

Titolo tesi: VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ DA FRANA INDOTTA DA CICLONI TROPICALI IN CENTRO-AMERICA: APPLICAZIONE ALL'EVENTO IDA (2009) NELL'AREA DELLA CALDERA ILOPANGO (EL SALVADOR, C.A.).

Laureanda: Chiara Martinello

Relatore: Prof. Edoardo Rotigliano

Correlatore: Prof. Christian Conoscenti

Negli ultimi trent'anni la comunità scientifica ha posto grande attenzione alla problematica del dissesto idrogeologico. La noncuranza rispetto alle predisposizioni ambientali dei territori, la frenetica urbanizzazione e le variazioni climatiche in atto, frequentemente contraddistinte da precipitazioni intense e di breve durata, sono spesso responsabili dell'accadimento di fenomeni franosi molto pericolosi, causa di morte e distruzione. I dissesti che destano maggiore preoccupazione risultano essere i debris flow poiché caratterizzati da un'elevata velocità di movimento, da un ingente potere distruttivo e da una notevole propensione all'innescò in caso di eventi meteorici estremi.

I debris flow sono dei fenomeni franosi superficiali che si propagano come flussi rapidi su versanti a media inclinazione dopo un innescò normalmente dovuto a rottura per slide o flow. La massa deformata confluisce lungo le linee di impluvio (Fig.1), dove continua ad arricchirsi in acqua e sedimenti di dimensioni variabili. Quando cessa il confinamento in alveo il surge collassa, provocando la sedimentazione del materiale trasportato (Fig.2) e l'allontanamento dell'acqua che può inondare le aree pianeggianti interessate dal verificarsi del fenomeno.



Fig. 1 – Illgraben (Svizzera), 2016: debris flow in canale fluviale.



Fig. 2 - Giampilieri (ME), 2009: materiale rilasciato dai debris flow.

Uno degli strumenti più efficaci nella mitigazione del rischio da debris flow è l'uso preventivo, nella pianificazione territoriale, delle mappe di suscettibilità. La suscettibilità da frana esprime la probabilità di accadimento di un fenomeno franoso in una data area in funzione delle caratteristiche geoambientali dell'area stessa (Brabb, 1984). Le frane sono infatti il frutto dell'interazione fra un trigger, ovvero una causa di innesco, e un assetto predisponente, rappresentato dalle condizioni geologiche e morfologiche dell'area. A parità di trigger, tali dissesti possono essere sfruttati per prevedere le condizioni di instabilità future. Dal momento che i fattori geomorfologici sono costanti nel tempo, è possibile infatti individuare le relazioni matematiche esistenti fra le diverse condizioni predisponenti e l'innesco dei dissesti al tempo  $t(x)$  per prevedere, a parità di trigger, scenari di franosità al tempo  $t(y)$ .

Diversi studi hanno esaminato la suscettibilità da debris flow in differenti parti del mondo, sia rispetto a un trigger meteorico normale (con valori di pioggia che rientrano nell'andamento pluviometrico medio regionale) sia estremo (con precipitazioni intense e di breve durata che solitamente superano la media stagionale dell'area). Tuttavia, rari sono i casi in cui le due tipologie di innesco vengono investigate contemporaneamente e nessuna ricerca ha definito, ad oggi, qual è la capacità previsionale dei modelli al variare dell'intensità del trigger. L'applicazione dei risultati ottenuti da suddetti studi è, quindi, limitata a un evento di innesco atteso di magnitudo pari al fenomeno meteorico con il quale sono stati calibrati i modelli previsionali.

Scaturiscono così dei quesiti sulla tematica ai quali la comunità scientifica deve inevitabilmente rispondere per poter ritenere valide e utilizzabili tali ricerche. Qual è

l'effettiva capacità previsionale dei modelli stocastici di individuare i dissesti attivati da un trigger di intensità differente rispetto a quello di calibrazione? Si instaurano nuove leggi di regressione fra le variabili di controllo e la stabilità/instabilità dell'area in caso di piogge estreme?

