



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali

**Modellazione distribuita dei franamenti superficiali innescati da
eventi meteorici intensi nella zona della “Val di Sole” (Trentino-A.A.)**

Relatore: Prof. Marco Borga

Correlatore: Dott.ssa Giulia Zuecco

Dott. Francesco Marra

Laureando:

Daniele Oss Cazzador

Matricola: 1005665

ANNO ACCADEMICO 2012 – 2013

Riassunto

La maggior parte dei franamenti che si verificano lungo pendii sono dati da distacchi superficiali che interessano uno spessore limitato di 1-2 m. L'innesco è dato generalmente da eventi meteorici intensi che portano a notevoli quantità di acqua infiltrate, riducendo la stabilità del suolo. Di conseguenza tende ad aumentare il rischio di elevati quantitativi di sedimenti trasportati a valle entro le incisioni torrentizie, con effetti potenzialmente molto dannosi per l'uomo e i relativi manufatti.

Mediante l'applicazione del codice di calcolo SHALSTAB si vuole determinare, e quindi prevedere, la suscettibilità a franamenti superficiali del terreno in presenza di fenomeni meteorici intensi.

Il metodo prevede un modello idrologico stazionario ed un modello geotecnico dell'equilibrio limite. Le variabili considerate sono di tipo topografico (area drenata, larghezza delle celle del reticolo e pendenza del pendio), di tipo idrologico (intensità di pioggia) e legate alle caratteristiche del suolo (coesione, peso specifico, angolo di attrito interno e trasmissività).

L'applicazione del modello SHALSTAB in questo elaborato avviene relativamente a tre bacini alpini situati in Val di Sole, in Trentino-Alto Adige: le qualità predittive del modello sono state analizzate confrontando la mappa di pioggia critica (output del modello) con la mappa dei franamenti verificatisi nell'autunno del 2000 e del 2002 in seguito a fenomeni meteorici intensi relativamente brevi (Lanni et al., 2012). L'analisi di sensibilità del modello è stata eseguita utilizzando diversi valori di coesione radicale, spessore del suolo e angolo di attrito interno del materiale. Il software ArcGIS è stato utilizzato per preparare una serie di mappe di input al modello, mentre la mappa della pioggia critica è stata ottenuta mediante l'eseguibile "SSM". Gli applicativi "Command Kernel" e "Kernelplot" sono stati usati per analizzare i risultati delle simulazioni.

Il modello SHALSTAB mostra buone capacità nel riprodurre la distribuzione spaziale dei franamenti superficiali nei tre bacini alpini, in particolare usando un valore predefinito di spessore del suolo (1 m) e un angolo di attrito interno del materiale (38°) rilevato in campo. Da notare che la calibrazione della coesione radicale assume un'importanza minore rispetto agli altri parametri specialmente quando i franamenti sono localizzati in aree boscate.

Abstract

Many landslides occurring on hillslopes are shallow and affect the surface layer of the soil (1-2 m deep). The trigger is mainly due to intense rainfall events that determine the infiltration of bigger amounts of water and the reduction of the hillslope stability. As a consequence, the risk of sediment transport in the stream network increases with potentially dangerous effects on human activities.

The application of SHALSTAB model is used to determine and predict the susceptibility of a catchment to shallow landslides triggered by intense precipitation events.

The model includes a steady state hydrological model and a geotechnical model. Topographic (drainage area, outflow boundary length and hillslope angle) and hydrological terms (rainfall rate) and the soil properties (root cohesion, soil bulk density, the angle of internal friction and the soil transmissivity) are considered.

SHALSTAB model is applied to three alpine catchments in Val di Sole (Trentino-Alto Adige): the model performance is analysed by comparing the critical rainfall map (model output) to the map of landslides, that were triggered during the falls of 2000 and 2002 as a result of relatively short duration storms (Lanni et al., 2012). A sensitivity analysis of the model has been performed using different set of parameters for root cohesion, soil depth and the angle of internal friction. ArcGIS software has been used to prepare the input maps, while the critical rainfall maps have been obtained using the “SSM” executable. “*Command Kernel*” and “*Kernelplot*” executables have been used to analyse the results of the simulations.

SHALSTAB model shows a good capability to reproduce the distribution of landslides for the three alpine catchments, especially using the default value for soil depth (1 m) and the angle of internal friction (38°) identified on a field survey. It is remarkable that the root cohesion calibration has less importance when shallow landslides are located in forested areas.

Indice

Riassunto.....	3
Abstract	4
Obiettivi.....	8
1 Introduzione	9
1.1 SHALSTAB.....	10
1.1.1 Modello geotecnico.....	10
1.1.2 Modello idrologico.....	12
1.1.3 Integrazione modello geotecnico ed idrologico	13
1.2 Area di studio.....	16
1.2.1 Il bacino di Rio Cortina.....	19
1.2.2 Il bacino di Rio Fraviano	20
1.2.3 Il bacino di Rio Pizzano.....	22
2 Materiali e metodi.....	24
2.1 Descrizione degli eseguibili.....	25
3 Risultati e discussione	32
3.1 Il bacino di Rio Cortina.....	32
3.2 Il bacino di Rio Fraviano	36
3.3 Il bacino di Rio Pizzano.....	41
3.4 Profondità del suolo 0,6 m e 0,8 m.....	47
3.5 Angolo attrito interno del suolo a 34° e 45°	50
4 Conclusioni	52
Bibliografia.....	53
Bibliografia Web.....	53
Appendice.....	54

Indice figure

Fig. 1. Schema delle forze agenti in una striscia di terreno nell'ipotesi di filtrazione parallela al pendio.....	11
Fig. 2. Definizione di stabilità del pendio in funzione di pendenza e indice di saturazione	14
Fig. 3. Definizione di stabilità del pendio in funzione di pendenza ed area drenata/b	15
Fig. 4. Inquadramento dei tre bacini idrografici (Lanni et al., 2012)	16
Fig. 5. Immagine 3D dei tre bacini (da Google Earth).....	17
Fig. 6. Inquadramento geologico, foglio n°42 Malè.....	18
Fig. 7: pendenza (A) ed esposizione (B) del bacino di Rio Cortina.....	19
Fig. 8: Uso del suolo (A) e raster con le quote (B) del bacino di Rio Cortina	20
Fig. 9: pendenza (A) ed esposizione (B) del bacino di Rio Fraviano	21
Fig. 10: Uso del suolo (A) e raster con le quote (B) del bacino di Rio Fraviano	21
Fig. 11. Pendenza (A) ed esposizione (B) del bacino di Rio Pizzano	22
Fig. 12. Uso del suolo (A) e raster con le quote (B) del bacino di Rio Pizzano	23
Fig. 13. Maschera dell'applicativo SSM.....	25
Fig. 14. Uso del suolo dei tre bacini	26
Fig. 15. Algoritmi a. D8, b. Multiflow, c. D-Inf.....	27
Fig. 16. File CR riportante tutti i tre bacini, Rio Cortina, Rio Fraviano, Rio Pizzano	28
Fig. 17. Zoom sui franamenti mappati (poligoni con bordi neri) e pioggia critica nei tre bacini.....	29
Fig. 18. Valori di pioggia critica. Nella parte superiore della tabella il bacino viene classificato per numero di celle per relativa classe di instabilità, nella parte inferiore per percentuale per relativa classe di instabilità.....	30
Fig. 19. Grafico rappresentante le frequenze cumulate di pioggia critica e dei franamenti	31
Fig. 20. Risultati più significativi per il bacino di Rio Cortina, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx)	33
Fig. 21. Risultati meno significativi per il bacino di Rio Cortina, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx)	35
Fig. 22. Risultati più significativi per il bacino di Rio Fraviano, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx)	38
Fig. 23. Risultati meno significativi per il bacino di Rio Fraviano, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx)	40

Fig. 24. Risultati più significativi per il bacino di Rio Pizzano, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx)	43
Fig. 25. Risultati meno significativi per il bacino di Rio Pizzano, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx)	45
Fig. 26. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Cortina con profondità del suolo 1 m (a sx) e 0,6 m (a dx) e valori di coesione stabili a 500 N/m ² per i prati e 1500 N/m ² per le aree boscate (algoritmo di area drenata D8)	47
Fig. 27. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Fraviano con profondità del suolo 1 m (a sx) e 0,6 m (a dx) e valori di coesione stabili a 500 N/m ² per i prati e 5000 N/m ² per le aree boscate (algoritmo di area drenata Multiflow)	48
Fig. 28. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Cortina con profondità del suolo 1 m (a sx) e 0,8 m (a dx) e valori di coesione stabili a 500 N/m ² per i prati e 1500 N/m ² per le aree boscate (algoritmo di area drenata D8)	49
Fig. 29. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Fraviano con profondità del suolo 1 m (a sx) e 0,8 m (a dx) e valori di coesione stabili a 500 N/m ² per i prati e 5000 N/m ² per le aree boscate (algoritmo di area drenata Multiflow)	49
Fig. 30. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Cortina modificando il valore di angolo di attrito interno da 38° (a sx) a 34° (a dx)	50
Fig. 31. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Cortina modificando il valore di angolo di attrito interno da 38° (a sx) a 45° (a dx)	51

Obiettivi

L'obiettivo che si prefigge la seguente tesi è l'analisi di sensibilità del modello SHALSTAB applicato a tre bacini situati in Val di Sole (Trentino-Alto Adige), interessati da franamenti superficiali innescati da eventi meteorici intensi.

Attraverso questo studio si vuole determinare la validità del modello relativamente a quest'area, ed eventualmente estenderne l'applicazione a bacini limitrofi con l'intento di prevenire fenomeni di dissesto potenzialmente disastrosi per l'uomo ed i suoi manufatti.

1 Introduzione

La tesi relativa all'utilizzo del modello SHALSTAB nasce dall'interesse verso quello che riguarda l'ingegneria forestale e le sistemazioni idrauliche, nonché gli eventi naturali che si verificano in montagna, quali possono essere moti valanghivi, piene o franamenti più o meno superficiali. Il modello SHALSTAB ricade in quest'ultimo campo, i distacchi superficiali. I distacchi superficiali sono generalmente indotti da una riduzione delle forze stabilizzanti agenti sul terreno, quali la forza peso e l'angolo di attrito interno del suolo, a favore delle forze destabilizzanti, quali possono essere dovute alla morfologia del terreno (pendenza), condizioni climatiche (precipitazioni, cicli gelo e disgelo) o caratteristiche litologiche. Il fenomeno dei franamenti è dovuto in particolare alla pressione interstiziale generata dalla presenza di falda sottosuperficiale di altezza variabile, causata dall'infiltrazione di acqua meteorica. Attualmente sono state e si stanno sviluppando molte applicazioni sempre più efficienti e complesse per la prevenzione del pericolo dovuto ai franamenti. SHALSTAB, nella sua relativa semplicità, può risultare molto utile a questo scopo.

SHALSTAB si caratterizza per utilizzare un modello idrologico stazionario (*steady-state*). Alcuni applicativi più recenti e complessi si indirizzano verso un modello idrologico quasi-dinamico (*Quasi-Dynamic Shallow Landsliding Model – QDSLAM*) oppure considerano i processi di connettività idrologica sottosuperficiale (*Connectivity Index-based Shallow Landslide Model, CI-SLAM*). Nello studio condotto da Lanni et al. (2012) vengono applicati ai tre bacini descritti in questa tesi, Rio Cortina, Rio Fraviano, Rio Pizzano, i modelli CI-SLAM e QDSLAM, confrontandone i risultati. Tali modelli prendono in considerazione un maggior numero di parametri, tuttavia, seppur meno preciso, anche SHALSTAB consente una predizione dei franamenti con margine di sicurezza accettabile e con questa tesi si vuole effettuare un'analisi di stabilità sugli stessi bacini.

1.1 SHALSTAB

Il modello, inteso essenzialmente ad individuare le modalità tramite le quali le caratteristiche topografiche governano il processo di instabilità, si compone di due parti: un modello idrologico per la descrizione in condizioni di moto permanente del processo di filtrazione parallelo al pendio ed un modello basato sulla teoria dell'equilibrio limite di un pendio infinitamente esteso per l'analisi di stabilità dei pendii in presenza di falda (Dalla Fontana et al., 1998).

Lo schema di calcolo utilizzato è stato quello proposto da Montgomery e Dietrich (1994), corrispondente al modello SHALSTAB.

SHALSTAB è un modello fisico sviluppato per prevedere movimenti superficiali innescati da fenomeni meteorici intensi: le condizioni di stabilità di un versante vengono descritte tramite un semplice modello idrologico stazionario ed espresse in funzione dell'area contribuyente, della pendenza locale, dell'intensità di pioggia e delle caratteristiche idrologiche e geomeccaniche del terreno (Dalla Fontana et al., 2005).

1.1.1 Modello geotecnico

SHALSTAB è basato su un pendio infinitamente esteso che risponda alla legge di Mohor-Coulomb, nel quale la componente tangenziale τ che si oppone allo slittamento di un volume di terra, è uguale alla forza di resistenza data dalla coesione del suolo (e/o delle radici), C , e dalla forza di attrito data dal peso normale al piano di slittamento.

$$T = C + (\sigma - u)\tan\phi \quad (1)$$

dove:

σ è il peso normale, u è la pressione dei pori che si oppone e ϕ è l'angolo di attrito interno del suolo (Fig. 1, Tabella 1). Un'altra assunzione di questo modello è che la resistenza al movimento lungo i bordi e l'estremità della frana non sono significativi (<http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/>).

Si consideri lo schema in Fig. 1 di un pendio infinitamente esteso, con superficie di scorrimento parallela al versante, per il quale venga ritenuta valida l'applicazione della teoria dell'equilibrio limite:

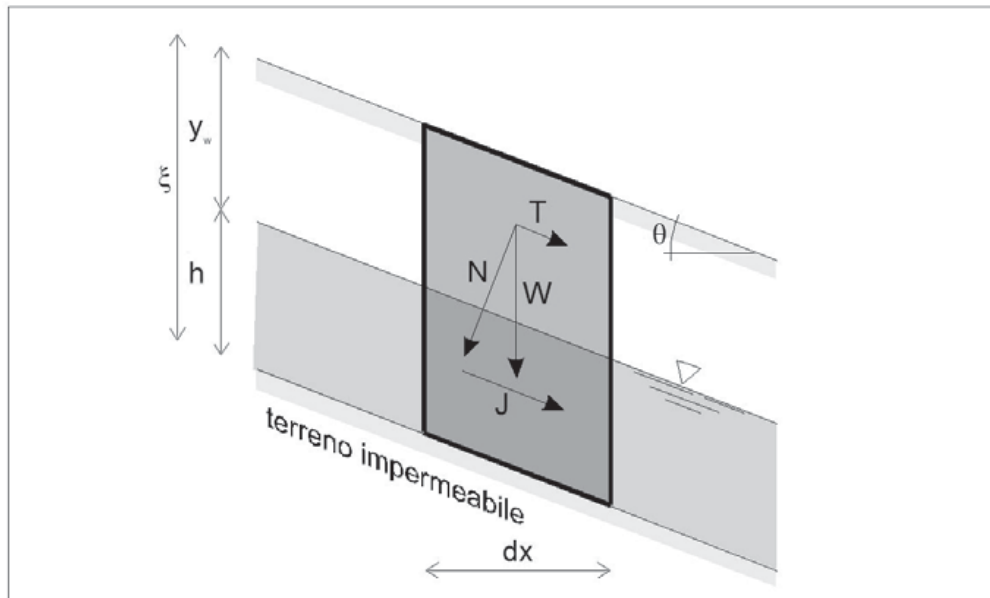


Fig. 1. Schema delle forze agenti in una striscia di terreno nell'ipotesi di filtrazione parallela al pendio.

θ = angolo di inclinazione del pendio rispetto all'orizzonte
ξ = profondità superficie di scorrimento rispetto al suolo
γ_{sat} = peso di volume del materiale in condizioni di saturazione
$y_w = \xi - h$
h = profondità corrente uniforme
n = porosità
K = conducibilità idraulica laterale satura
c = coesione
ϕ = angolo di attrito interno

Tabella 1. Elenco dei parametri utilizzati.

Tramite osservazioni elementari di equilibrio statico è possibile stabilire la seguente equazione di equilibrio limite

$$\frac{y_w}{\xi} = 1 - \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_a} \left[1 - \frac{1}{\tan \phi} \left(\tan \theta - \frac{c}{\gamma_{sat} \xi \cos^2 \theta} \right) \right] \quad (1)$$

dove si è indicato con γ_a il peso specifico dell'acqua, con y_w la differenza ($\xi \cdot h$) e si è ipotizzato che il terreno sovrastante la zona sede del moto di filtrazione sia in condizioni di saturazione.

L'esame dell'equazione (1) consente di individuare una condizione di equilibrio incondizionatamente instabile (l'ammasso è instabile anche quando è in condizioni asciutte), ovvero

$$\tan \theta \geq \frac{c}{\gamma_{sat} \xi \cos^2 \theta} + \tan \phi \quad (2)$$

Allo stesso modo, è possibile individuare una condizione incondizionatamente stabile (pendici stabili anche quando risultano completamente sature), ovvero

$$\tan \theta < \frac{c}{\gamma_{sat} \xi \cos^2 \theta} + \tan \phi \left(1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_{sat}} \right) \quad (3)$$

Pendici cui corrispondono valori di pendenza compresi fra i valori indicati dalle equazioni (2) e (3) possono attingere alla condizione di instabilità in seguito alla diminuzione del valore di y_w .

