della ripartizione del territorio tra pianure e territori collinari e montani attorno al 23%.

Geomorphons	Area [km <sup>2</sup> ]	%
FLAT	440	36.6%
VALLEY	261	21.7%
FOOTSLOPE	195	16.2%
SLOPE	106	8.8%
PIT	70	5.8%
HOLLOW	48	4.0%
SHOULDER	43	3.6%
RIDGE	20	1.7%
SPUR	18	1.5%
PEAK	2	0.1%
<b>totale</b>	<b>1203</b>	<b>100.0%</b>

Tabella 8. Distribuzione delle aree del territorio PON aggregate sui diversi "geomorfon"

La Tabella 8 mostra invece la distribuzione dei "geomorfon" per i 1200 km<sup>2</sup> relativi alle aree storicamente allagate. In questo caso, come era da aspettarsi, osserva la tipica inversione dell'assetto ove le *landform* relative alle morfologie di pianura risultano in un rapporto 20%-80% con quelle di versante. L'incidenza delle diverse forme nei due casi è ben percepibile nel diagramma "a ragnatela" riportato in Figura 7.

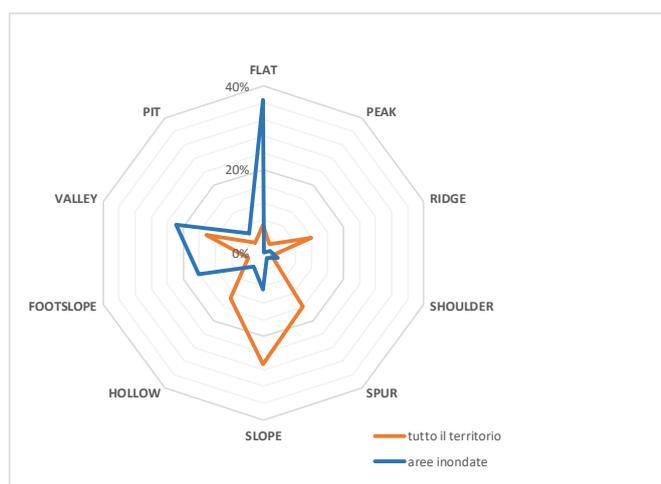


Figura 7. Distribuzione percentuale dei "geomorfon" sull'intero sistema territoriale (arancio) e sulle aree storicamente inondate (blu)

### La distribuzione spaziale dei depositi alluvionali

Le considerazioni prettamente geomorfologiche sinora formulate richiedono di essere integrate con dati di carattere geolitologico. In questo senso si è provveduto ad aggregare le formazioni tipiche dei depositi alluvionali sulla Carta Geologica d'Italia in scala 1:100000 sui tematismi "Depositati alluvionali", "Depositati marini lacustri e fluviali", "spiagge", "dune costiere", "coni di deiezione", "terrazzamenti".

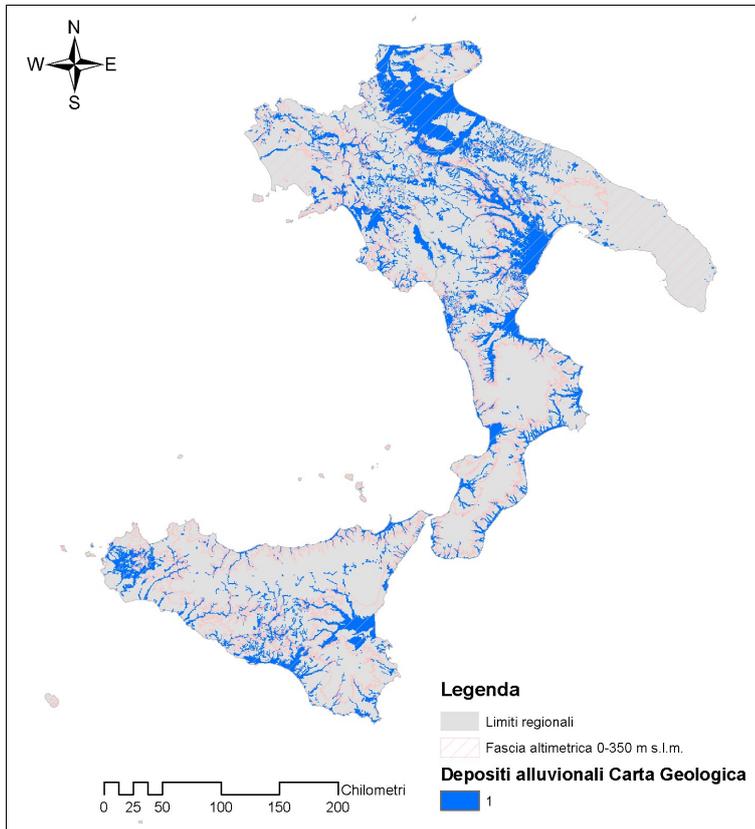


Figura 8. Distribuzione dei temi dei depositi alluvionali aggregati da CGdI 1:10000

La Figura 8 riporta la mappa risultante. I depositi alluvionali coprono 11.164 degli 83543 km<sup>2</sup> delle 5 regioni PON. In essi ricade quasi il 70% delle aree storicamente inondate.