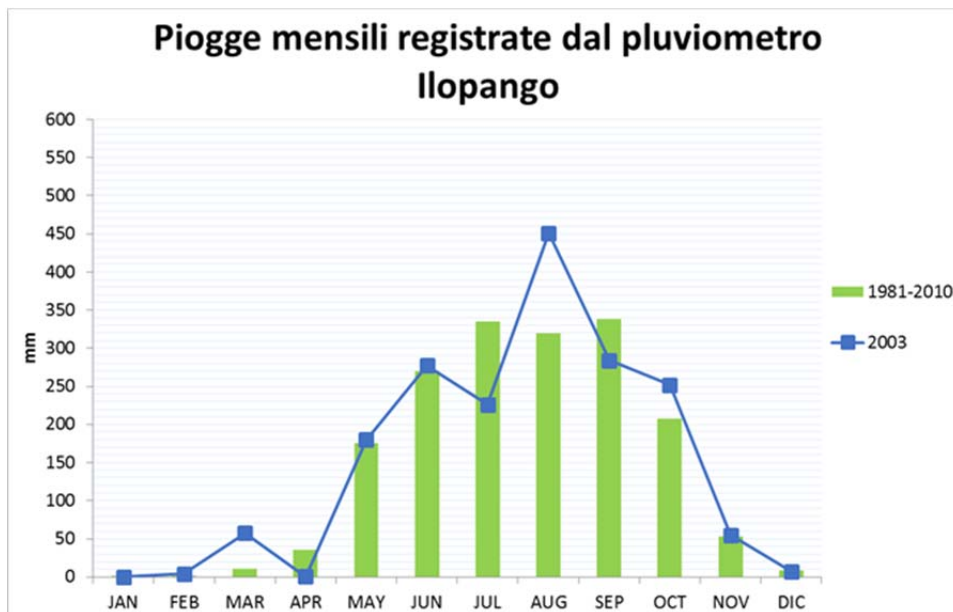
Risolvere tali problematiche scientifiche significa sviluppare delle mappe di suscettibilità da frana ottimali, capaci di minimizzare il rischio nei confronti della popolazione e i danni ai beni materiali, massimizzare l'efficacia delle precauzioni prese, sviluppare una gestione del territorio coerente con le particolarità ambientali.

La ricerca svolta in questo lavoro di tesi ha cercato di rispondere ai quesiti scientifici fin qui esposti. Per fare ciò sono state usate particolari attenzioni sia rispetto alla scelta dell'area in studio sia rispetto alle metodologie applicate.

L'area campione investigata (~26 km<sup>2</sup>), situata a NE dalla Caldera Ilopango - El Salvador – Centro America, è un campo applicativo ideale per il raggiungimento degli obiettivi dello studio. Caratterizzata da un'elevata incidenza di fenomeni meteorici estremi, da un regime climatico caldo-umido e da particolari condizioni geomorfologiche, il territorio offre archivi di dissesti sviluppatisi con trigger meteorici di diversa intensità.

Nello specifico, in questa ricerca sono stati sottoposti a studio l'archivio frane 2003 e quello 2009. Gli inventari sono stati sviluppati attraverso l'investigazione in remoto delle immagini satellitari offerte dal software Google Earth<sup>TM</sup>.

L'archivio 2003 racchiude i dissesti attivatisi a causa delle piogge stagionali del 2003. Tali precipitazioni risultano essere piuttosto regolari e in linea con il trend pluviometrico regionale (Graf. 1). La franosità risultante è un tipico scenario di instabilità legato ai processi di degradazione dei versanti, con dissesti frequenti lì dove vi è uno scalzamento alla base (Fig. 3) e meno presenti in open slope. Sono stati individuati 1823 fenomeni riportati in archivio tramite LIP (Fig.4).



Graf. 1 - Andamento mensile delle precipitazioni del 2003 rispetto ai valori medi del periodo 1981-2010.



Fig. 3 - Particolare dei dissesti in una valle fluviale.