1.1.2 Modello idrologico

Il valore del rapporto (y_w/ξ) in corrispondenza di una assegnata località può essere convenientemente determinato simulando il processo di filtrazione che si stabilisce, in condizioni di moto permanente, in funzione di un assegnato flusso di ricarica alla falda in corrispondenza del bacino a monte della località stessa. Quando il valore di conducibilità idraulica satura k possa assumersi costante lungo la verticale, la portata q_0 del moto di filtrazione parallelo al pendio può ottenersi nel modo seguente

$$q_0 = kh \cos \theta \sin \theta \quad (4)$$

Il valore di q_0 per ciascuna cella della maglia regolare utilizzata per discretizzare il versante può essere determinato, ipotizzando condizioni di moto permanente, imponendo il rispetto dell'equazione di continuità scritta nella maniera seguente

$$i_e A = q_0 b \quad (5)$$

dove i_e rappresenta l'afflusso efficace alla falda, A è l'area di bacino drenata dalla cella in esame e b è la larghezza della cella nella direzione del moto di filtrazione. La sostituzione della (4) nell'equazione (5) porta alla seguente espressione

$$kh \cos \theta = \frac{i_e}{\sin \theta} \frac{A}{b} \quad (6)$$

la quale può essere riscritta introducendo la trasmissività $T = k \xi \cos \theta$

$$\frac{h}{\xi} = W = \frac{i_e}{\sin \theta} \frac{A}{bT} \quad (7)$$

1.1.3 Integrazione modello geotecnico ed idrologico

Sulla base dell'equazione (1), il pendio diventa instabile per valori del rapporto W caratterizzati dalla seguente disequaglianza

$$W \geq \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_a} \left[1 - \frac{1}{\tan \phi} \left(\tan \theta - \frac{c}{\gamma_{sat} \xi \cos^2 \theta} \right) \right] \quad (8)$$

ovvero

$$\frac{A}{b} \geq \frac{T}{i_e} \sin \theta \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_a} \left[1 - \frac{1}{\tan \phi} \left(\tan \theta - \frac{c}{\gamma_{sat} \xi \cos^2 \theta} \right) \right] \quad (9)$$

In questa forma, l'instabilità di un pendio viene definita in funzione di tre classi di variabili:

- variabili di tipo topografico (A/b , θ)
- variabili di tipo idrologico (i_e)
- variabili legate alle caratteristiche idrauliche e geotecniche del suolo (T , γ_{sat} , c e ϕ).

L'equazione (9) può essere riformulata in maniera tale da fornire il valore dell'afflusso efficace i_e che, a parità di tutte le altre variabili, innesca condizioni di instabilità per il pendio assegnato:

$$i_{e,crit.} \geq \frac{b}{A} T \sin \theta \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_a} \left[1 - \frac{1}{\tan \phi} \left(\tan \theta - \frac{c}{\gamma_{sat} \xi \cos^2 \theta} \right) \right] \quad (10)$$

Nell'ipotesi che l'afflusso meteorico non subisca perdite nella sua trasformazione in afflusso efficace alla falda, il termine $i_{e,crit}$ viene identificato come *pioggia critica* (Dalla Fontana et al., 1998).

Risulta immediato definire un valore limite di coefficiente di sicurezza, pari ad uno, quando in una determinata area del bacino per la quale si conoscono i valori di pioggia critica, si raggiunge tale valore. In funzione dell'intensità di pioggia si potrà o meno superare il limite definito: per stabilirlo sarà sufficiente confrontare i valori delle precipitazioni effettive con quelle critiche.

Di seguito viene riportato un grafico esplicativo per la definizione di stabilità/instabilità in funzione di pendenza (in ascissa) e rapporto tra altezza della falda e profondità del suolo (pari all'indice di saturazione del terreno, in ordinata), (Fig. 2), ed uno in funzione di pendenza (in ascissa) e area drenata/larghezza della cella in direzione del deflusso (in ordinata), (Fig. 3):

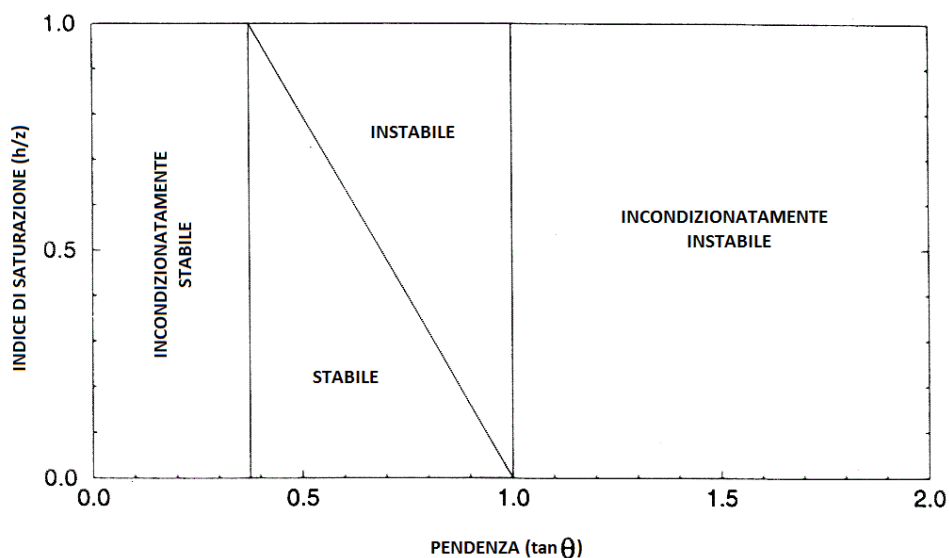


Fig. 2. Definizione di stabilità del pendio in funzione di pendenza e indice di saturazione.

Si può osservare dalla Fig. 2 come oltre il valore di $\tan \theta$ pari a 1 (45°) il pendio assume la condizione di incondizionatamente instabile, mentre con valori inferiori a 0,4 (circa 20°), il pendio assume la condizione di incondizionatamente stabile. Nell'intervallo compreso tra i valori di $\tan \theta$ pari a 0,4 e 1, la stabilità del pendio è quindi data dalla variazione dell'indice di saturazione, determinato dalla piovosità.

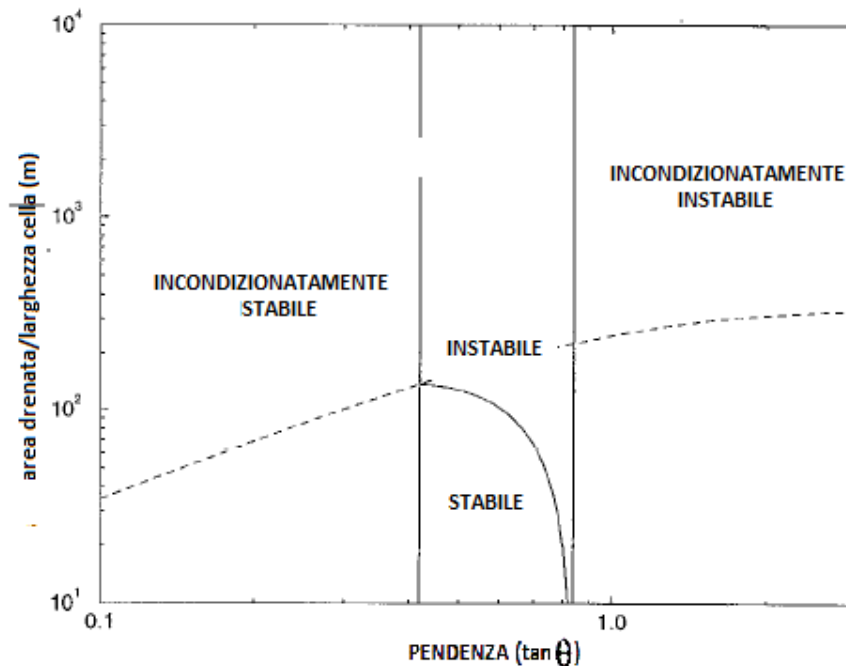


Fig. 3. Definizione di stabilità del pendio in funzione di pendenza ed area drenata/b.

Dalla Fig. 3 si può invece osservare il ruolo assunto dal rapporto tra l'area drenata e la larghezza della cella (A/b , in ordinata) in funzione della pendenza ($\tan \theta$, in ascissa): la linea tratteggiata nel grafico rappresenta il limite di saturazione. Si evidenzia il diverso ruolo che A/b ha per determinare condizioni di stabilità o instabilità, rispetto all'indice di saturazione: vengono infatti registrati valori limite di pendenza, per condizioni incondizionatamente stabili ed instabili, inferiori alla Fig. 2. Tuttavia al crescere del rapporto A/b , una volta superato il valore relativo alla linea tratteggiata di saturazione, questo valore diventa influente: le condizioni di stabilità ed instabilità in suolo saturo dipendono esclusivamente dalla pendenza del pendio.

1.2 Area di studio

L'area di studio è localizzata in Italia, all'interno della Val di Sole, in Trentino-Alto Adige. L'area viene suddivisa in tre bacini idrografici adiacenti, Cortina, Fraviano e Pizzano, siti all'interno del comune di Vermiglio. I bacini prendono nome dal rispettivo Rio che li attraversa, quindi da Rio Cortina, Rio Fraviano e Rio Pizzano: tutti e tre confluiscono nel torrente che attraversa l'abitato di Vermiglio, il torrente Vermigliana, che a sua volta si getta nel torrente Noce.

La superficie totale dell'area in analisi è di 7,76 km², con una variazione di quote tra i 1250 m s.l.m. nel punto più basso, localizzabile alla sezione di chiusura del bacino di Rio Cortina, ed i 2830 m s.l.m. nel punto più alto, all'interno del bacino di Rio Pizzano. La quota media è pari a 1999 m s.l.m..

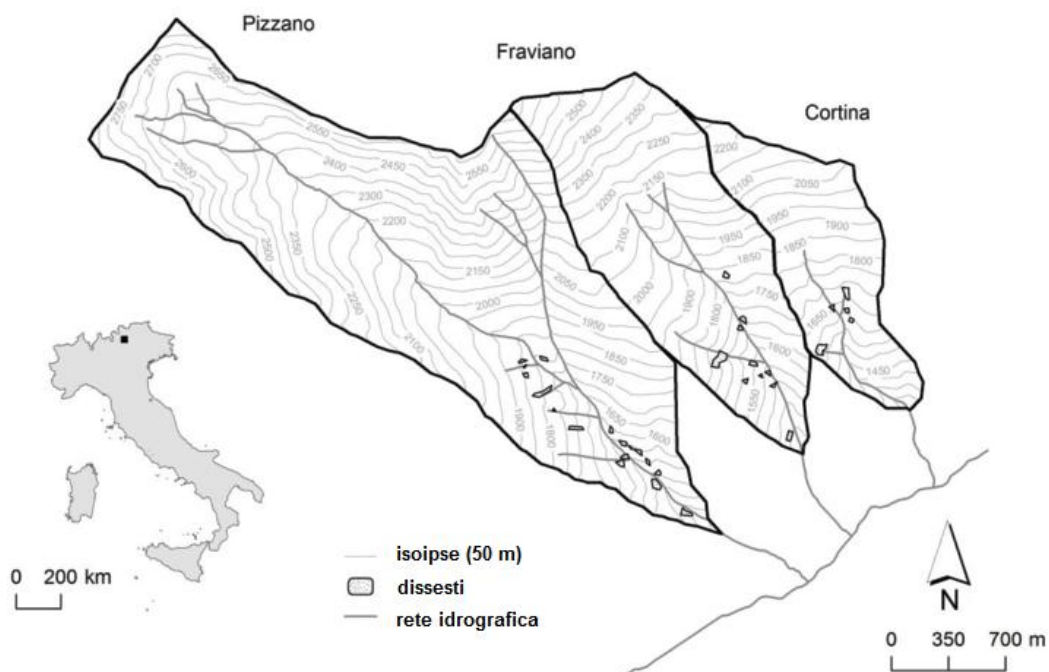


Fig. 4. Inquadramento dei tre bacini idrografici (Lanni et al., 2012).

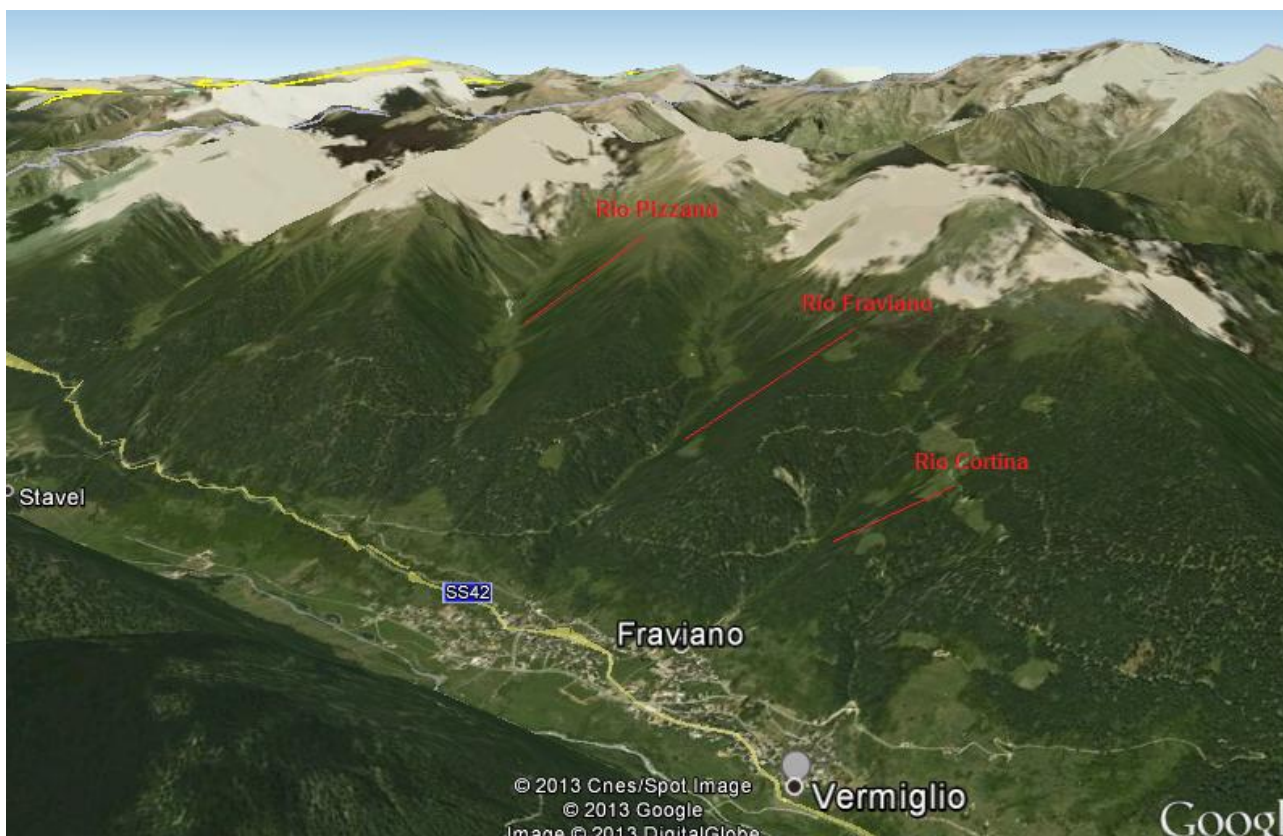


Fig. 5. Immagine 3D dei tre bacini (da Google Earth).

La morfologia dei bacini mostra due differenti strutture, una porzione superiore, più piatta, ed una inferiore, più ripida, dove sono concentrati i franamenti.

La Val di Sole è contraddistinta da un clima tipicamente alpino caratterizzato da estati brevi e fresche ed inverni lunghi e rigidi con ricche precipitazioni nevose. In Tabella 2 vengono riportati i valori medi mensili ed annuale di precipitazione, temperatura, temperatura massima e minima, ricavati dai dati resi disponibili dal sito “Meteotrentino” e relativi al periodo 1961-1990 per la stazione di Peio (Tn), poco distante dall’area di studio.

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	annuo
Precipitazioni	46	46	58	76	102	87	81	93	64	76	82	44	855
T media	-0,8	-0,1	1,9	4,7	8,8	12,4	15,1	15	12,4	8,5	2,9	0,1	6,7
T max media	3,6	4,7	7,3	10,2	14,7	18,6	20,9	20,7	17,4	12,8	7,4	4,3	11,9
T min media	-5,7	-5,1	-2,6	0,4	4,4	7,8	9,9	9,7	6,9	2,9	-1,6	-4,6	1,9

Tabella 2. Valori medi di precipitazione e temperature per la stazione di Peio (Tn).

L'area comprendente i tre bacini segna il confine meridionale del gruppo montuoso dell'Ortles-Cevedale. Geologicamente il Gruppo Ortles–Cevedale è delimitato a sud dalla "Linea Insubrica" (o linea del Tonale), un'importante zona di frattura della crosta terrestre che separa in modo netto due unità geologicamente molto diverse: le Alpi Settentrionali e quelle Meridionali.

Il Gruppo Ortles–Cevedale appartiene alle Alpi Settentrionali, caratterizzate dalla presenza di rocce metamorfiche, come ad esempio filladi, quarziti e micascisti. Nello specifico, come osservabile dalla Fig. 6 rappresentante l'inquadramento geologico della Val di Sole (ottenuto dal foglio n°42 della "Carta Geologica d'Italia"), l'area di studio di questa tesi rientra nel contesto Austroalpino, con basamento metamorfico di alto grado.