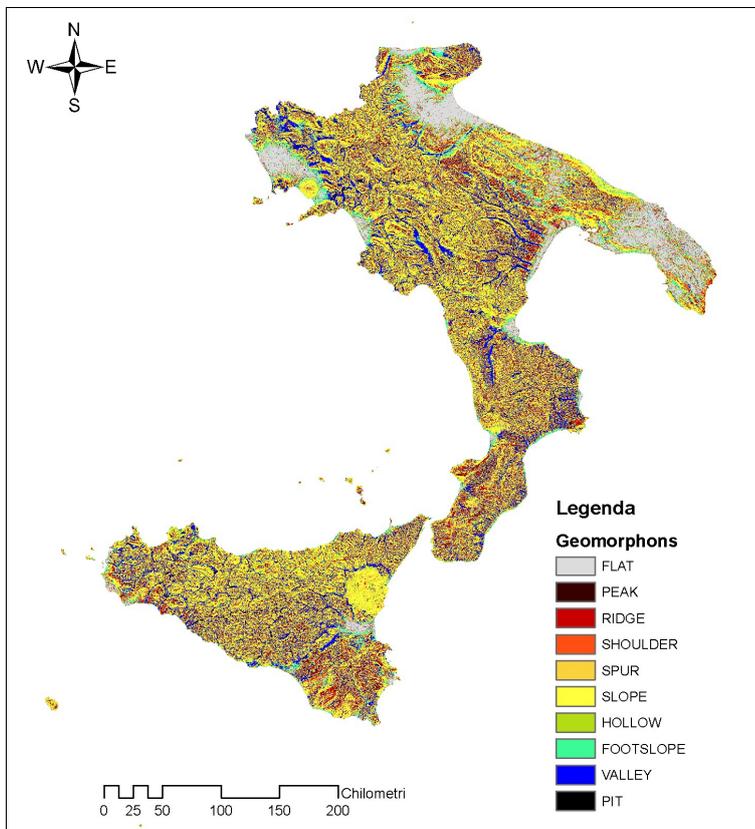


Figura 9. Carta dei "geomorfoloni" sulle 5 regioni del PON

## La definizione del dominio di applicazione del metodo

Da quanto appena cennato (e come era facile immaginare) risulta che le aree di addestramento del modello ricadono per la quasi totalità in zone caratterizzate da specifici caratteri morfologici e litologici. Sono altresì pressoché assenti fonti di documentazione relative a fenomeni (che, seppur più raramente, comunque occorrono) in ambiti geomorfologici e litologici complementare. Per questa ragione conviene identificare correttamente l'ambito del quale è più conveniente e sensato addestrare, validare e utilizzare il modello di suscettibilità.

Resta il fatto che l'aggregazione per unità morfologiche o per "geomorfon" non è semplice per chi deve gestire il metodo. Anche fornendo una maschera informatizzata per definire le aree, resta comunque il problema di una vasta eterogeneità degli interlocutori e il conseguente timore di trasmettere informazioni non chiare o comunque di interpretazione non immediata.

Per questa ragione è stata condotta una verifica per fasce altimetriche, metodologia comunemente utilizzata anche da ISTAT per la ripartizione del territorio. Si tratta delle scelte operate nell'ambito del sistema circoscrizionale statistico istituito nel 1958, che definisce una ripartizione del territorio nazionale per zone altimetriche (montagna, collina, pianura). Tali zone derivano dall'aggregazione di comuni contigui e sono identificate sul territorio sulla base di valori soglia altimetrici<sup>2</sup>. Una tale forma di identificazione dell'area di studio può semplificare l'applicazione del metodo, richiedendo dati facilmente reperibili e di uso corrente.

Per questa ragione è stata svolta una analisi ad hoc. La Figura 10. Andamento cumulato delle aree storicamente inondate in funzione del limite superiore di diverse fasce altimetriche.