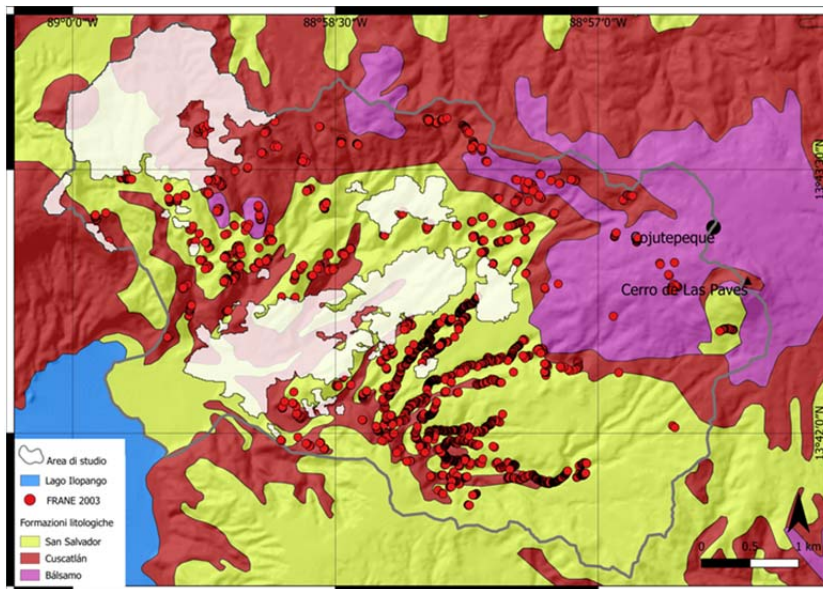


Fig. 4 – Distribuzione dei fenomeni 2003.

L'archivio eventi 2009 raccoglie i fenomeni franosi innescati dalle piogge intense provocate dal passaggio dell'uragano Ida ovvero dal sistema di bassa pressione 96/E ad esso associato, fra il 7 e 8 novembre 2009 (Fig. 5). Tale perturbazione, rimasta nella storia come una delle peggiori catastrofi del Salvador, ha prodotto un picco di pioggia di 355 mm in sole 5 h e una cumulata in due giorni che supera di circa 5 volte la media stagionale (Graf. 2). La franosità è molto più intensa (Fig. 6), con debris flow dalla tipica morfologia canalizzata frequenti anche in open slope (Fig. 7). Sono stati individuati 2248 fenomeni tutti attivi dunque sviluppatisi in soli due giorni al passaggio della perturbazione Ida-96/E. Anche in questo caso i fenomeni sono stati vettorializzati tramite LIP.

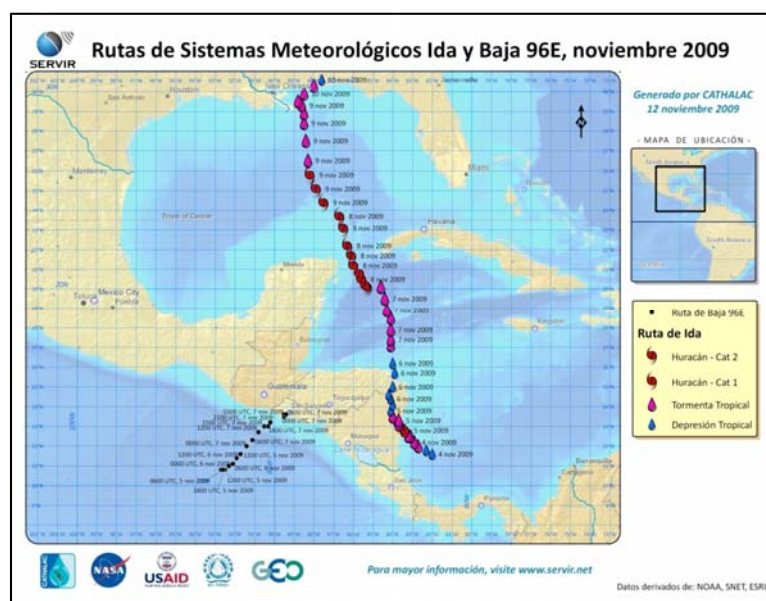
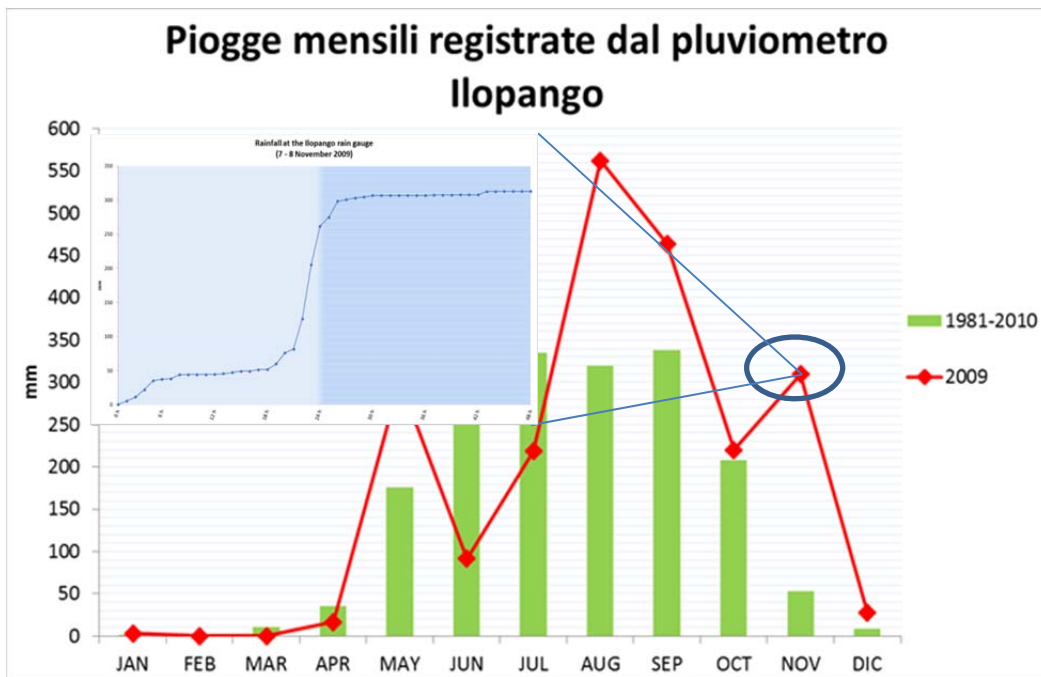