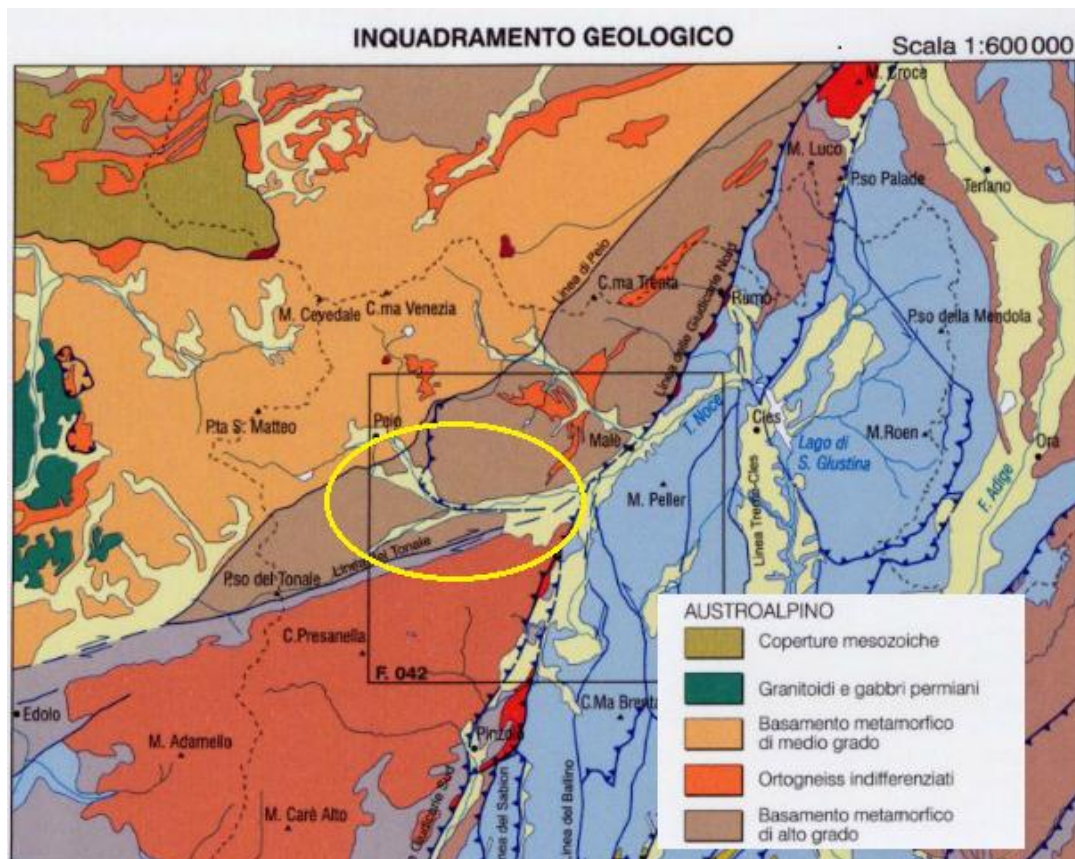


Fig. 6. Inquadramento geologico, foglio n°42 Malè.

1.2.1 Il bacino di Rio Cortina

Il bacino idrografico di Rio Cortina sviluppa una superficie di 1,03 km², si trova alle quote più basse tra i tre bacini, con un'elevazione compresa fra 1250 e 2310 m s.l.m. (Fig. 8), la pendenza media è di 27,5° (Fig. 7).

La vegetazione, come in tutta l'area di studio, viene controllata dall'altitudine: il bacino di Rio Cortina, posizionandosi a quote inferiori, risulta quello con maggiore copertura arborea, in prevalenza di conifere, pari al 92%; i prati sono invece circa il 7%, la restante parte, inferiore all'1% è data da aree urbanizzate (Fig. 8).

L'esposizione è prevalentemente verso Sud (Fig. 7).

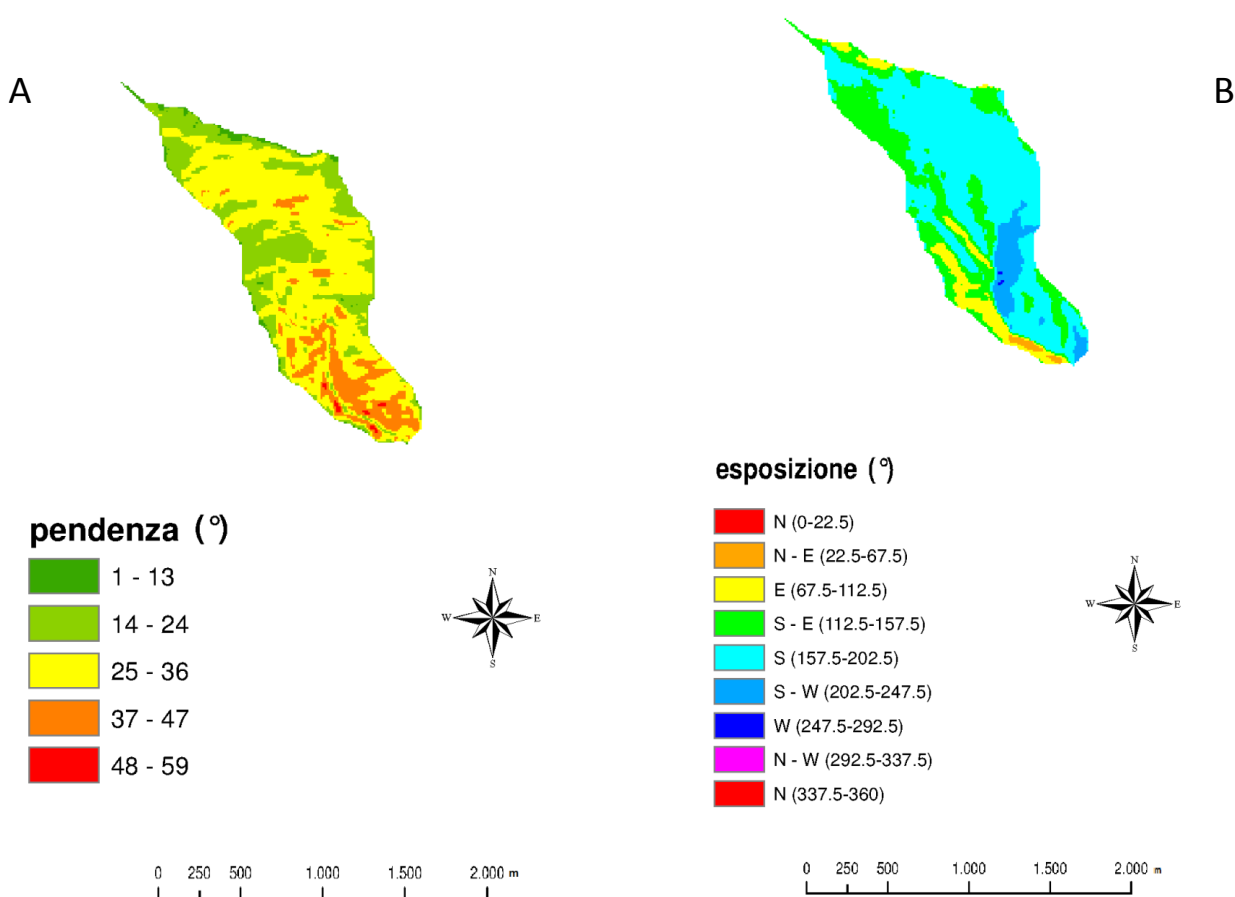


Fig. 7. Pendenza (A) ed esposizione (B) del bacino di Rio Cortina.

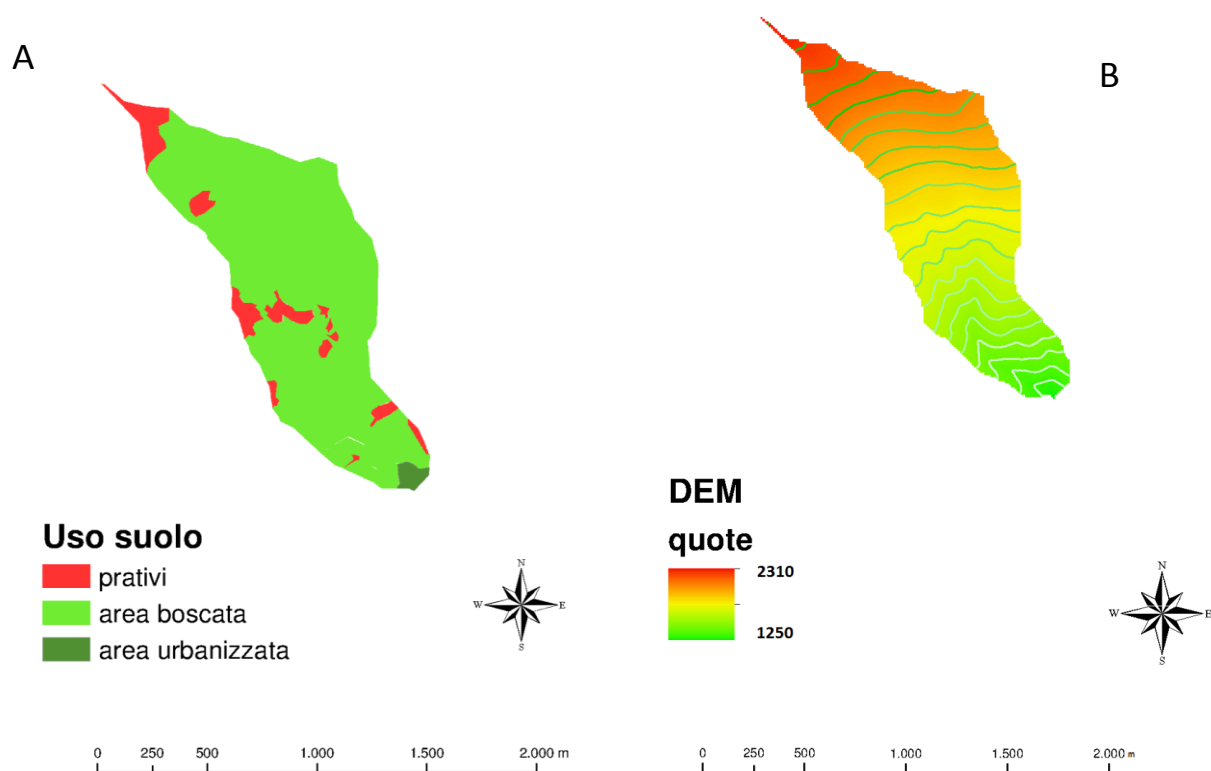


Fig. 8. Uso del suolo (A) e raster con le quote (B) del bacino di Rio Cortina.

1.2.2 Il bacino di Rio Fraviano

Il bacino di Rio Fraviano presenta superficie totale di 2 km², pendenza media di 28° (Fig. 9), e quota variabile tra i 1298 ed i 2681 m s.l.m., considerevolmente più elevata rispetto a Cortina (Fig. 10).

Il bacino di Rio Fraviano presenta una copertura arborea inferiore, di circa 64%, di prativi per il 35%, mentre le aree urbanizzate sono inferiori all'1% (Fig. 10).

L'esposizione risulta tendenzialmente verso S-SE (Fig. 9).

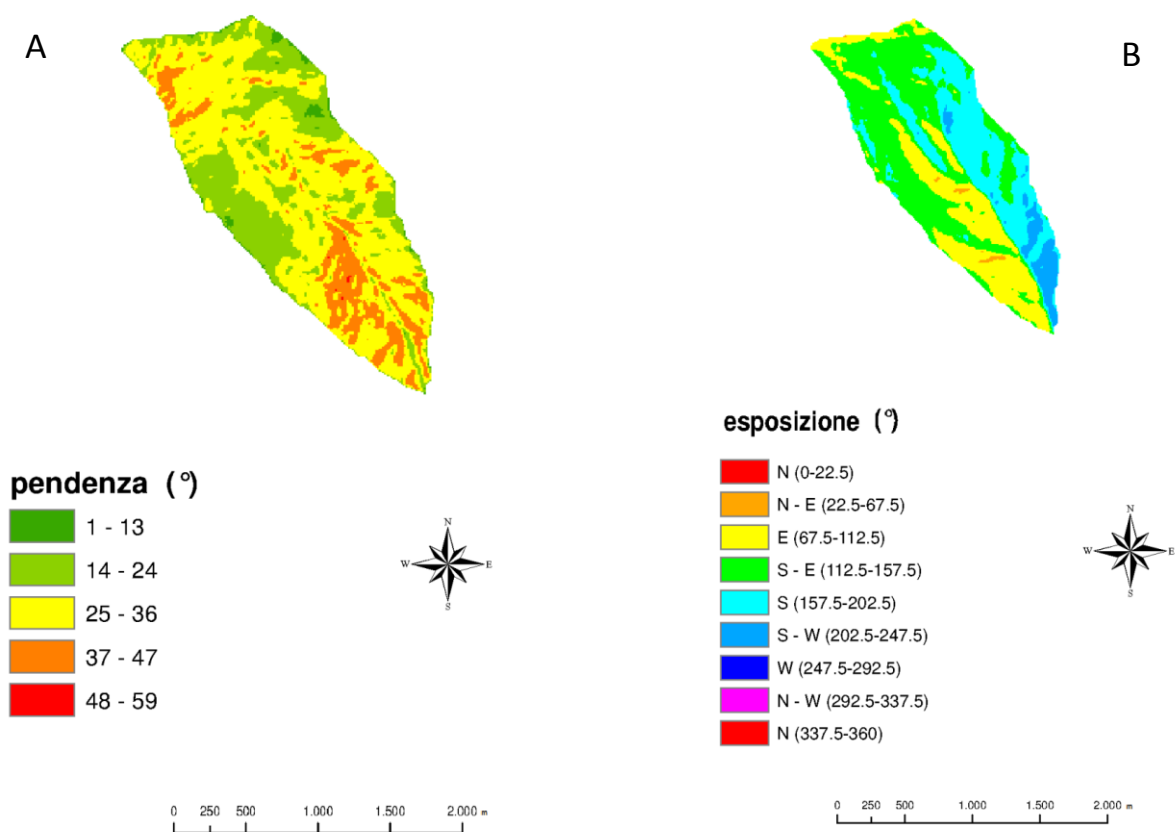


Fig. 9. Pendenza (A) ed esposizione (B) del bacino di Rio Fraviano.

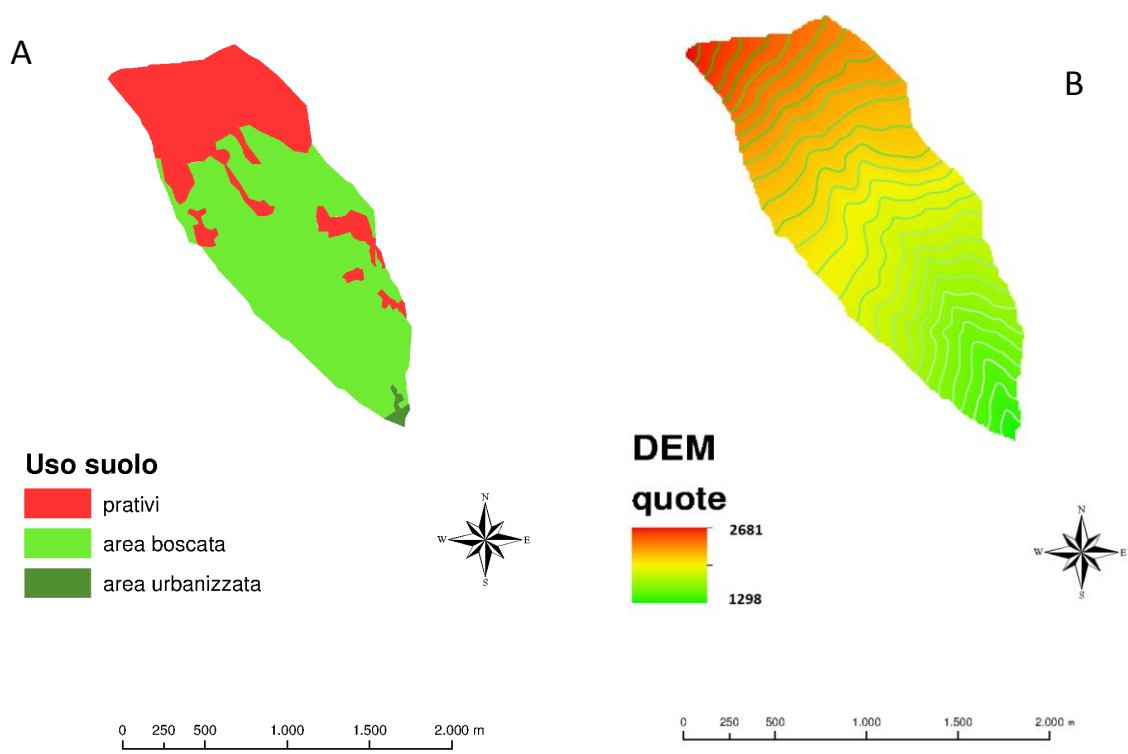


Fig. 10. Uso del suolo (A) e raster con le quote (B) del bacino di Rio Fraviano.

1.2.3 Il bacino di Rio Pizzano

Il bacino di Rio Pizzano risulta essere il più esteso con una superficie complessiva di 4,43 km².

La pendenza media è la maggiore, con un valore di 30,4° (Fig. 11); anche le quote sono mediamente più elevate e vanno dai 1276 ai 2830 m s.l.m (Fig. 12).

La copertura vegetazionale, diversamente dai bacini di Rio Cortina e Fraviano, è per il 61% data da prati e per il 39% da aree boscate: ciò è dovuto essenzialmente alla quota media più elevata a cui si trova il bacino (Fig. 12).

L'esposizione è in prevalenza S-SE (Fig. 11).