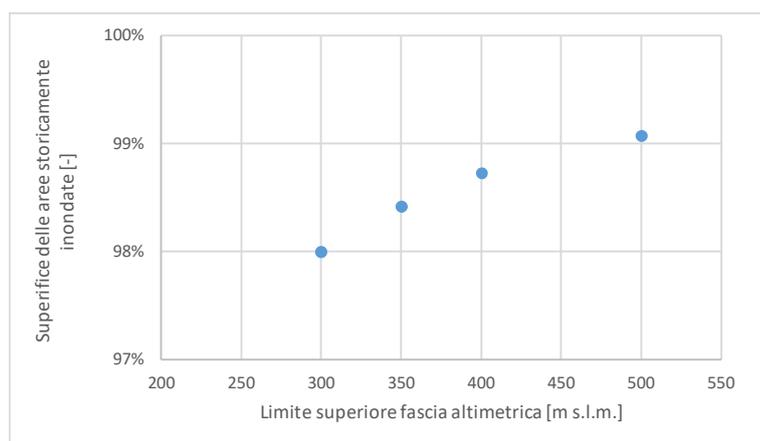


Figura 10. Andamento cumulato delle aree storicamente inondate in funzione del limite superiore di diverse fasce altimetriche.

Il grafico mostra come già il 98% del dato storicamente osservato sia compreso nella fascia tra 0 e 300 metri sul livello del mare. Tale percentuale sale a 98.5% portando il limite superiore a 350 metri. Allo stesso modo, quasi il 90% delle formazioni riconducibili ai depositi alluvionali, ricadono nella medesima fascia. Altresì oltre il 90% delle aree storicamente inondate è riportata al disotto della stessa soglia.

Per queste ragioni si è optato per individuare, nella fascia altimetrica compresa tra 0 e 350 m s.l.m., un'unica unità territoriale omogenea nella quale addestrare il modello di suscettibilità, validarlo e applicarlo.

<sup>2</sup> [https://www.istat.it/it/files//2013/12/Cap\\_1.pdf](https://www.istat.it/it/files//2013/12/Cap_1.pdf)

## Applicazione del metodo

L'applicazione del metodo WoE presuppone che vengano definiti una serie di fattori predisponenti al rischio inondazioni. Nello specifico, in base alla letteratura scientifica disponibile, sono stati definiti quattro fattori quali: la pendenza locale, la permeabilità espressa in termini di Curve Number, la quota relativa e la distanza orizzontale rispetto al reticolo idrografico.