Fig. 5 – Il Centro America interessato del ciclone Ida e dal sistema di bassa pressione 96/E ad esso associato.



Graf. 2 - Andamento mensile delle precipitazioni del 2009 confrontate con quelle del periodo 1981-2010 e particolare dell'evento Ida-96/E.



Fig. 6 - Caldera Ilopango, area in studio: fenomeni innescati da Ida.



Fig. 7 - Caldera Ilopango, area in studio: fenomeni innescati da Ida.

Per questo lavoro di tesi si è scelto di utilizzare come TMU le grid cells. Queste ultime sono state ricavate automaticamente tramite software GIS dal DEM a 10 m dell'area. L'unità di mappatura consiste, dunque, in celle di dimensioni 10x10 m.

Sulla base della disponibilità dei dati necessari a ricavare l'andamento dei predittori all'interno dell'area indagata, nel presente studio, sono stati selezionati quali potenziali fattori di controllo i seguenti (Fig. 8): *LIT* (litologia), *USE* (uso suolo), *ELE* (elevazione), *ASP* (esposizione), *LCL* (landform classification o classificazione delle forme), *PLN* (plan curvature o curvatura piana della superficie del versante), *PRF* (profile curvature o curvatura di profilo della superficie del versante), *TWI* (topographic wetness index o indice topografico di umidità), *TRI* (terrain ruggedness index o indice di asperità), *STP* (steepness o acclività). Tali fattori sono stati ricavati tramite l'esecuzione di appositi algoritmi ovvero l'avvio di specifici tools dei software QGIS<sup>TM</sup> e SAGAgis<sup>TM</sup>.