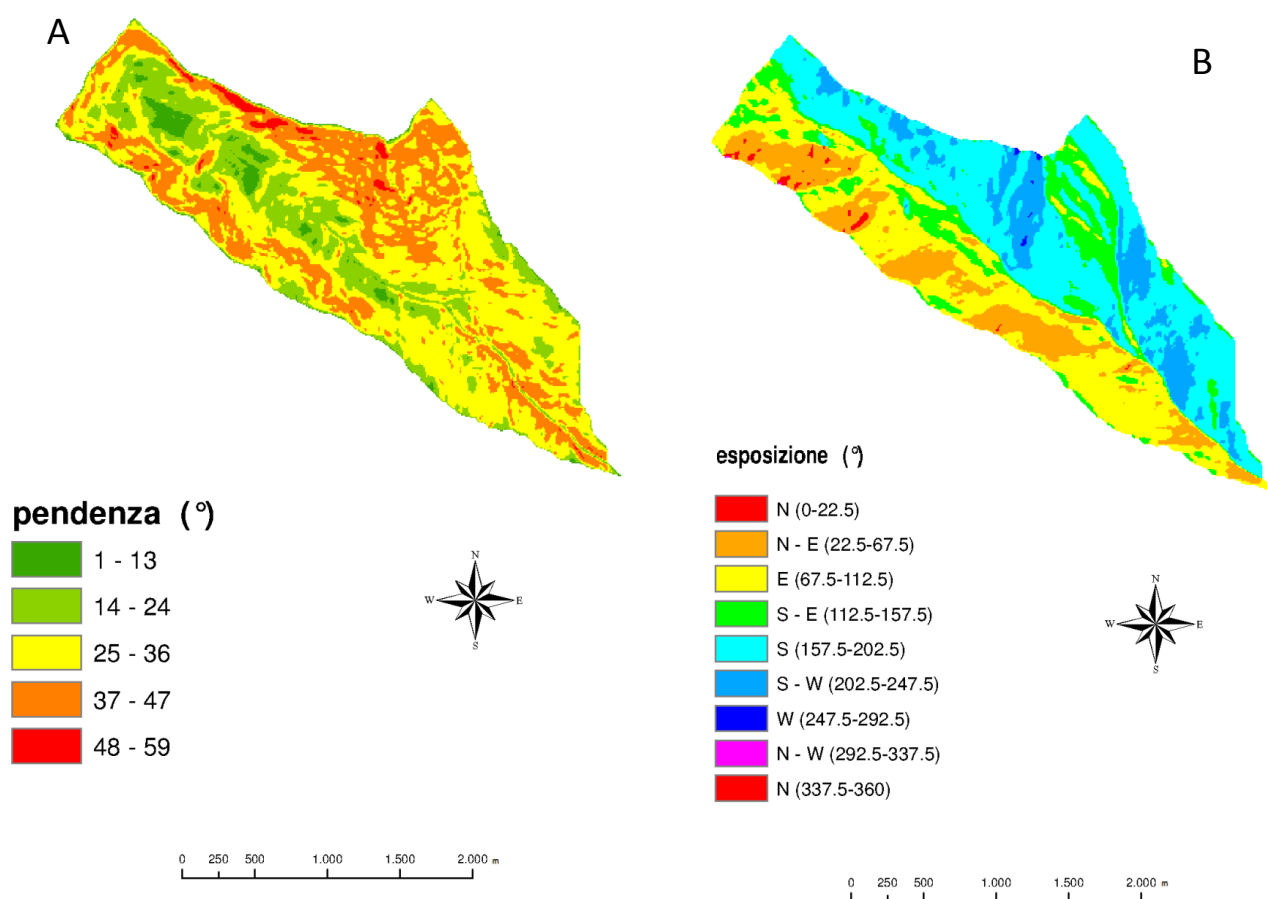


Fig. 11. Pendenza (A) ed esposizione (B) del bacino di Rio Pizzano.

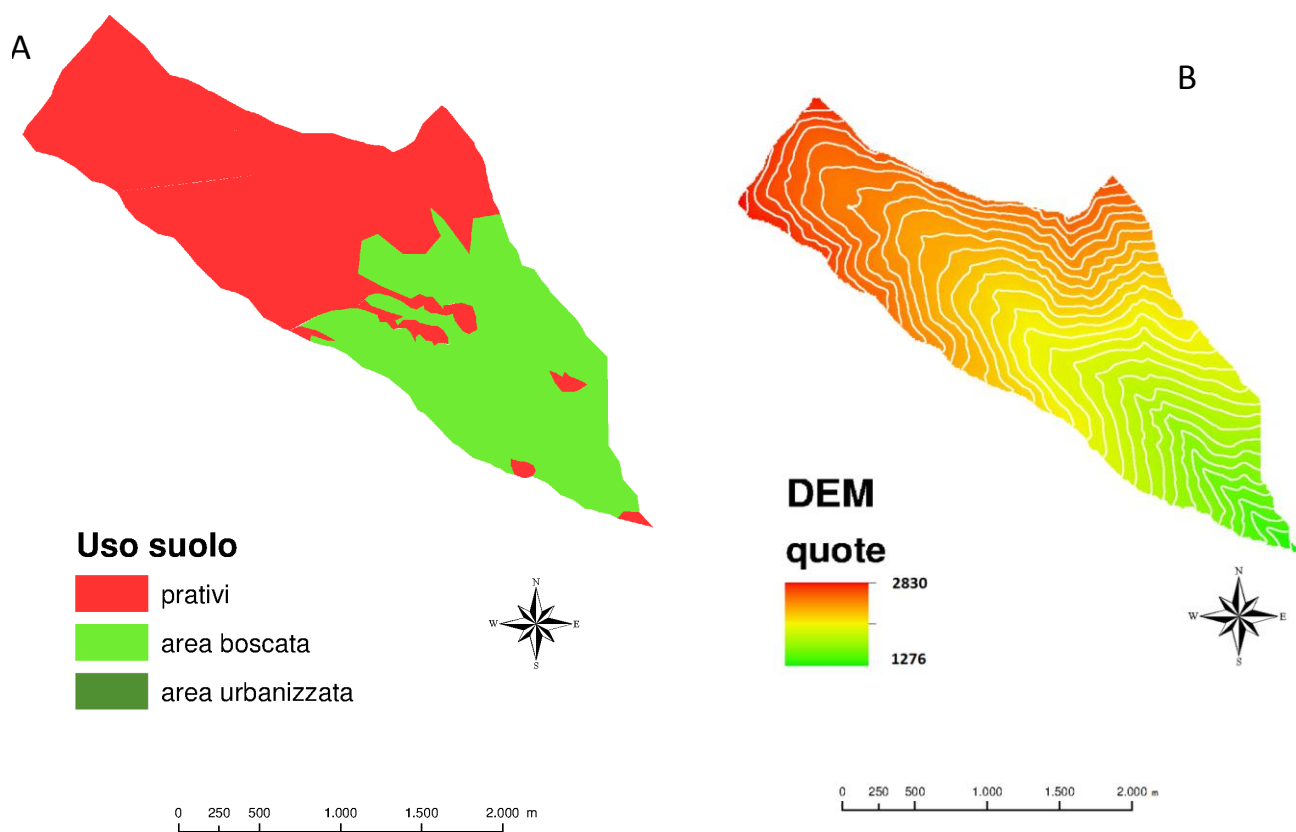


Fig. 12. Uso del suolo (A) e raster con le quote (B) del bacino di Rio Pizzano.

2 Materiali e metodi

Il modello SHALSTAB prevede per il suo utilizzo una serie di applicativi dai quali ricavare i file necessari per determinare la suscettibilità dei suoli al franamento superficiale.

Oltre agli eseguibili specifici, dei quali si parlerà in seguito, si è fatto ampio uso del software ArcGIS, indispensabile per ricavare i numerosi file di input partendo dal raster delle elevazioni (DEM).

Il DEM, ricavato da una mappa in scala 1:10000, presenta un grid di celle (pixel) di dimensione 10 m x 10 m, ad ognuna delle quali è attribuita una specifica quota. Partendo da questo si è partiti, attraverso il tool “*fill*” (in alternativa si sarebbe potuto usare l'eseguibile “*Pit remover*”), eliminando le depressioni (*pit*); si è proceduto quindi a definire la “*flow direction*” (il flusso dell'acqua lungo le linee di impluvio) e la “*flow accumulation*”, ovvero l'area contribuente del bacino. Sono stati realizzati dei raster di profondità standard (0,6 - 0,8 - 1 m), di rocciosità (0 m) e quindi, confrontando con ortofoto, aggiornate all'anno 2006 e ricavate dal Geoportale Nazionale del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, sono state mappate le aree ad uso prativo, boschivo ed urbano alle quali sono stati assegnati determinati valori di coesione.

2.1 Descrizione degli eseguibili

Il principale eseguibile utilizzato è stato quello dello “*steady state slope stability model*” (SSM), indispensabile per il calcolo della pioggia critica (Fig. 13).

The screenshot shows the SSM (steady state slope stability model) application window. It is divided into three main sections: INPUT SECTION, OUTPUT SECTION, and NUMERICAL PARAMETERS. The INPUT SECTION contains six file input fields: Format Header File, DTM (nopits) Grid File, Upslope Area Grid File, Cohesion Grid File, Soil Depth Grid File, and Rocks Grid File. The OUTPUT SECTION contains one file input field: Critical Rainfall Grid File. The NUMERICAL PARAMETERS section contains four input fields: Rocks code (value 3), rapporto ro (value 2.0), K (value 2.71), and Tan fi (value 0.7). On the right side of the window, there are five buttons: Info, Load, Execute, Save, and Cancel.

Fig. 13. Maschera dell'applicativo SSM.

Nell'applicativo SSM vengono inseriti i file di input di descrizione del bacino (*Format Header File*), il DEM dipittato (*DTM Grid File*), l'area drenata (*Upslope Area Grid File*), i file delle coesioni (*Cohesion Grid File*), della profondità del suolo (*Soil Depth Grid File*) e della rocciosità (*Rocks Grid File*). Sono assegnati i diversi parametri stabiliti:

- codice delle rocce (3)
- rapporto ro: γ_{sat}/γ_w (1,8)
- conducibilità idrica del suolo (86,4 m/giorno)
- tangente dell'angolo di attrito interno del suolo (variabile: 0.78/ 0.67/ 1)

Il risultato in output è quindi un file “.flt” riportante i valori di pioggia critica, caricabile sul software ArcGIS e visualizzabile graficamente.

Il “*Format Header file*” ed il “*DTM Grid File*” sono ricavati trasformando, con il tool di ArcGIS “*raster to float*”, il raster delle elevazioni (DEM) in file float (.flt e .hdr).

La coesione del suolo risulta essere molto variabile, oltre che per le diverse caratteristiche chimico-fisiche del terreno, anche per la presenza di vegetazione. Gli apparati radicali agiscono a livello meccanico, dando struttura al terreno e impedendo la mobilitazione delle frazioni anche più grosse dello scheletro del suolo, oltre che a livello idrico, assorbendo una gran quantità d'acqua che altrimenti andrebbe direttamente a creare deflusso. Alle aree mappate a prativo sono stati assegnati valori pari a 500 e 800 N/m², alle aree boschive valori pari a 800, 1500, 2500, 5000 N/m², alle aree ad utilizzo urbano 10000 N/m². Di fondamentale importanza eseguire le prove con diversi valori di coesione, per determinare quali siano i più adatti in funzione di un migliore funzionamento del modello.

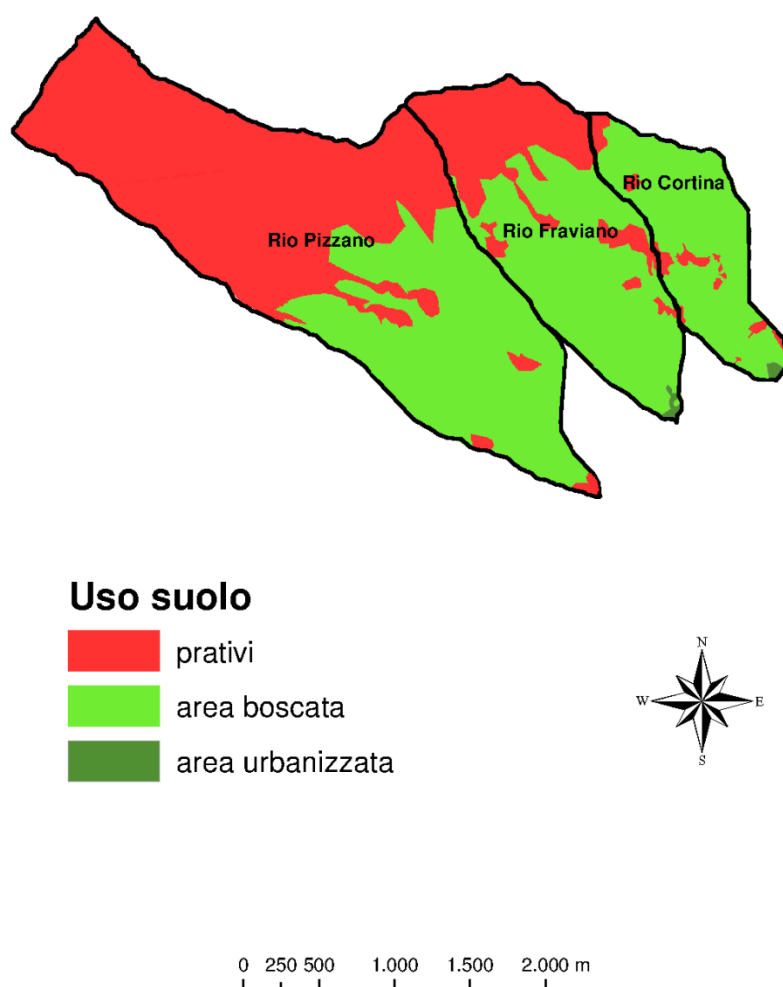


Fig. 14. Uso del suolo dei tre bacini.

La sensibilità del modello SHALSTAB è stata verificata utilizzando diversi algoritmi per il calcolo dell'area drenata. L'area drenata, che rappresenta l'area contribuyente al drenaggio di ogni cella a monte di essa, può essere calcolata attraverso quattro diversi algoritmi: in questa tesi ne sono stati utilizzati tre, gli algoritmi definiti D8, Multiflow e D-inf (Fig. 15).

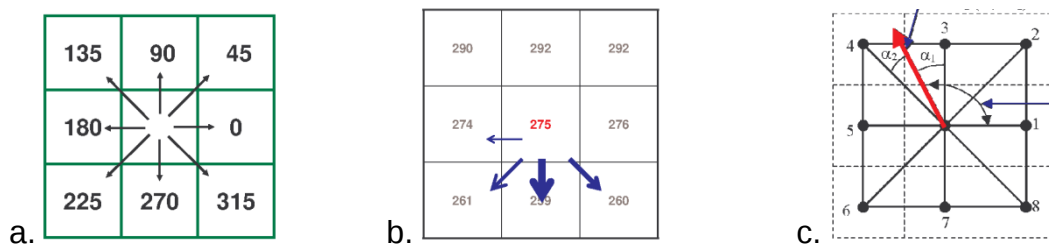


Fig. 15. Algoritmi a. D8, b. Multiflow, c. D-Inf.

Nell'algoritmo D8, il più tradizionale, viene calcolato il gradiente di quota (pendenza) verso le otto celle circostanti sulla base della differenza di quota e della distanza tra i centri delle celle. Si suppone quindi che il deflusso scelga la direzione della massima pendenza. Nell'algoritmo Multiflow viene assegnato un peso in funzione del diverso gradiente di quota ed alle direzioni di deflusso verranno attribuiti dei valori percentuali, ad indicarne la via preferenziale al crescere degli stessi. Infine anche nell'algoritmo D-Inf, come nel D8, viene determinata una sola direzione preferenziale di drenaggio, ma questa è da individuarsi nel triangolo con maggior pendenza, tra gli 8 triangoli circostanti il valore centrale.

Come accennato in precedenza, gli altri file di input necessari per il corretto uso dell'applicativo SSM sono stati ricavati da ArcGIS: per il file di input di profondità di suolo, oltre al valore standard di 1 m, sono stati realizzati altri due file con profondità 0.6 m e 0.8 m, così da verificare la variabilità della pioggia critica modificando solo questo parametro; nei parametri numerici (*numerical parameters*) si è utilizzato sia l'angolo di attrito interno realmente verificato in campo (Lanni et al., 2012), pari a 38° ($\tan \phi = 0.78$), sia valori di 34° e 45° (rispettivamente $\tan \phi$ uguale a 0.67 e 1), anche in questo caso per avere diversi riscontri di pioggia critica modificando questo parametro.

Ricavati i numerosi file di output dati dalle diverse combinazioni possibili, come si può vedere nella tabella in Appendice, gli stessi sono stati visualizzati in ArcGIS, per un primo, immediato, raffronto grafico. Nell'esempio di File CR riportante tutti i tre bacini (Fig. 16)

viene riportata la mappa con la CR (*critical rainfall*, pioggia critica) dei tre bacini, realizzata con profondità del suolo 1 m, algoritmo D8 per l'area drenata, coesione pari a 500 N/m² per i prati, 2500 N/m² per le aree boscate e 10000 N/m² per le aree urbane, angolo di attrito pari a 38° ($\tan \phi = 0.78$).

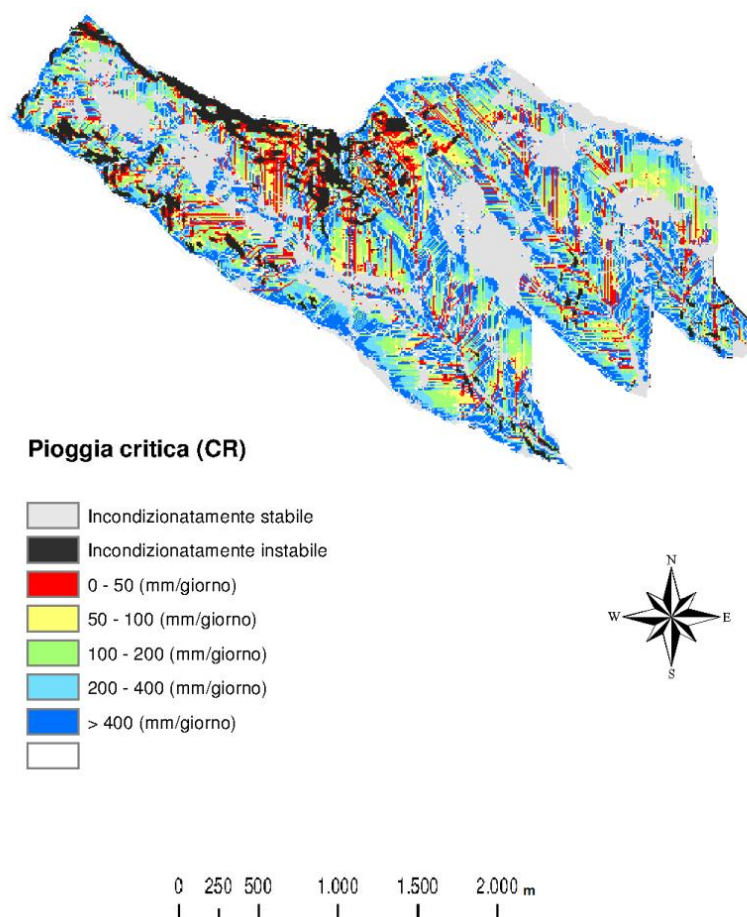


Fig. 16. File CR riportante tutti i tre bacini, Rio Cortina, Rio Fraviano, Rio Pizzano.