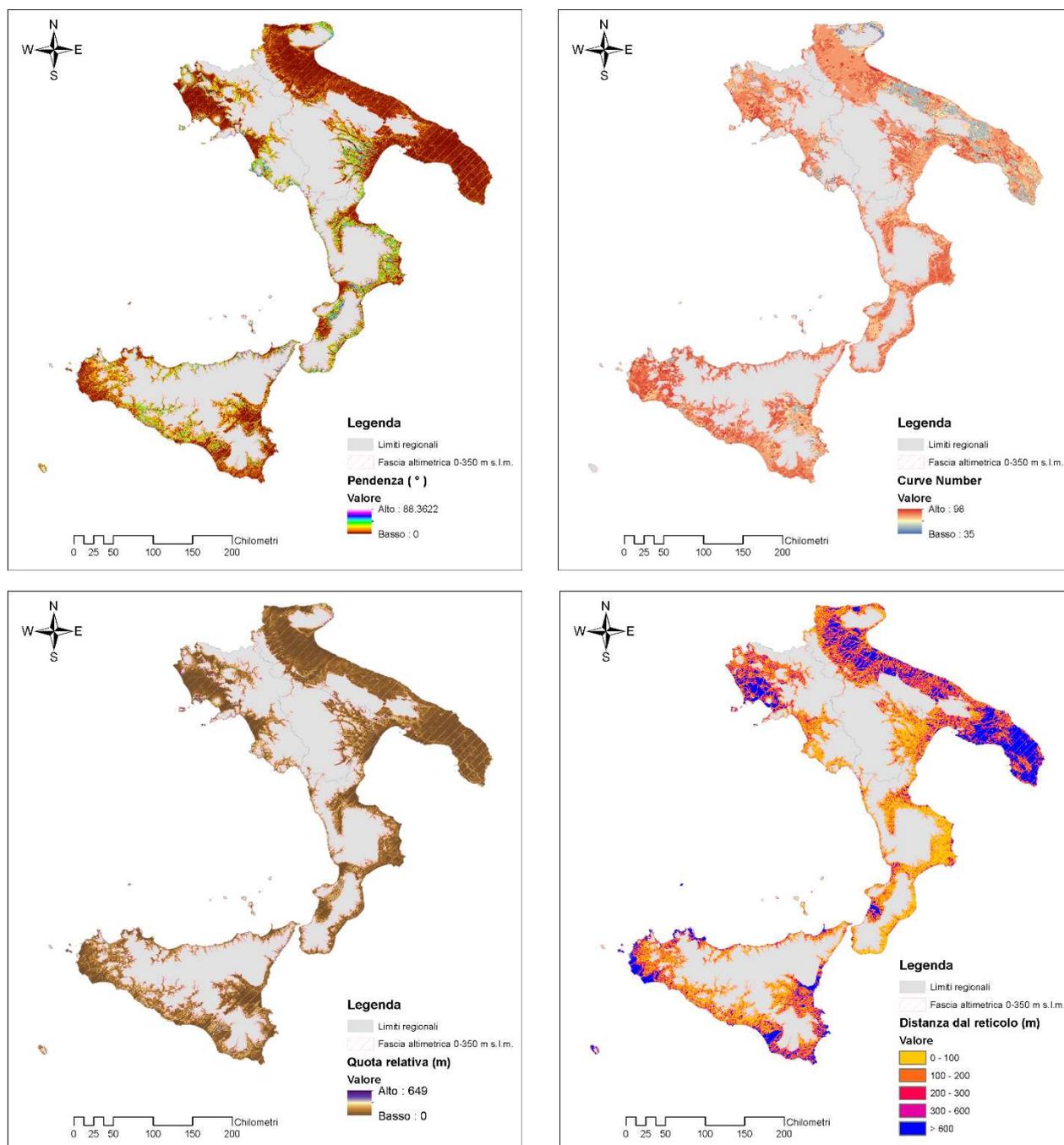


Figura 11. Distribuzione dei valori dei fattori predisponenti utilizzati nel modello WoE (da destra verso sinistra: pendenza locale, Curve Number, quota relativa e distanza orizzontale dal reticolo), lungo la fascia altimetrica investigata

Ciascuno di essi è stato suddiviso in classi e per ciascuna classe è stato calcolato: il peso positivo  $W^+$ , che rappresenta il rapporto tra la probabilità di trovare una classe dove si è verificato l'evento e la probabilità di trovare la stessa classe in un luogo in cui non si è verificato l'evento. Esso quantifica la relazione che intercorre tra una classe di un fattore predisponente e il verificarsi dell'evento, cioè indica l'influenza di tale

classe sul verificarsi dell'evento; Il peso negativo  $W^-$ , al contrario, rappresenta il rapporto tra la probabilità di non trovare una classe dove si è verificato l'evento e la probabilità di non trovare la stessa classe in un'area priva di evento, definendo così l'entità di anti-correlazione tra la classe di un fattore e l'evento.

	Classi	W+	W-	C
<b>Pendenza locale</b>	0 - 1	0.874	-0.518	1.392
	1 - 2	0.155	-0.033	0.188
	2 - 5	-0.158	0.034	-0.193
	5 - 10	-0.895	0.101	-0.995
	>10	-1.822	0.266	-2.087
<b>CN</b>	50-66	-0.311	0.065	-0.376
	66-82	0.269	-0.302	0.570
	82-98	-0.025	0.008	-0.033
	35-50	-2.216	0.085	-2.301
<b>Quota Relativa</b>	0 - 2	1.403	-0.351	1.753
	2 - 5	0.742	-0.273	1.015
	5 - 10	-0.089	0.020	-0.110
	10 - 20	-1.087	0.156	-1.243
	>20	-2.715	0.389	-3.104
<b>Distanza orizzontale dal reticolo</b>	0 - 100	0.039	-0.025	0.064
	100 - 200	0.031	-0.008	0.039
	200 - 300	0.108	-0.016	0.123
	300 - 600	0.139	-0.025	0.164
	>600	-0.404	0.065	-0.468

Tabella 9. Pesi dei fattori predisponenti utilizzati nell'analisi di suscettività da inondazione

La differenza tra i due pesi, viene definita come peso di contrasto C e indica la correlazione spaziale tra la classe del fattore predisponente e il verificarsi dell'evento: un peso di contrasto uguale o prossimo allo 0 indica l'assenza di relazione tra la classe del fattore e l'evento, mentre valori di contrasto positivi o negativi rivelano una correlazione spaziale positiva o negativa della propensione di aree con determinate caratteristiche ad essere interessate dall'evento alluvionale o meno. La combinazione lineare di tutti i valori di C per ciascuna classe di ogni fattore predisponente, consente di calcolare la probabilità a posteriori del verificarsi dell'evento espressa attraverso un indice di suscettività da alluvione.