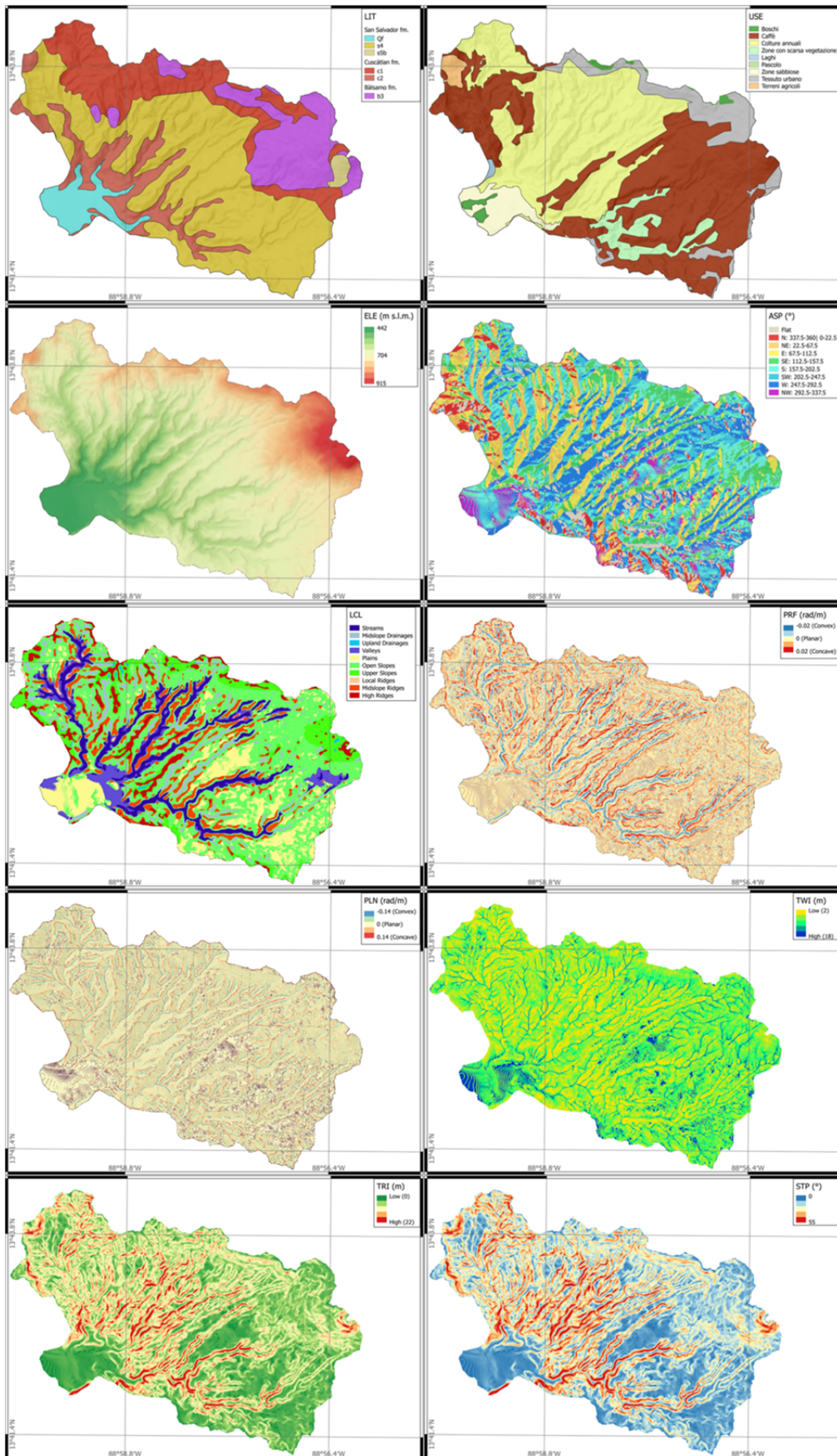


Fig. 8 – Carte dei fattori predisponenti prescelti.



I metodi adoperati in questa ricerca risultano essere innovativi rispetto alle tecniche classiche della letteratura di argomento ed estremamente efficaci per rispondere ai quesiti in studio. L'applicazione del metodo statistico multivariato MARS<sup>TM</sup> (J.H. Freeman, 2011) ha permesso di ricavare modelli di regressione multipla capaci di indentificare le relazioni matematiche esistenti fra il set dei fattori di controllo scelti e le caratteristiche di ciascun archivio di frane, ovvero le condizioni di stabilità/instabilità provocate da uno specifico trigger di calibrazione (di intensità normale o estrema). La scelta di suddividere gli archivi di frane in differenti dataset ha permesso di ottenere una modellazione robusta e articolata. Le strategie di validazione impiegate hanno consentito poi di analizzare la capacità previsionale dei modelli di regressione multipla rispetto a specifici scenari di instabilità provocati da differenti magnitudo di innesco.

Per la validazione sono state adoperate le tecniche della self-validation (4 modelli previsionali ricavati), della chrono-validation (4 modelli previsionali ricavati) e della spatial-validation (1 modello previsionale ricavato).