Sovrapponendo il file delle frane mappate è possibile valutare se i risultati ottenuti sono accettabili o meno: se in corrispondenza del franamento la pioggia critica risulta elevata o addirittura si ha una zona incondizionatamente stabile, il modello risulterà poco preciso; viceversa in presenza di bassi valori di pioggia critica il modello potrà essere considerato valido. In Fig. 17 vengono sovrapposti i franamenti alla mappa CR ottenuta in precedenza (Fig. 16).

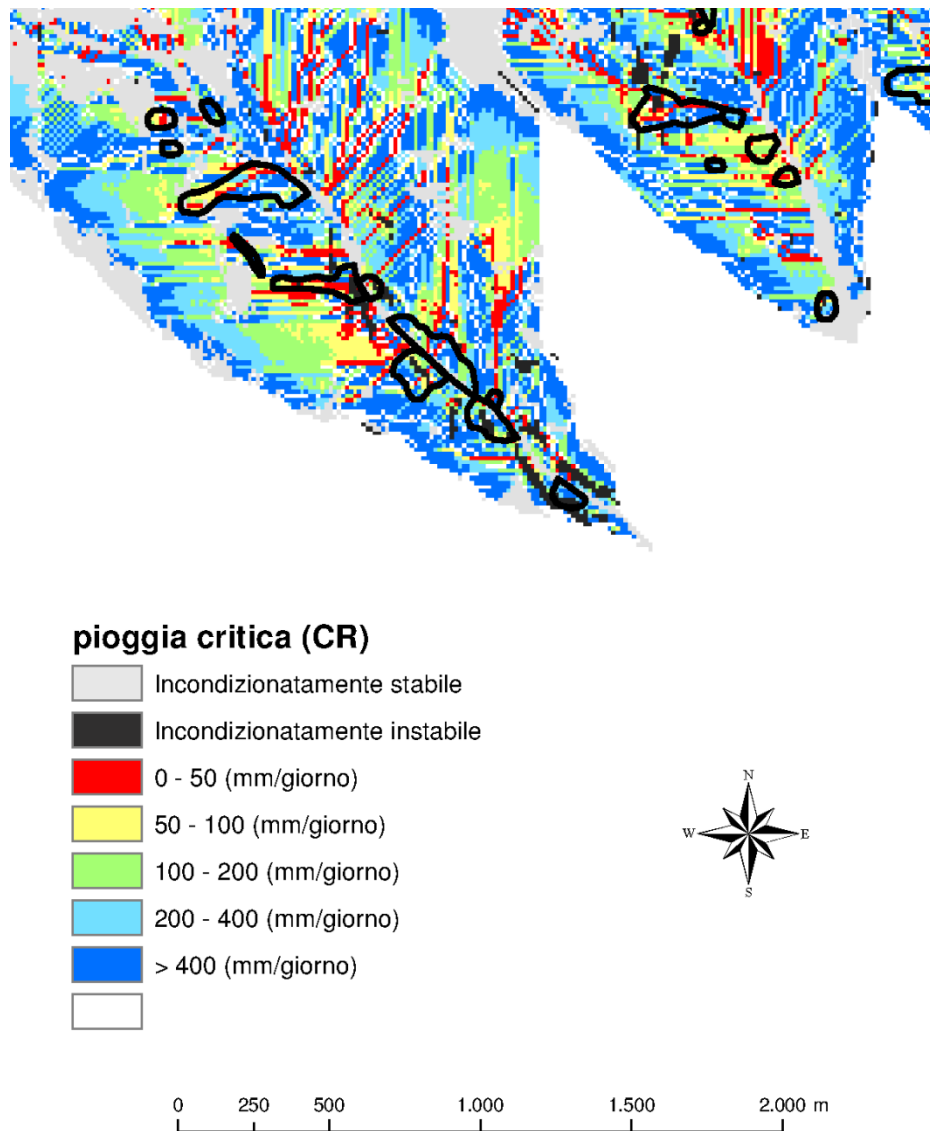


Fig. 17. Zoom sui frammenti mappati (poligoni con bordi neri) e pioggia critica nei tre bacini.

Per ottenere dei dati utili all'analisi statistica, attraverso la maschera "*Command kernel*", si ricavano dei valori numerici partendo dagli stessi file di output della pioggia critica. Attraverso l'utilizzo di due algoritmi (maschere mobili o *kernel*) che considerano rispettivamente le 9 (3x3) e le 25 (5x5) celle circostanti ad ogni cella considerata, è possibile confrontare il raster della pioggia critica con quello delle aree del bacino oggetto di dissesto. Il file di output ottenuto con questo eseguibile fornisce così la percentuale di bacino coinvolta in frane e la percentuale di frane che ricadono in ognuna delle classi definite dal modello. Realisticamente le frane non hanno mai confini netti che ricadono all'interno di una sola cella di 10 metri di lato, e dunque è più corretta una distribuzione che consideri anche le celle circostanti. In Fig. 18 viene riportato un esempio di tabella con

i valori relativi al bacino (numero di celle), *SedSource* (numero di celle coinvolte nei franamenti) e *Kernel 3x3* e *5x5* (le 9 e 25 celle circostanti alla cella considerata); molto importanti sono le prime due classi, instabile e con pioggia critica minima (0-50 mm): per valutare positivamente l'applicabilità del modello, al numero di celle prese in considerazione non dovrà corrispondere uno proporzionale di coinvolte nei dissesti, ma piuttosto un numero ben più elevato. Si può notare come nella classe 0-50 mm, comprendente il 6.74% del bacino, corrisponda il 21.39% di superficie mappata di franamenti, che diventa il 47.57% e 51.94% se consideriamo i *kernel 3x3* e *5x5*.

Infine è stato utilizzato un ultimo programma eseguibile, "*Kernelplot*", per la miglior comprensione dei risultati del *kernel*. Inserendo semplicemente il file .txt del *kernel* viene estratto un .pdf contenente un grafico con due curve, relative alle finestre mobili 3x3 e 5x5: ad ognuna è associato un valore assoluto, per consentire un riscontro sia visivo che numerico (Fig. 19), le curve sono in funzione di frequenza cumulata di pioggia (in ascissa) ed in frequenza cumulata di franamenti (in ordinata),. Più la curva si avvicina al valore 1 in ordinata, più il set di parametri usati nel modello rappresenta meglio la suscettibilità al franamento del bacino, viceversa la simulazione è meno realistica se la curva risulta schiacciata verso la bisettrice del quadrato o addirittura la oltrepassa verso il basso.

Classe	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	: 260	1	9	34
0 - 50 mm	: 660	40	98	107
50 - 100 mm	: 701	17	42	41
100 - 200 mm	: 1352	32	33	22
200 - 400 mm	: 1161	36	17	2
> 400 mm	: 2183	58	7	0
Stabile	: 3472	3	0	0
Totale	9789	187	206	206
Classe - percentuale	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	: 2.66	0.53	4.37	16.50
0 - 50 mm	: 6.74	21.39	47.57	51.94
50 - 100 mm	: 7.16	9.09	20.39	19.90
100 - 200 mm	: 13.81	17.11	16.02	10.68
200 - 400 mm	: 11.86	19.25	8.25	0.97
> 400 mm	: 22.30	31.02	3.40	0.00
Stabile	: 35.47	1.60	0.00	0.00

Fig. 18. Valori di pioggia critica. Nella parte superiore della tabella il bacino viene classificato per numero di celle per relativa classe di instabilità, nella parte inferiore per percentuale per relativa classe di instabilità.

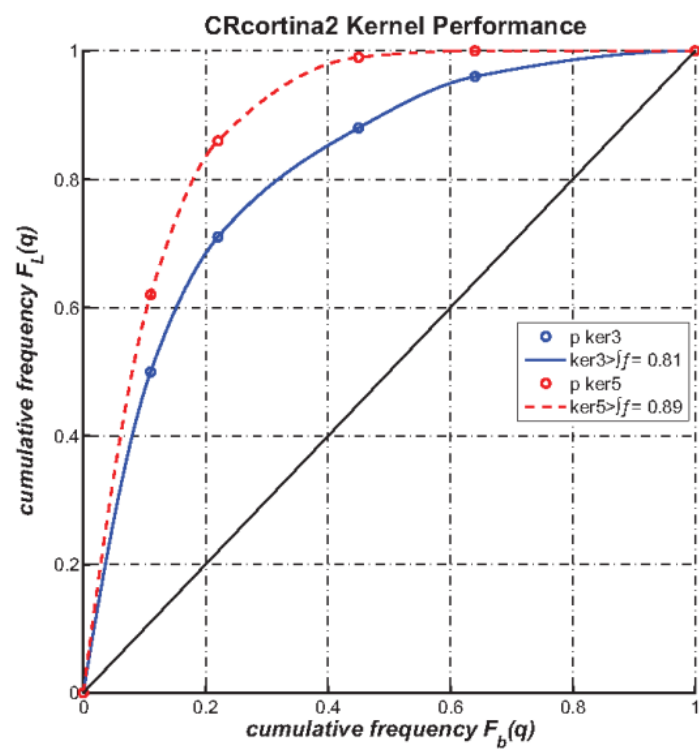


Fig. 19. Grafico rappresentante le frequenze cumulate di pioggia critica e dei franamenti.

3 Risultati e discussione

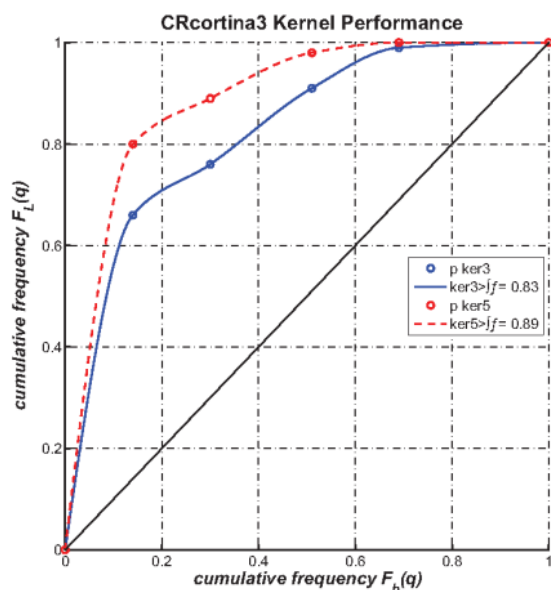
L'analisi di sensibilità effettuata sul modello SHALSTAB ha riguardato la calibrazione del fattore di coesione radicale; è stato testato il valore di default per l'angolo di attrito interno (38°) con i valori di 34° e 45° , e per la profondità di suolo (1 m) con i valori di 0.6 m e 0.8 m.

Di seguito vengono riportati i sei migliori ed i quattro peggiori risultati per ogni bacino ottenuti con angolo di attrito interno 38° e profondità del suolo 1 m.

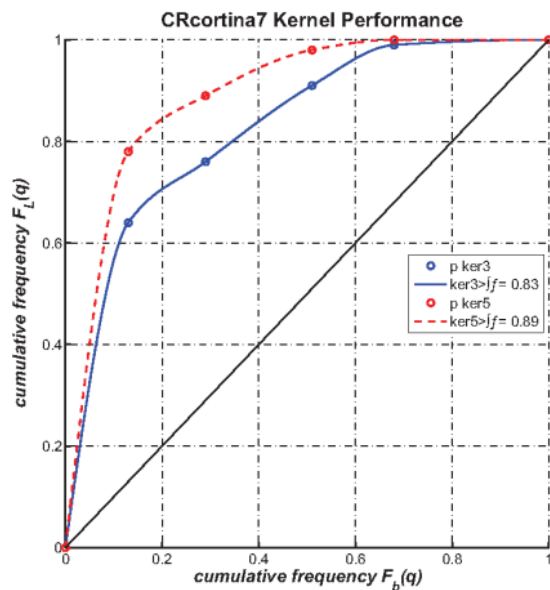
3.1 Il bacino di Rio Cortina

Sulla superficie del bacino di Rio Cortina sono state catalogati cinque differenti franamenti, per un'area coinvolta di 20500 m^2 circa, pari al 2% del totale. Il dissesto di superficie maggiore ha coinvolto un'area di 11750 m^2 , il minore di circa 900 m^2 .

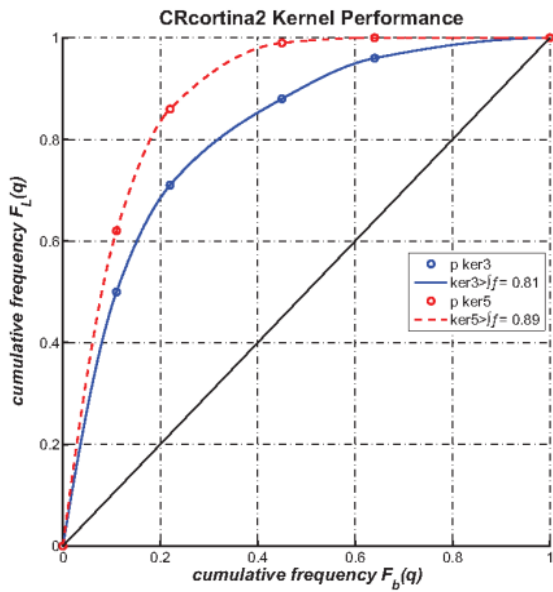
I risultati più significativi:



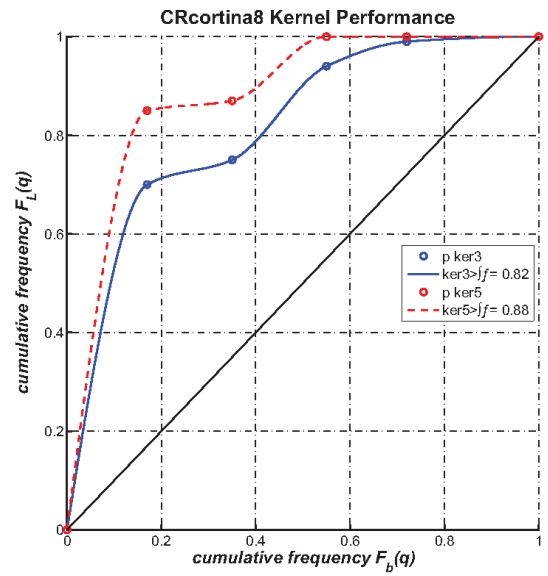
D8, 500-1500 Pa



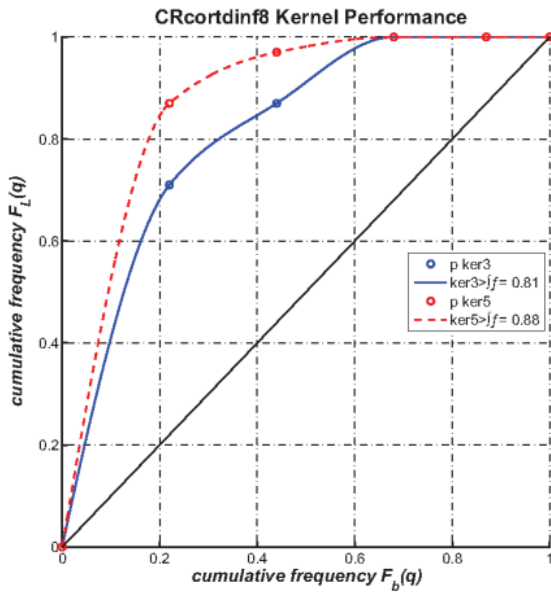
D8, 800-1500 Pa



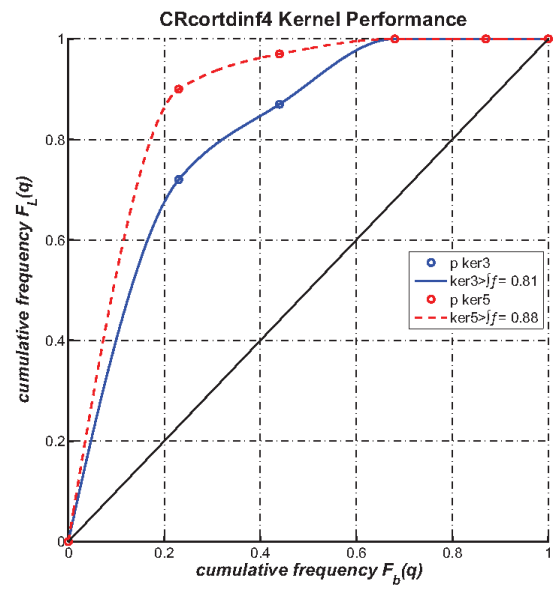
D8, 500-2500 Pa



D8, 800-800 Pa



Dinf, 800-800 Pa



Dinf, 500-800 Pa

Fig. 20. Risultati più significativi per il bacino di Rio Cortina, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx).

In Tabella 2 vengono riportati i valori ricavati dal Kernel, relativi al modello più significativo per il bacino di Rio Cortina, ottenuto con algoritmo di area drenata D8 e coesione pari a 500 Pa per i prati, 1500 Pa per le aree boscate.