Tale indice di suscettività è stato poi suddiviso in quattro classi; come mostrato in Tabella 10, partendo dalla prima classe si ottiene dunque: suscettività trascurabile, bassa, media e alta.

Classi di suscettività	Area [km <sup>2</sup> ]	%
Trascurabile	20379	46.37%
Bassa	10318	23.48%
Media	4832	10.99%
Alta	8423	19.16%
<b>totale</b>	<b>43952</b>	<b>100.0%</b>

Tabella 10. Distribuzione delle aree e dei pesi per ciascuna delle classi di suscettività

La Figura 12 riporta la mappa risultante. Le aree a suscettività medio-alta coprono una superficie di 13.255 degli 43.952 km<sup>2</sup> dell'area compresa nella fascia altimetrica fino a 350 metri delle 5 regioni PON.

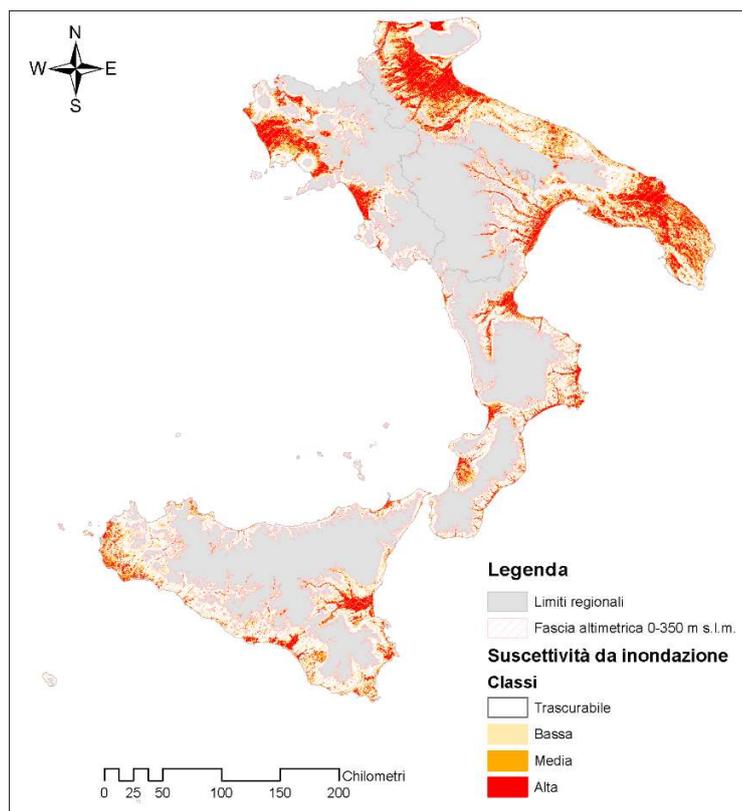


Figura 12. Distribuzione delle classi di suscettività lungo la fascia altimetrica investigata

In conclusione, dallo studio condotto, si evince che circa il 30% del territorio investigato presenta aree a suscettività media e alta e di questo, circa il 76% del dataset di calibrazione delle aree storicamente inondate e circa il 77% di quello di validazione, ricadono sempre nelle medesime classi di suscettività, come mostrato nel grafico in Figura 13.

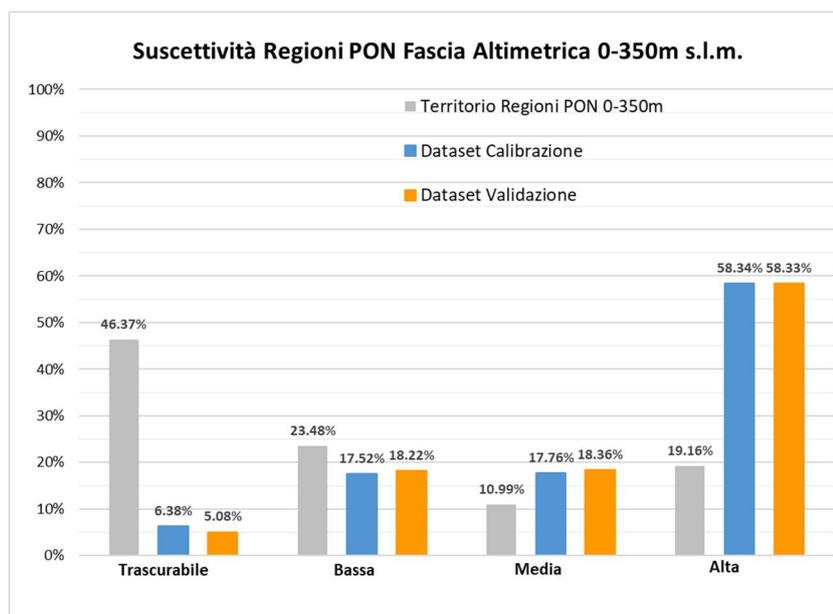


Figura 13. Distribuzione delle classi di suscettività lungo la fascia altimetrica investigata suddivise per dataset di calibrazione e validazione