Nei modelli sottoposti a self-validation il dataset di training e il dataset di test sono stati individuati nel medesimo archivio di frane. Dal dataset principale sono stati estratti 10 insiemi bilanciati (stesso numero di celle instabili/stabili) i cui casi negativi sono stati determinati in modo random. Ciascun archivio è stato poi posto a cross-validazione a 10 fold: 9 set sono stati utilizzati per la calibrazione e 1 set per la validazione. Il processo iterativo ha permesso di far variare i set di calibrazione e quello di validazione ottenendo così 100 modelli di regressione multipla e 100 immagini di suscettibilità per ciascun modello previsionale prodotto.

Nei modelli chrono-validati il dataset di training e il dataset di test fanno riferimento ad un determinato anno e, dunque, sono contraddistinti da uno specifico trigger. In questa ricerca sono state applicate sia le procedure di forward chrono-validation (con un'immagine previsionale proiettata nel futuro rispetto all'epoca del dataset di training) sia le procedure di backward chrono-validation (con un'immagine previsionale proiettata nel passato rispetto all'epoca del dataset di training). La calibrazione è stata effettuata su ciascuno dei 100 archivi bilanciati ricavati dal dataset di training prestabilito e la validazione è stata applicata rispetto ai 100 archivi bilanciati estratti dal dataset di test prescelto. Anche in questo caso, per ciascun modello previsionale sono stati ricavati 100 modelli di regressione multipla e 100 immagini di suscettibilità.

Nel modello spazio-validato il dataset di training e il dataset di test sono caratterizzati dallo stesso trigger ma insistono su porzioni differenti dell'area in studio. Anche in questo caso la

calibrazione è stata effettuata su ciascuno dei 100 archivi bilanciati ricavati dal dataset di training prestabilito e la validazione è stata applicata rispetto ai 100 archivi bilanciati estratti dal dataset di test prescelto. Il processo ha permesso di acquisire 100 modelli di regressione multipla e 100 immagini previsionali.

La reiterazione delle procedure finora esposte è stata sfruttata per creare dei modelli finali medi “oggettivi” che non risentissero cioè di nessuna influenza determinata dalla scelta dei dati di training e dei dati di test o, ancora, dal dataset di partenza. La scelta risulta essere così fondamentale per valutare la performance della modellazione in termini di accuratezza e di riproducibilità dei risultati.

Per individuare l’abilità previsionale e l’accuratezza di ciascun modello sono stati analizzati i valori degli indici di validazione (TP, FP, TN e FN) ottenuti dall’uso delle confusion matrix (il cui cut-off è stato ricavato tramite il metodo di Youden, 1950) e le ROC-curve. Da tali strumenti è stato possibile infatti determinare gli AUC e le statistiche descrittive (sensitivity, specificity, accuracy, positive prediction value e negative prediction value) dei modelli (Tab.1).

<i>MODELLI</i>	<i>AUC</i>	<i>s.d.</i>	<i>Cut-off</i>	<i>SENSITIVITY</i>	<i>SPECIFICITY</i>	<i>PPV</i>	<i>NPV</i>	<i>ACCURACY</i>
SELF2003	0,83	0,02	0,52	0,78	0,72	0,74	0,76	0,75
<sup>FRW</sup> CHRONO 2003 <sub>CF</sub> -2009 <sub>CF</sub>	0,77	0,01	0,52	0,68	0,72	0,71	0,69	0,70
<sup>FRW</sup> CHRONO 2003 <sub>CF</sub> -2009 <sub>ALL</sub>	0,73	0,01	0,52	0,64	0,70	0,68	0,66	0,67
<sup>FRW</sup> CHRONO 2003 <sub>CF</sub> -2009 <sub>CB</sub>	0,65	0,02	0,52	0,58	0,61	0,60	0,59	0,59
<sup>BCK</sup> CHRONO 2009 <sub>CF</sub> -2003 <sub>CF</sub>	0,78	0,01	0,47	0,79	0,63	0,68	0,76	0,71
SELF2009 <sub>ALL</sub>	0,81	0,02	0,45	0,83	0,63	0,69	0,79	0,73
SELF2009 <sub>CF</sub>	0,83	0,02	0,47	0,84	0,66	0,71	0,80	0,75
SELF2009 <sub>CB</sub>	0,80	0,03	0,52	0,75	0,70	0,71	0,73	0,72
TRASFERRED 2009 <sub>CF</sub> -2009 <sub>CB</sub>	0,72	0,01	0,47	0,83	0,46	0,61	0,73	0,65

Tab. 1 – Parametri cut-off dipendenti e AUC dei nove modelli previsionali.