Classe	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	456	6	37
0 - 50 mm	:	799	47	111
50 - 100 mm	:	941	23	18
100 - 200 mm	:	1282	31	25
200 - 400 mm	:	1006	34	13
> 400 mm	:	1852	43	2
Stabile	:	3472	3	0
Totale		9808	187	206

Classe - percentuale	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	4.65	3.21	17.96
0 - 50 mm	:	8.15	25.13	53.88
50 - 100 mm	:	9.59	12.30	8.74
100 - 200 mm	:	13.07	16.58	12.14
200 - 400 mm	:	10.26	18.18	6.31
> 400 mm	:	18.88	22.99	0.97
Stabile	:	35.40	1.60	0.00

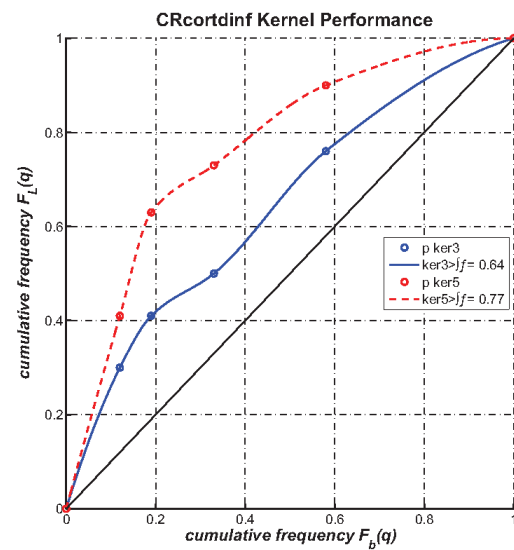
Tabella 3. Valori relativi al modello più performante (D8, 500-1500 Pa); nella parte superiore il bacino viene classificato per numero di celle per relativa classe di instabilità, nella parte inferiore per percentuale per relativa classe di instabilità.

Come si può osservare tra i grafici migliori ottenuti con l'applicativo "Kernelplot", i risultati raggiungono valori di notevole significatività, superiori all'81% considerando i Kernel 3X3 e all'88% considerando i Kernel 5X5.

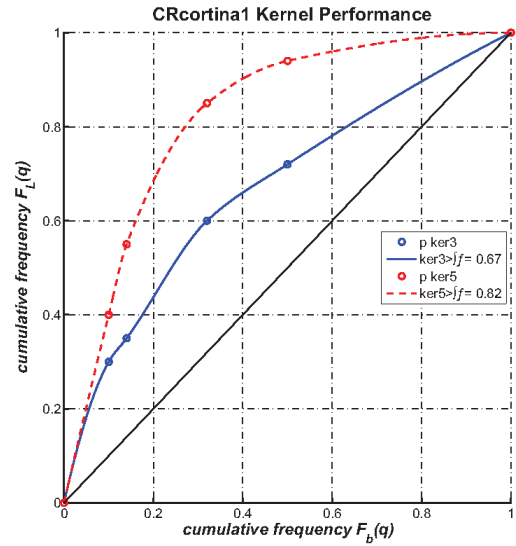
I valori di coesione dei prati sono equamente distribuiti tra 500 ed 800 N/m², mentre per le aree boscate il valore più preciso è pari a 1500 N/m².

L'algoritmo che si adatta meglio all'applicazione del modello è il D8.

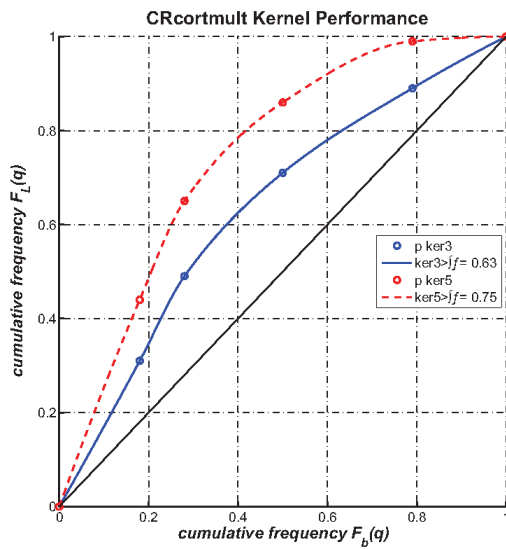
I risultati meno significativi:



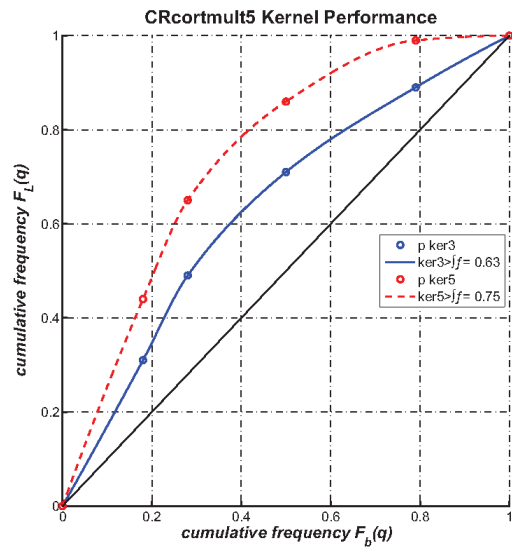
Dinf 500-5000



D8 500-5000



Mult. 500-5000



Mult. 800-5000

Fig. 21. Risultati meno significativi per il bacino di Rio Cortina, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx).

Classe	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	134	1	5
0 - 50 mm	:	303	23	60
50 - 100 mm	:	152	9	22
100 - 200 mm	:	340	17	19
200 - 400 mm	:	616	39	51
> 400 mm	:	1033	35	49
Stabile	:	7785	82	0
Totale		10363	206	206

Classe - percentuale	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	1.29	0.49	2.43
0 - 50 mm	:	2.92	11.17	29.13
50 - 100 mm	:	1.47	4.37	10.68
100 - 200 mm	:	3.28	8.25	9.22
200 - 400 mm	:	5.94	18.93	24.76
> 400 mm	:	9.97	16.99	23.79
Stabile	:	75.12	39.81	0.00

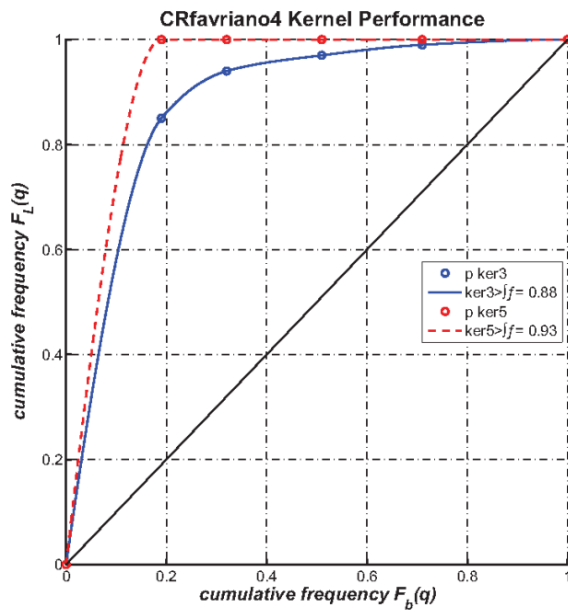
Tabella 4. Valori relativi al modello meno performante (Dinf, 500-5000 Pa); nella parte superiore il bacino viene classificato per numero di celle per relativa classe di instabilità, nella parte inferiore per percentuale per relativa classe di instabilità.

Si può osservare come il valore meno adatto nell'applicazione del modello SHALSTAB è di 5000 N/m² per la coesione delle aree boscate. L'algoritmo meno adatto è il "Multiflow".

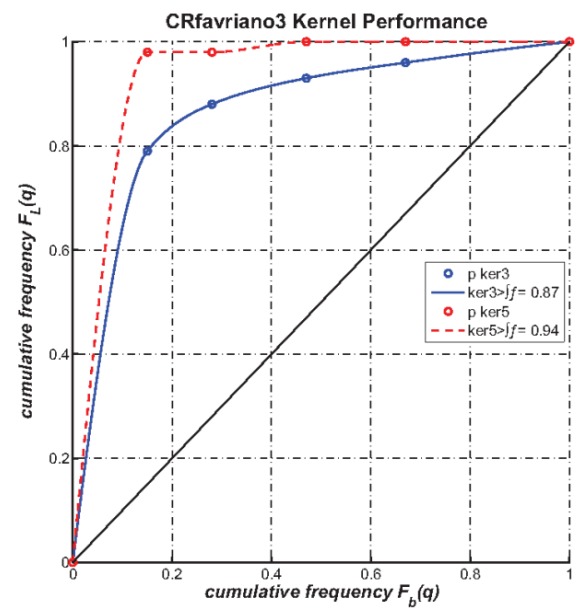
3.2 Il bacino di Rio Fraviano

Nel bacino di Rio Fraviano sono stati rilevati nove dissesti, con una superficie complessiva di 27000 m²: circa l'1,3% del totale. Il franamento maggiore ha coinvolto circa 1,3 ha, mentre il più piccolo 850 m².

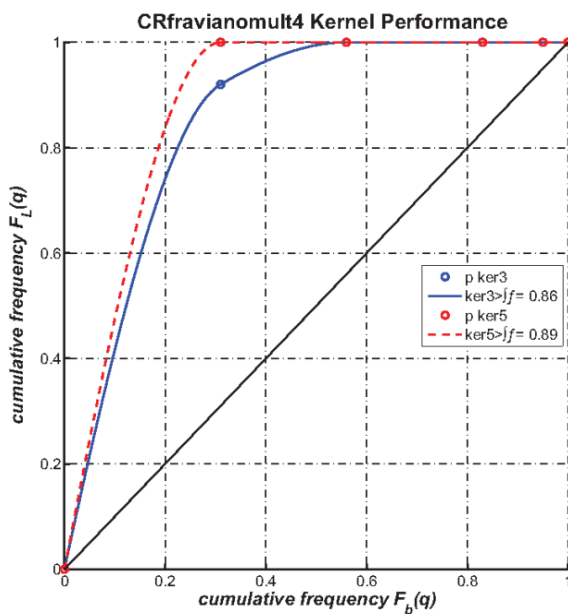
I risultati più significativi:



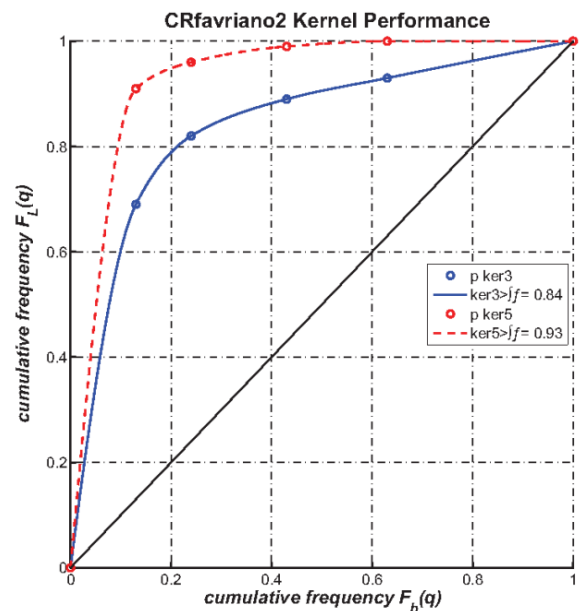
D8, 500-800 Pa



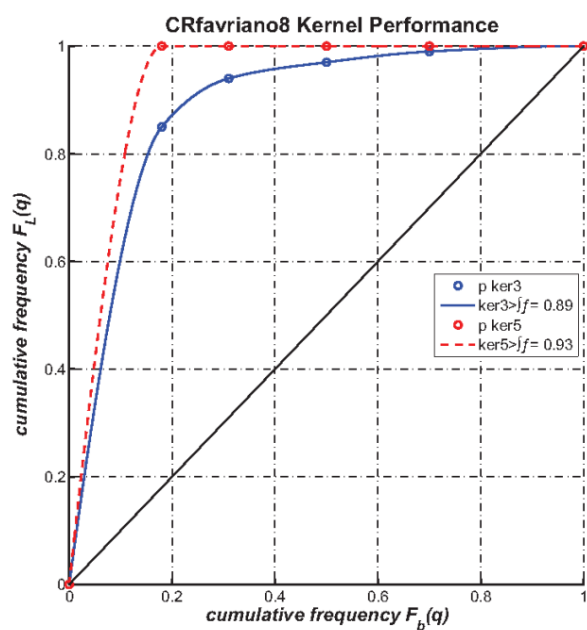
D8, 800-1500 Pa



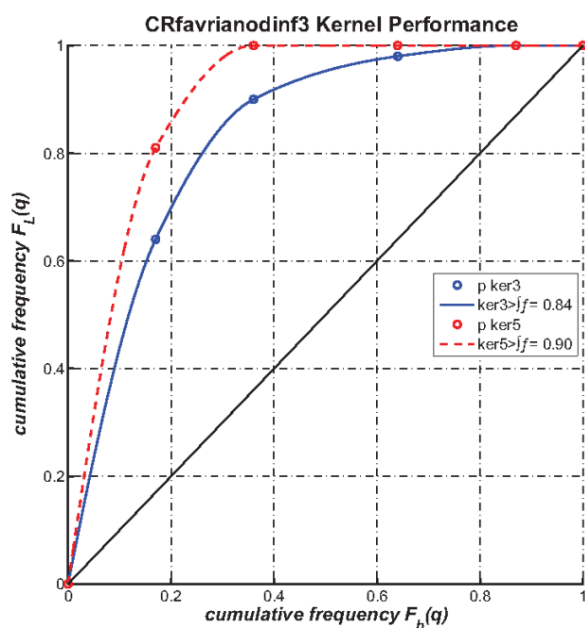
Mult, 500-800 Pa



D8, 500-2500 Pa



D8, 800-800 Pa



Dinf, 500-1500 Pa

Fig. 22. Risultati più significativi per il bacino di Rio Fraviano, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx).

Classe	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	816	61	153
0 - 50 mm	:	2632	90	100
50 - 100 mm	:	1907	45	11
100 - 200 mm	:	2611	23	3
200 - 400 mm	:	2760	20	3
> 400 mm	:	4127	19	1
Stabile	:	3746	7	0
Totale	:	18599	265	271
Classe - percentuale	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	4.39	23.02	56.46
0 - 50 mm	:	14.15	33.96	36.90
50 - 100 mm	:	10.25	16.98	4.06
100 - 200 mm	:	14.04	8.68	1.11
200 - 400 mm	:	14.84	7.55	1.11
> 400 mm	:	22.19	7.17	0.37
Stabile	:	20.14	2.64	0.00

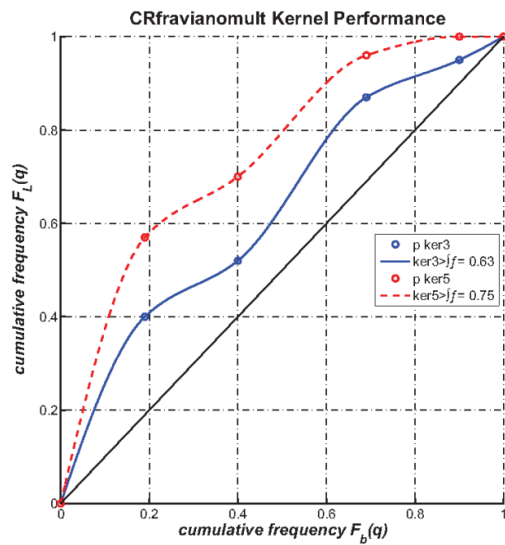
Tabella 5. Valori relativi al modello più performante (D8, 500-800 Pa); nella parte superiore il bacino viene classificato per numero di celle per relativa classe di instabilità, nella parte inferiore per percentuale per relativa classe di instabilità.

La significatività del modello risulta essere molto elevata nel bacino di Rio Fraviano, con valori che raggiungono 0,88 per i Kernel 3X3 e 0,94 per i Kernel 5X5.

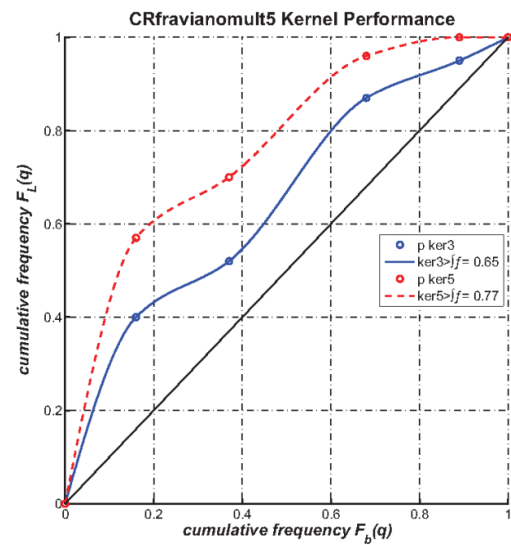
Per le aree ad uso prativo risulta molto buono il valore di coesione 500 N/m^2 , mentre per le aree boscate i valori di coesione più precisi si hanno con 800 e 1500 N/m^2 .

L'algoritmo per il calcolo dell'area drenata che sembra adattarsi meglio è anche in questo caso il D8.

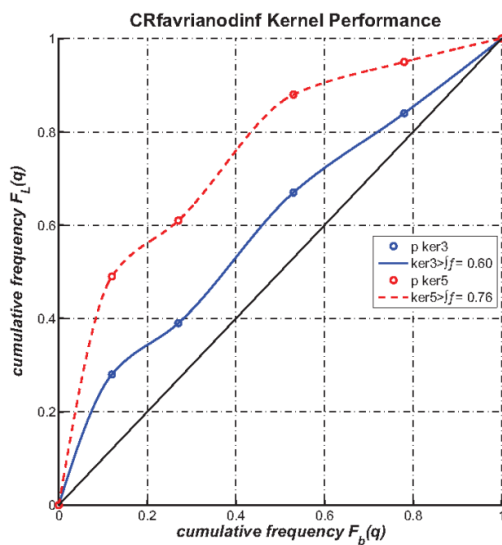
I risultati meno significativi:



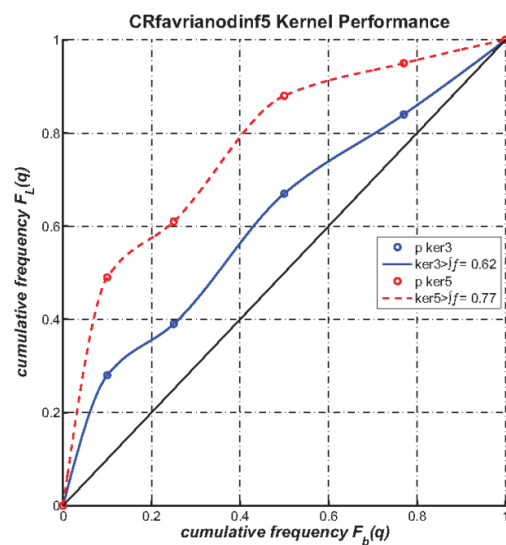
Mult. 500-5000



Mult. 800-5000



Dinf 500-5000



Dinf 800-5000

Fig. 23. Risultati meno significativi per il bacino di Rio Fraviano, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx).