I risultati ottenuti, quindi, se confrontati anche con le aree a pericolosità P1 e P2 del PAI/PGRA presentati nei grafici in Figura 14 e Figura 15 rispettivamente, consentono di pervenire a conclusioni incoraggianti circa l'affidabilità del metodo e la sua esportabilità in altri contesti territoriali.

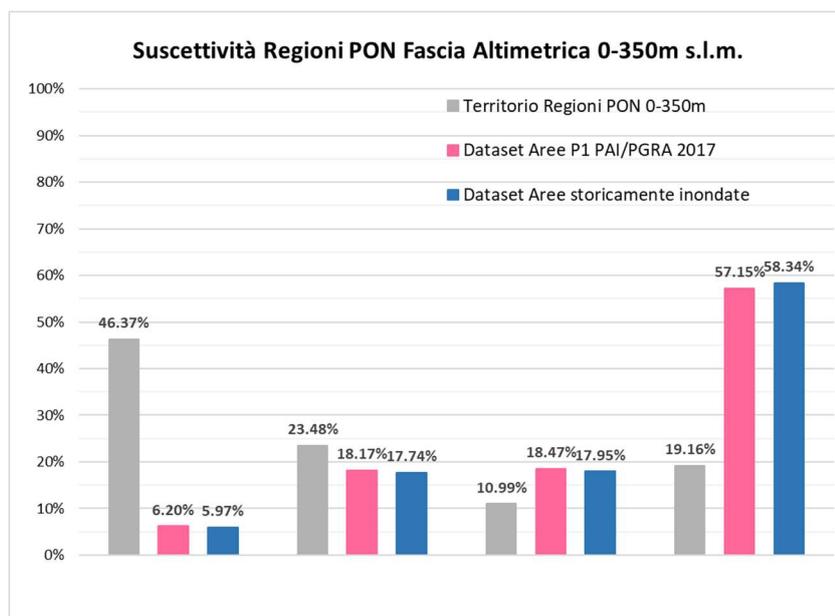


Figura 14. Distribuzione delle classi di suscettività lungo la fascia altimetrica investigata suddivise per aree a pericolosità P1 PAI/PGRA e aree storicamente inondate

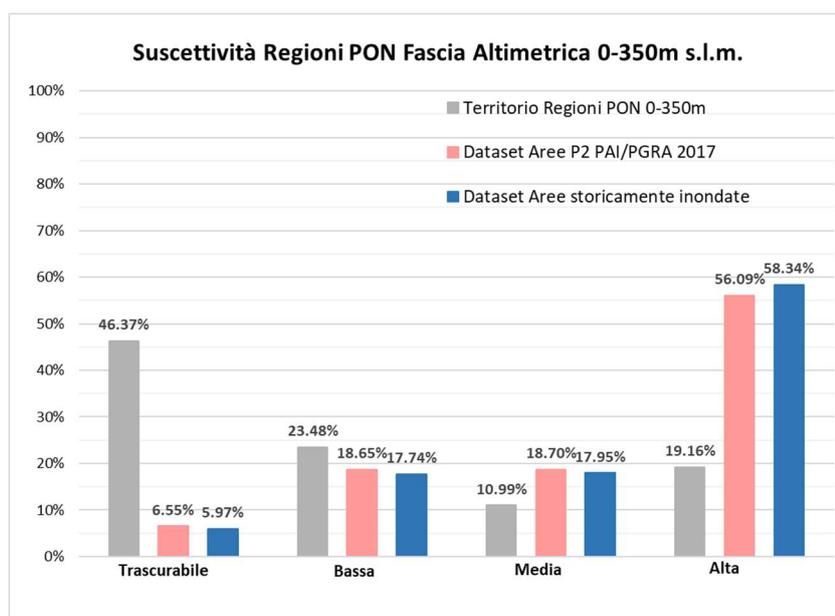


Figura 15. Distribuzione delle classi di suscettività lungo la fascia altimetrica investigata suddivise per aree a pericolosità P2 PAI/PGRA e aree storicamente inondate