I risultati ottenuti mostrano che i modelli calibrati con l’archivio 2003, siano essi self o crono-validati, presentano una sopravvalutazione dei negativi, come dimostrato dall’elevata quantità di FN generati. Tali modelli, caratterizzati da un ridotto potere previsionale dei casi positivi, riescono a individuare più TP che TN.

I modelli self e crono-validati calibrati con l’archivio 2009, nonostante abbiano un ridotto potere previsionale dei negativi, riescono a massimizzare i TN mentre sviluppano una sopravvalutazione dei positivi, generando numerosi FP.

Il modello chrono-validato calibrato esternamente (su una porzione di area in studio diversa da quella di validazione) e con trigger differente da quello di validazione, risulta essere totalmente inutilizzabile, con una previsione che rasenta la casualità.

Il modello spazio-validato, a causa delle differenti condizioni geomorfologiche del dataset di test rispetto al dataset di training, risente di un'importante incapacità previsionale dei casi negativi (sebbene quelli individuati siano fondamentalmente TN), e sviluppa un'elevata quantità di FP.

In conclusione si può affermare che una mappa di suscettibilità ricavata da regressioni multiple calibrate rispetto a un trigger meteorico di intensità normale riesce a individuare solo una piccola parte di celle positive in caso di trigger estremo, sviluppando così un elevato numero di falsi negativi (FN, errori di tipo II).

Una mappa di suscettibilità ottenuta da modelli allenati con un trigger estremo riesce invece a determinare i casi positivi generati da un trigger normale senza discriminare in modo efficace le possibili celle stabili, dando origine così a dei FP (errori di tipo I). Bisogna ricordare tuttavia che non tutti i FP sono effettivamente degli errori di previsione: nella maggior parte dei casi si tratta infatti di celle che si attiveranno in caso di trigger estremo (diventando così TP).

La mappa di suscettibilità prodotta da un modello allenato su un trigger estremo risulta essere così cautelativa e dunque la migliore fra quelle generate (Fig.9).

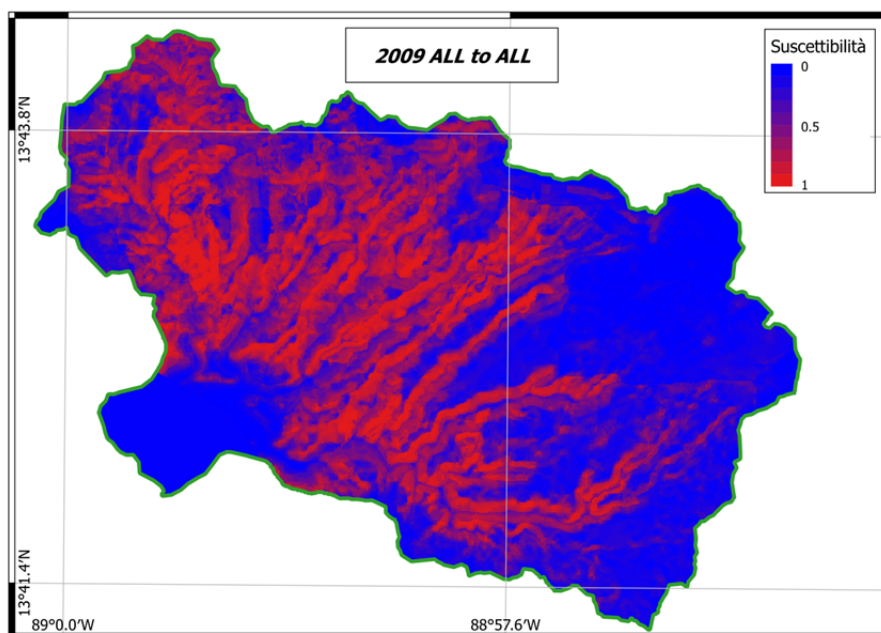


Fig. 9 – Mappa di suscettibilità per l'area in studio ricavata dall'applicazione del modello di regressione multipla 2009ALL.

Tuttavia, i risultati mostrano anche che la strategia applicativa migliore consiste in una modellazione stocastica di tipo multi-temporale ovvero calibrata contemporaneamente rispetto a differenti trigger di diversa intensità, così da poter migliorare il rapporto tra positivi e negativi, minimizzando la quantità di FN e FP prodotti.