Classe	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	147	0	0
0 - 50 mm	:	1699	51	109
50 - 100 mm	:	1886	22	31
100 - 200 mm	:	2638	66	95
200 - 400 mm	:	1859	44	23
> 400 mm	:	918	3	13
Stabile	:	10880	85	0
Totale	:	20027	271	271

Classe - percentuale	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	0.73	0.00	0.00
0 - 50 mm	:	8.48	18.82	40.22
50 - 100 mm	:	9.42	8.12	11.44
100 - 200 mm	:	13.17	24.35	35.06
200 - 400 mm	:	9.28	16.24	8.49
> 400 mm	:	4.58	1.11	4.80
Stabile	:	54.33	31.37	0.00

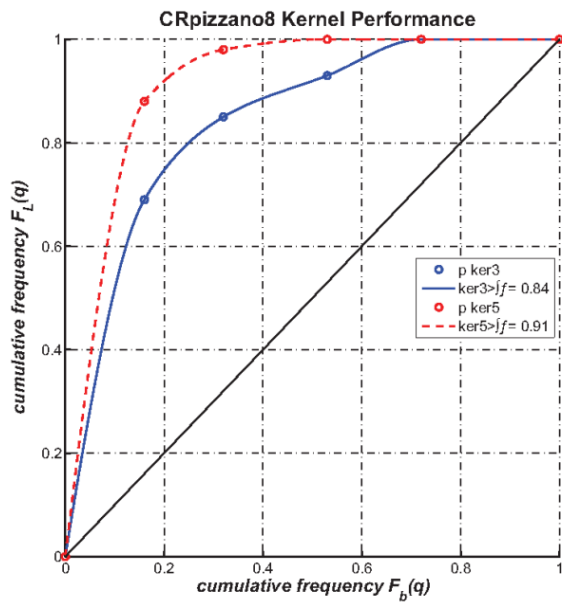
Tabella 6. Valori relativi al modello meno performante (Multiflow, 500-5000 Pa); nella parte superiore il bacino viene classificato per numero di celle per relativa classe di instabilità, nella parte inferiore per percentuale per relativa classe di instabilità.

Anche in questo caso, così come nel bacino di Rio Cortina, il modello perde di prevedibilità quando si assegna il valore di coesione 5000 N/m^2 alle aree boscate, sia che ai prati sia assegnato il valore 500 che 800 N/m^2 . Nonostante le differenze siano minime, gli algoritmi Dinf e Multiflow si adattano meno al modello SHALSTAB rispetto all'algoritmo D8.

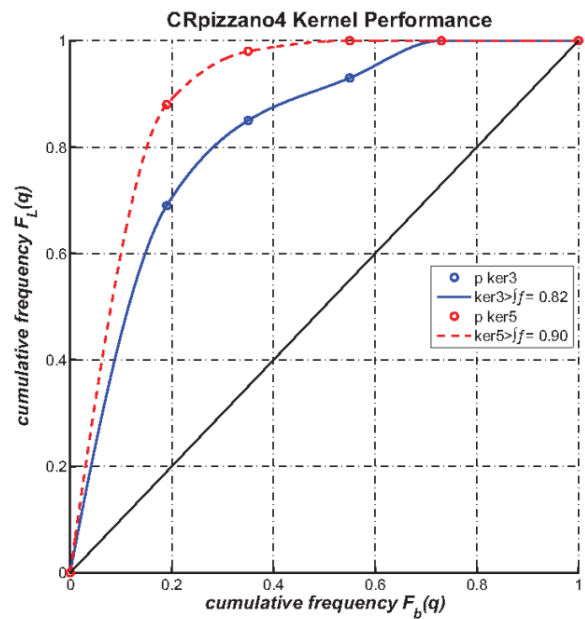
3.3 Il bacino di Rio Pizzano

I franamenti catalogati per il bacino di Rio Pizzano sono stati 12, per una superficie complessiva coinvolta di quasi 7 ha, poco meno del 2% della superficie complessiva del bacino. Il dissesto maggiore ha una superficie di 1,8 ha, quello inferiore poco meno di 1000 m^2 .

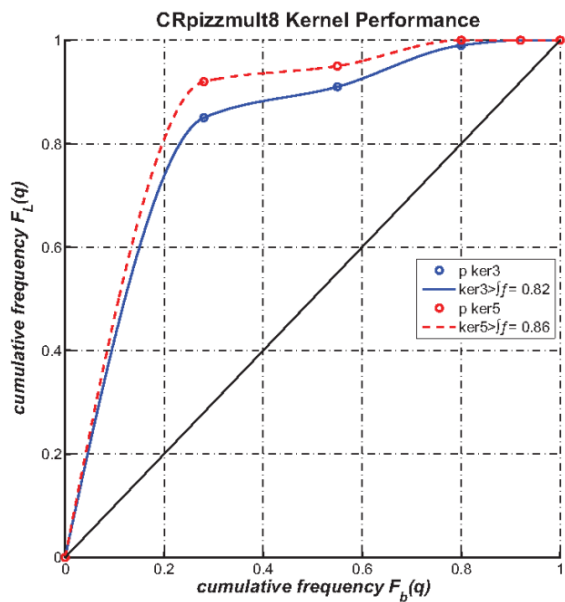
I risultati più significativi:



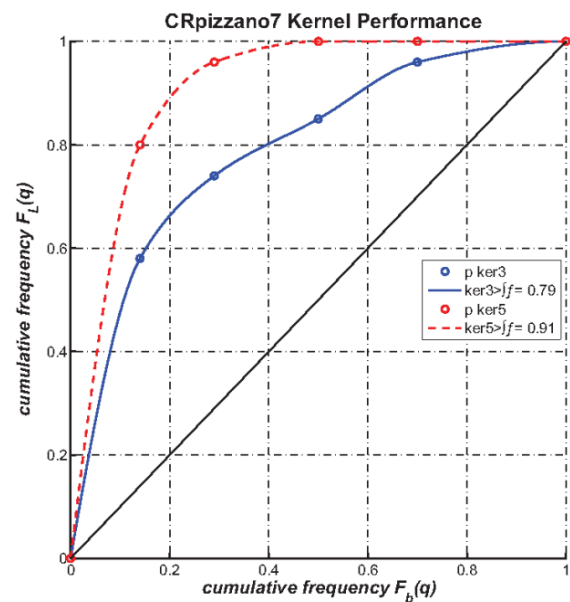
D8 ,800-800 Pa



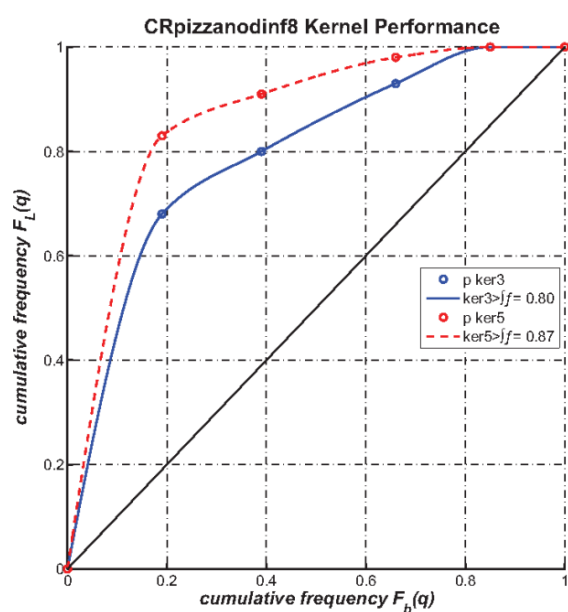
D8, 500-800 Pa



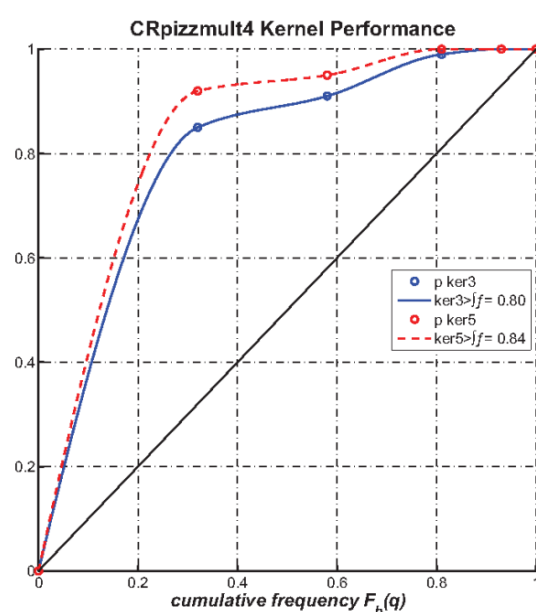
Mult, 800-800 Pa



D8, 800-1500 Pa



Dinf, 800-800 Pa



Mult, 500-800 Pa

Fig. 24. Risultati più significativi per il bacino di Rio Pizzano, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx).

Classe	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	5809	145	303
0 - 50 mm	:	4618	168	276
50 - 100 mm	:	4485	78	65
100 - 200 mm	:	5823	67	32
200 - 400 mm	:	5348	75	27
> 400 mm	:	8008	91	2
Stabile	:	6365	48	0
Totale	:	40456	672	705

Classe - percentuale	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	14.36	21.58	42.98
0 - 50 mm	:	11.41	25.00	39.15
50 - 100 mm	:	11.09	11.61	9.22
100 - 200 mm	:	14.39	9.97	4.54
200 - 400 mm	:	13.22	11.16	3.83
> 400 mm	:	19.79	13.54	0.28
Stabile	:	15.73	7.14	0.00

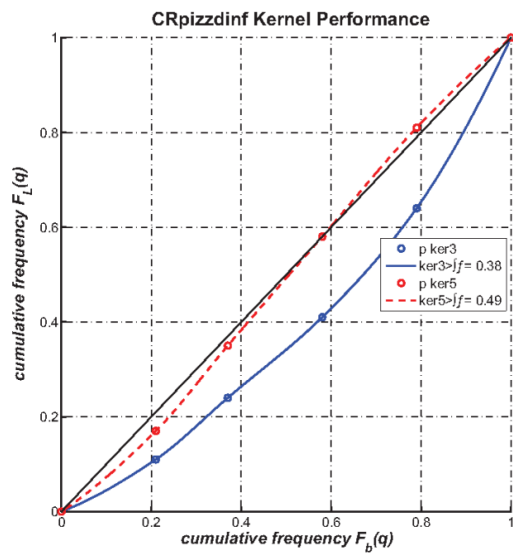
Tabella 7. Valori relativi al modello più performante (D8, 800-800 Pa); nella parte superiore il bacino viene classificato per numero di celle per relativa classe di instabilità, nella parte inferiore per percentuale per relativa classe di instabilità.

Il modello raggiunge ottimi valori di significatività: 0,84 nei Kernel 3X3, 0,91 nei Kernel 5X5; tuttavia, osservando più prove eseguite, il bacino di Rio Pizzano è quello che raggiunge i valori inferiori.

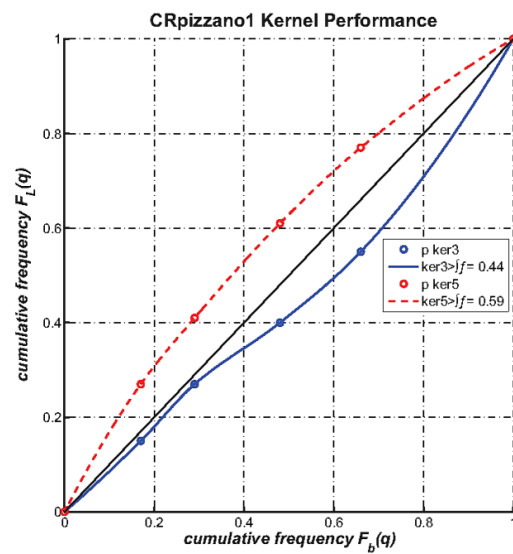
I valori di coesione che meglio si adattano al modello sono 800 N/m^2 , tanto per i prati, quanto per le aree boscate, utilizzando l'algoritmo D8.

I bassi valori di coesione rilevati per le aree boscate, relativamente al bacino di Rio Pizzano e Rio Fraviano, possono essere spiegati dal fatto che i franamenti mappati si localizzano prevalentemente in bosco: ne risulta che la coesione fornita dagli apparati radicali contro le forze destabilizzanti presenti nel pendio sia secondaria rispetto ad altri parametri come angolo di attrito interno e profondità del suolo. La superficie di distacco può essere ad un livello inferiore a quello delle radici, che, in questa eventualità, non avrebbero rilevanti effetti di trattenuta sul suolo.

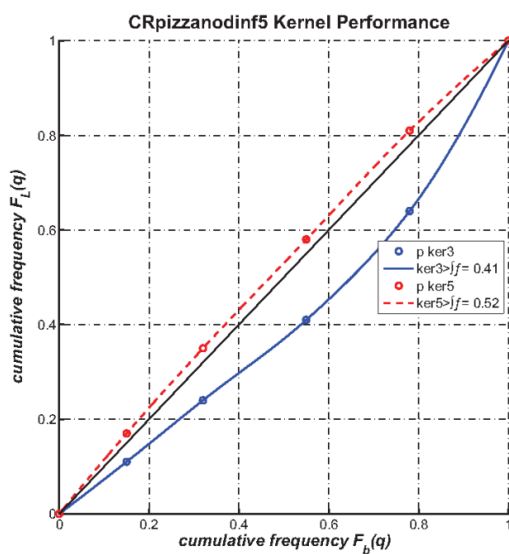
I risultati meno significativi:



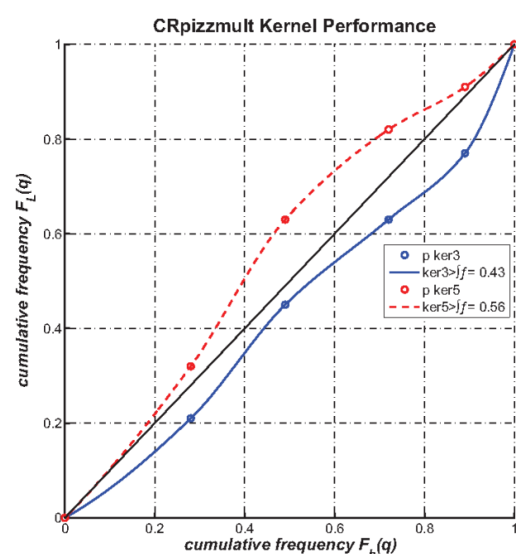
Dinf 500-5000



D8 500-5000



Dinf 800-5000



Mult. 500-5000

Fig. 25. Risultati meno significativi per il bacino di Rio Pizzano, sotto ad ogni grafico vengono riportati l'algoritmo di area drenata usato e i valori di coesione per i prati (a sx) e per le aree boscate (a dx).

Classe	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	4408	2	9
0 - 50 mm	:	4831	26	79
50 - 100 mm	:	3754	51	88
100 - 200 mm	:	4995	63	121
200 - 400 mm	:	4972	103	158
> 400 mm	:	4898	128	250
Stabile	:	16841	332	0
Totale		44699	705	705

Classe - percentuale	Bacino	SedSource	Kernel3x3	Kernel5x5
Instabile	:	9.86	0.28	1.28
0 - 50 mm	:	10.81	3.69	11.21
50 - 100 mm	:	8.40	7.23	12.48
100 - 200 mm	:	11.17	8.94	17.16
200 - 400 mm	:	11.12	14.61	22.41
> 400 mm	:	10.96	18.16	35.46
Stabile	:	37.68	47.09	0.00

Tabella 8. Valori relativi al modello meno performante (Dinf, 500-5000 Pa); nella parte superiore il bacino viene classificato per numero di celle per relativa classe di instabilità, nella parte inferiore per percentuale per relativa classe di instabilità.

Come comune agli altri bacini, i risultati meno significativi si ottengono applicando al modello il valore di coesione 5000 N/m² alle aree boscate.

3.4 Profondità del suolo 0,6 m e 0,8 m

Oltre alla profondità del suolo di default pari ad 1 m sono state eseguite delle prove modificandola a 0,6 e 0,8 m.

Di seguito viene proposta una comparazione dello stesso bacino di Rio Cortina, con valori di coesione 500 N/m^2 per i prati e 1500 N/m^2 per le aree boscate (corrispondenti ai valori che si adattano meglio al modello), al quale viene modificato esclusivamente il parametro di profondità del suolo.

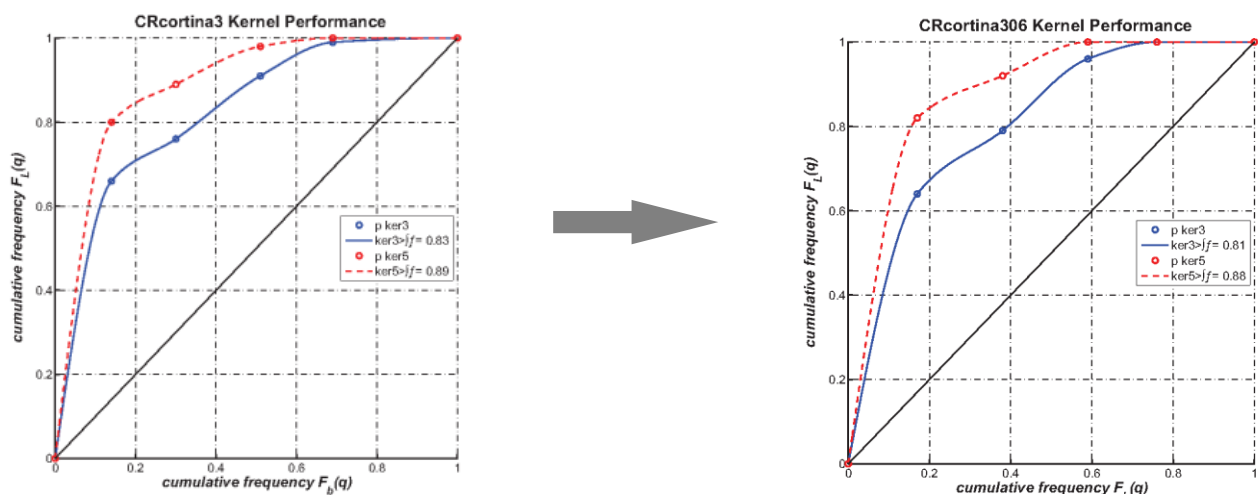


Fig. 26. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Cortina con profondità del suolo 1 m (a sx) e 0,6 m (a dx) e valori di coesione stabili a 500 N/m^2 per i prati e 1500 N/m^2 per le aree boscate (algoritmo di area drenata D8).