## Bibliografia

- Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., & Wright, D. F. (1990). Statistical pattern integration for mineral exploration. *Computer applications in resource estimation*, Pergamon, 1-21.
- Barredo, J. I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Natural Hazards*, 42(1), 125-148.
- Bellicini, L. (2012). *LO STATO DEL TERRITORIO ITALIANO 2012, Insediamento e rischio sismico e idrogeologico*. Roma: ANCE/CRESME.
- Beven, K., & Kirby, M. J. (1979). A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrolog. Sci. Bull.*, 24(1), 43–69.
- Bouwer, M., Bubeck, P., & Aerts, J. C. (2010). Changes in future flood risk due to climate and development in a Dutch polder area. *Glob. Environ. Change* 20 (3), 463-471.
- Catani, F., Casagli, N., Ermini, L., Righini, G., & Menduni, G. (2005). Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin. *Landslides*, 2(4), 329-342.
- Crivellin, W. E. (2008). *Cattolici, politica e società in Piemonte tra '800 e '900*. Effata' Editrice - Fondazione Carlo Donat-Cattin.
- Dahal, R., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Masuda, T., & Nishino, K. (2008). GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environ. Geol.*, 54, 311-324.
- Degiorgis, M., Gnecco, G., Gorni, S., Roth, G., Sanguineti, M., & Taramasso, A. C. (2012). Classifiers for the detection of flood-prone areas using remote sensed elevation data. *Journal of Hydrology*, 470-471, 302-315.
- Di Baldassarre, G., Schumann, G. J., & Bates, P. D. (2009). Near real time satellite imagery to support and verify timely food modelling. *Hydrol. Process.*, 23, 799-803.
- Di Passio, R. (1994). *La Protezione Civile (seconda ed.)*. Roma: Maggioli.
- Domeneghetti, A., Carisi, F., Castellarin, A., & Brath, A. (2015). Evolution of Flood Risk Over Large Areas: Quantitative Assessment for The Po River. *J. Hydrol.*, 527, 809-823.
- Faas, A., & Barrios, R. (2015). Applied Anthropology of Risk, Hazards, and Disasters. *Human Organization*, 74(4). doi:10.17730/0018-7259-74.4.287
- Favro, K. (2013). Le plan communal de sauvegarde, un dispositif juridique adapté à la prévention et la gestion des catastrophes naturelles. *REVUE LAMY DES COLLECTIVITES TERRITORIALES*(88).
- Fenicia, F., Kavetski, D., Savenije, H., Clark, M., Schoups, G., Pfister, L., & Freer, J. (2013). Catchment properties, function, and conceptual model representation: is there a correspondence? *Hydrol. Process.*
- Fenoglio, M. T. (2003). LA COMUNITÀ NEI DISASTRI: UNA PROSPETTIVA PSICOSOCIALE. *Sociologi e Ambiente - Atti del IV Convegno nazionale dei sociologi dell'ambiente - 19-20 settembre 2003*. Torino. Tratto da <http://www.dss.unito.it/cns4/pdf/fenoglio.pdf>
- Flamini, G. (2007). *L'Italia dei colpi di Stato: storie di burattini e di burattinai, di ricatti politici e di micce spente all'ultimo minuto: nomi, cognomi e amicizie segrete degli uomini che hanno attentato alla democrazia*. Newton Compton.
- French, J., Ing, R., Von Allmen, S., & Wood, R. (1983). Mortality from flash floods: a review of National Weather Service reports 1969-81. *Public Health Reports*, 98(6), 584.

- Gamba, M. (2011). *Vermicino. L'Italia nel pozzo*. Sperling & Kupfer editori.
- Gil-Rivas, V., & Kilmer, R. (2016). Building Community Capacity and Fostering Disaster Resilience. *Journal of Clinical Psychology - Special Issue: Disaster Mental Health and Positive Psychology*, 72(12), 1318-1332.
- GNDCI, & Cardinali, M. (1998). *Catalogo delle informazioni sulle localita'italiane colpite da frane e inondazioni*. Roma: Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- Guzzetti, F., Reichembach, P., & Cardinali, M. (1994). The AVI Project: A bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management*, 18(4), 623-633.
- Hack, T. (1957). Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. *U.S. Geol. Surv. Prof Pap.* 294-B, 45-97.
- Horrit, M. S. (2000). Calibration and validation of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery. *Water Resour. Res.*, 36(11), 3279-3291.
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 268(1-4), 87-99.
- Kron, W. (2005). Flood risk= hazard• values• vulnerability. *Water International*, 30(1), 58-68.
- Lamovec, P., Veljanovski, T., Mikoš, M., & Oštir, K. (2013). Detecting flooded areas with machine learning techniques: case study of the Selška Sora river flash flood in September 2007. *J. Appl. Rem. Sens.*, 073564-073564.
- Manfreda, S., Di Leo, M., & Sole, A. (2011). Detection of Flood-Prone Areas Using Digital Elevation Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(10), 781-790.
- Manfreda, S., Samela, C., Gioia, A., Consoli, G. G., Iacobellis, V., Giuzio, L., & Sole, A. (2015). Flood-prone areas assessment using linear binary classifiers based on flood maps obtained from 1D and 2D hydraulic models. *Natural Hazards*, 79(2), 735-754.
- Menoni, S. (2005). *Costruire la prevenzione. Strategie di riduzione e mitigazione dei rischi territoriali*. Bologna: PITTAGORA.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thielen, A. .. (2010). Review article" Assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697-1724.
- Mezzadri, L., & Nuovo, L. (1999). *Storia della carità*. Jaca Book.
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). SCS-CN Method. In *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology* (p. 84-146). Dordrecht.: Springer.
- Musso, S. (A cura di). (1999). *Tra fabbrica e società. Mondi operai nell'Italia del Novecento*. Feltrinelli.
- Nardi, F., Vivoni, E. R., & Grimaldi, S. (2006). Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method. *Water Resour. Res.*, 42, W09409.
- Orlandini, S., Moretti, G., & Albertson, J. D. (2015). Evidence of an emerging levee failure mechanism causing disastrous floods in Italy. *Water Resources Research*, 51.10, 7995-8011.
- Pontier, J. (2012). *LE CODE DE LA SÉCURITÉ INTÉRIEURE*. Tratto da <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02119495/document>
- Pradhan, B. (2010). Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *J. Spatial Hydrol.*, 9, 1-18.

- Pradhan, B. (2011). Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in three test areas in Malaysia. *Environ. Earth Sci.*, 329-349.
- Pradhan, B., & Buchroithner, M. (2010). Comparison and validation of landslide susceptibility maps using an artificial neural network model for three test areas in Malaysia. *Environ. Eng. Geosci.*, 16, 107-126.
- Quarantelli, E. (2000). *Disaster planning, emergency management and civil protection: the historical development of organized efforts to plan for and to respond to disasters*. Newark, Delaware: Disaster Research Center, University of Delaware,.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2016). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), 42-70.
- Regmi, A., Devkota, K., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H., Kumamoto, T., & Akgun, A. (2013). Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arab. J. Geosci.*
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60-91.
- Samela, C., Albano, R., Sole, A., & Manfreda, S. (2018). A GIS tool for cost-effective delineation of flood-prone areas. *Computers, Environment and Urban Systems*, 70,, 43-52.
- Samela, C., Manfreda, S., Paola, F. D., Giugni, M., Sole, A., & Fiorentino, M. (2015). DEM-based approaches for the delineation of flood-prone areas in an ungauged basin in Africa. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(2), 06015010.
- Samela, C., Troy, T. J., & Manfreda, S. (2017). Geomorphic classifiers for flood-prone areas delineation for data-scarce environments. *Advances in water resources*, 2017, 102, 13-28.
- Smith, k., & Ward, R. (1988). *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. Chichester: Wiley.
- Sorvino, S. (2003). *Il sistema normativo della Protezione Civile*. Roma: Dipartimento della Funzione pubblica per l'efficienza delle amministrazioni, Formez, area editoria e document.
- Stepinski, T. F., & Jasiewicz, J. (2011). Geomorphons-a new approach to classification of landforms. *Proceedings of geomorphometry*, 109-112.
- Tehrany, M., Pradhan, B., & Jebur, M. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *J. Hydrol.*, 504, 69-79.
- Tehrany, S., M., S. F., Neamah Jebur, M., Hong, H., Chen, W., & Xie, X. (2017). GIS-based spatial prediction of flood prone areas using standalone frequency ratio, logistic regression, weight of evidence and their ensemble techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1538-1561.
- Trigila, A., & Iadanza, C. (2018). Landslide and flood risk in Italy: hazard and risk indicators. *ISPR A, Rapporti*, 287 bis.
- Trigila, A., Bussettini, M., Iadanza, C., & Lastoria, B. (2018). Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. Edizione 2018. *ISPR A, Rapporti 287/2018 (ISBN 978-88-448-0901-0)*.
- Urbani, P. (1993). *La difesa del suolo*. Roma: Edizioni delle autonomie.
- Vale, L., & Campanella, T. (A cura di). (2005). *The resilient city: How modern cities recover from disaster*. Oxford: Oxford University Press.

- VanZyl, J. (2001). The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, 48(5-12), 559-565.
- Werner, M. G., Hunter, N. M., & Bates, P. D. (2005). Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 314(1-4), 139-157.
- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, 1-12.