Si può osservare dai valori degli integrali dell'area sottesa dalle curve relative ai kernel 3X3 e 5X5, come ci sia un peggioramento nella validità del modello.

Tale peggioramento è tanto più netto utilizzando un modello meno preciso, come ad esempio quando utilizzati valori di coesione 500 N/m^2 per i prati e 5000 N/m^2 per le aree boscate, riferiti in questo caso al bacino di Rio Fraviano ed applicando l'algoritmo Multiflow.

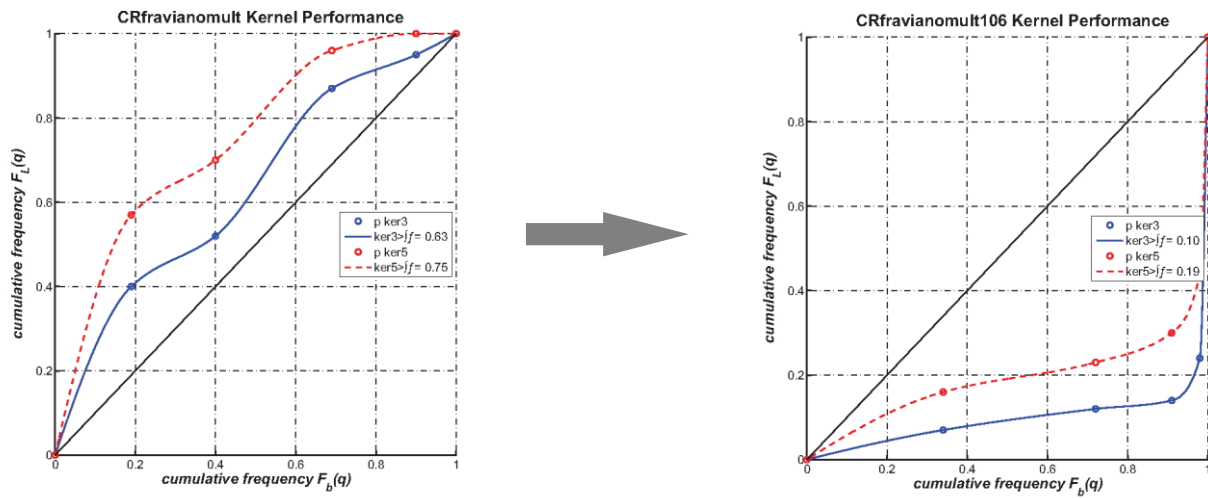


Fig. 27. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Fraviano con profondità del suolo 1 m (a sx) e 0,6 m (a dx) e valori di coesione stabili a 500 N/m² per i prati e 5000 N/m² per le aree boscate (algoritmo di area drenata Multiflow).

Si può notare dal risultato come il modello sia inapplicabile con questa profondità di suolo. Di seguito vengono riportate le comparazioni tra il modello con profondità 1 m e 0,8 m. Con il bacino di Rio Cortina è stata applicata coesione 500 N/m² per i prati, 1500 N/m² per le aree boscate e algoritmo di area drenata D8, con il bacino di Rio Fraviano è stata applicata coesione 500 N/m² per i prati, 5000 N/m² per le aree boscate e algoritmo di area drenata Multiflow. Come si può notare, per le due comparazioni sono stati ripresi i bacini ed i parametri utilizzati per il confronto tra profondità 1 m e 0,6 m.

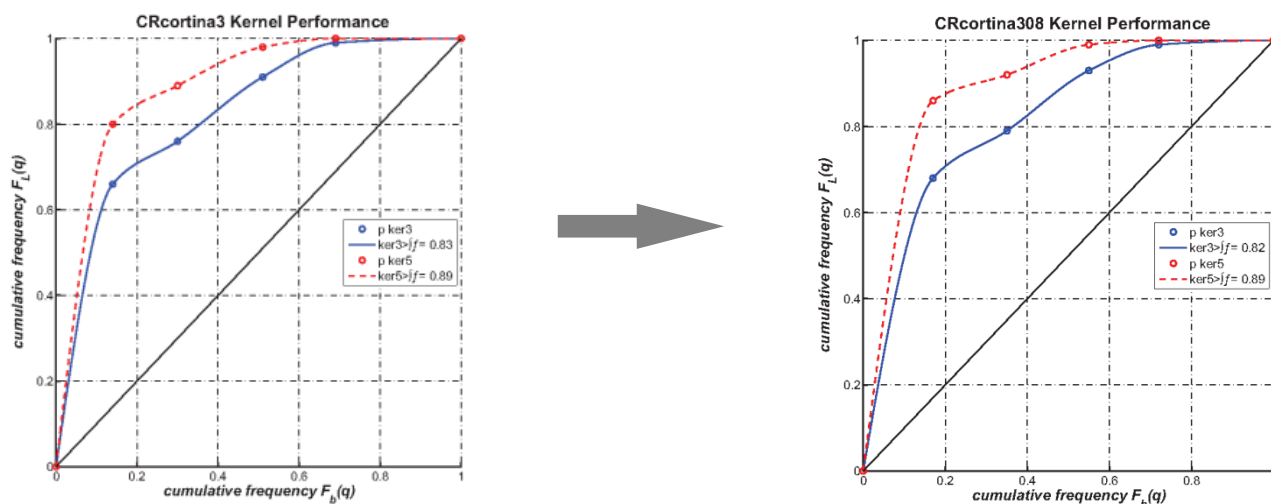


Fig. 28. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Cortina con profondità del suolo 1 m (a sx) e 0,8 m (a dx) e valori di coesione stabili a 500 N/m² per i prati e 1500 N/m² per le aree boscate (algoritmo di area drenata D8).

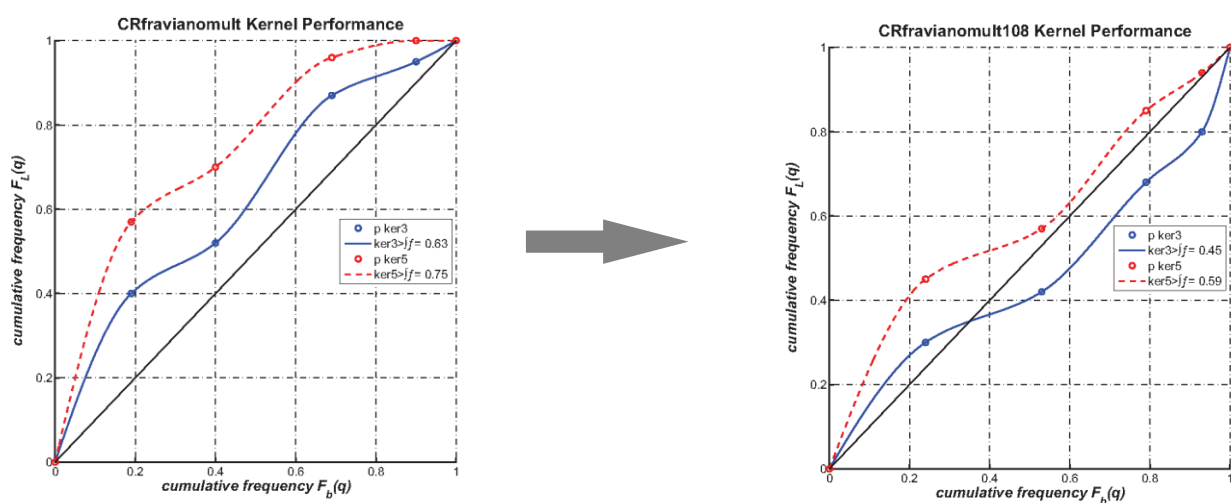


Fig. 29. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Fraviano con profondità del suolo 1 m (a sx) e 0,8 m (a dx) e valori di coesione stabili a 500 N/m² per i prati e 5000 N/m² per le aree boscate (algoritmo di area drenata Multiflow).

Applicando al modello il valore di profondità 0,8 m i risultati migliorano rispetto alla profondità 0,6 m, ma restano peggiori della profondità 1 m che sembra quindi adattarsi meglio al modello SHALSTAB. Viene in particolare confermato che, come visibile in Fig.

29, applicando tale profondità ad un modello con parametri non particolarmente validi ai fini della simulazione, questo peggiora notevolmente.

3.5 Angolo attrito interno del suolo a 34° e 45°

Il modello SHALSTAB prevede la possibilità di utilizzare un angolo di attrito interno del suolo di default, per il quale non sono stati eseguiti rilievi di campo: tale valore è pari a 45°. Per l'area oggetto di studio, comprendente i tre bacini, tuttavia è stato verificato come il valore di attrito interno del suolo sia di 38°.

Sono stati svolti alcuni test comparativi modificando esclusivamente questo parametro: osservando il bacino di Rio Cortina, assumendo valori di coesione di 500 N/m² per i prati, 1500 N/m² per le aree boscate e algoritmo per area drenata D8, è stato modificato il valore di tangenza dell'angolo di attrito interno del suolo (ϕ) rispettivamente in 0,78 (38°), 0,67 (34°) e 1 (45°).

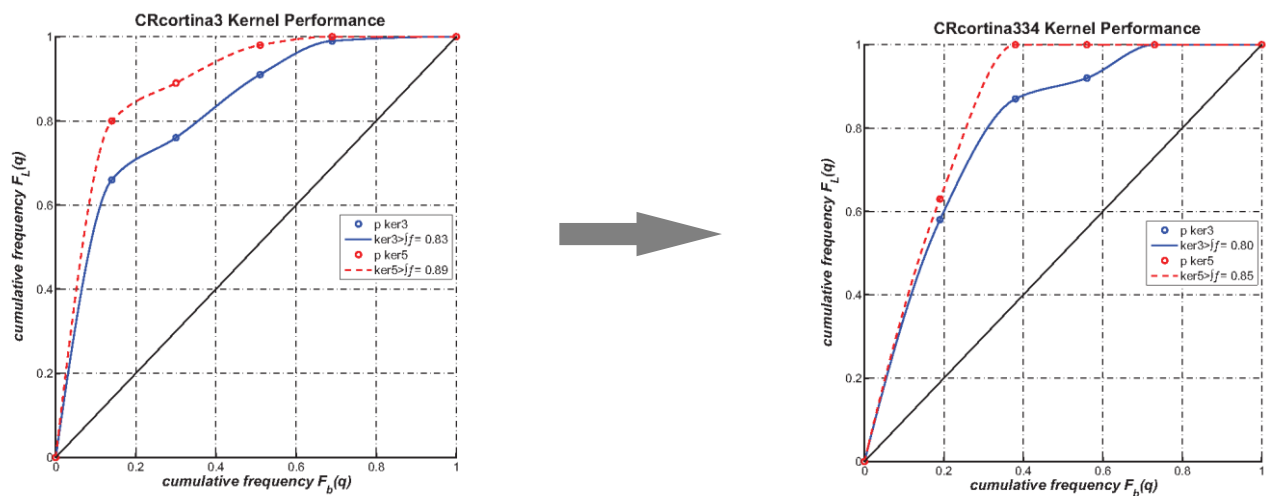


Fig. 30. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Cortina modificando il valore di angolo di attrito interno da 38° (a sx) a 34° (a dx).

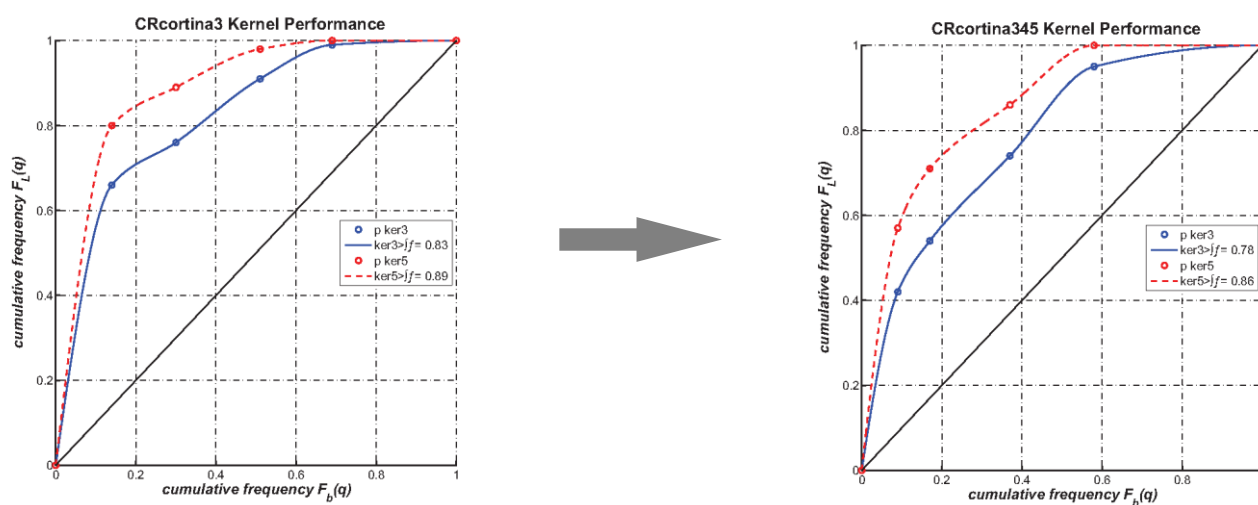


Fig. 31. Applicazione del modello SHALSTAB al bacino di Rio Cortina modificando il valore di angolo di attrito interno da 38° (a sx) a 45° (a dx).

Si può osservare come vi sia un discreto peggioramento sia passando da 38° a 34° , che da 38° a 45° , pur mantenendo un buon grado di affidabilità. In particolare l'angolo di attrito interno a 34° sembra migliore rispetto a quello a 45° .

4 Conclusioni

La tesi presenta un'analisi di sensibilità del modello SHALSTAB applicato a tre bacini montani situati in Val di Sole (Trentino-Alto Adige): bacino di Rio Cortina, di Rio Fraviano e di Rio Pizzano. Le simulazioni sono state realizzate mediante dei programmi eseguibili accompagnati dall'utilizzo del software ArcGIS. La capacità di previsione del modello SHALSTAB è stata valutata confrontando le mappe di pioggia critica (output del modello) con la distribuzione delle aree oggetto di franamento. Le simulazioni eseguite su tutti e tre i bacini mostrano come il modello si adatti bene ad essere applicato all'area di studio presa in esame.

Con la calibrazione è stato osservato che la coesione radicale sia, rispetto alla profondità del suolo e all'angolo di attrito interno, il parametro meno predittivo del modello, relativamente all'area di studio. Ciò è stato verificato in particolare per i bacini di Rio Fraviano e Rio Pizzano, dove i franamenti ricadono esclusivamente in aree boscate, nelle quali il soprassuolo può agire come elemento destabilizzante per il pendio (nelle simulazioni migliori è stato assegnato un valore di coesione di 800 Pa, sia per i prativi che per le aree boscate); è leggermente diversa la situazione per Rio Cortina, dove alcuni franamenti ricadono effettivamente in aree a prativi (quindi teoricamente più soggetti ad eventi franosi) e le simulazioni sono risultate buone anche con valori superiori di coesione per le aree boscate (1500 Pa e 2500 Pa oltre che 800 Pa). Meno significative risultano le simulazioni con valori di coesione per le aree boscate pari a 5000 Pa.

L'algoritmo di area drenata D8 risulta generalmente essere il migliore, seppur di poco rispetto agli algoritmi Dinf e Multiflow. La causa può essere attribuita alla localizzazione dei franamenti mappati: questi in particolare si sono verificati in corrispondenza del reticolo idrografico, lungo il quale l'algoritmo D8, assegnando una direzione univoca di deflusso, appare più adatto.

La calibrazione dell'angolo di attrito interno risulta avere notevole importanza: applicando un angolo maggiore (45°) o minore (34°), rispetto a quello calibrato (38°), i risultati peggiorano sensibilmente. La misurazione eseguita in campo sembra essere, dunque, ottimale.

Anche modificando la profondità del suolo predefinita (1 m), con valori inferiori (0,6 m e 0,8 m) si ha un peggioramento nelle capacità predittive del modello: in particolare, è stato osservato che la minore bontà dei risultati, determinata dal valore inferiore di profondità del suolo, è tanto più marcata quanto peggiore è la simulazione con valore predefinito dello spessore del suolo.

Bibliografia

Borga M., Dalla Fontana G., 1999. Modellazione distribuita dei franamenti superficiali innescati da eventi meteorici intensi. *Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali Università di Padova*.

Borga M., Dalla Fontana G., Gregoretti C., Marchi L., 2002. Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability. *Hydrological Processes*, 16, 2833-2851.

Dalla Fontana G., Borga M., Tarolli P., 2005. La prevenzione del rischio idrogeologico nei piccoli bacini montani della regione: esperienze e conoscenze acquisite con il progetto Catchrisk. *Servizio territorio montano e manutenzioni Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia*, 95-111.

Lanni C., Borga M., Rigon R., Tarolli P., 2012. Modelling shallow landslide susceptibility by means of a subsurface flow path connectivity index and estimates of soil depth spatial distribution. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3959-3971.

Montgomery D.R., Dietrich W.E., 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30, 1153-1171.

Bibliografia Web

<http://www.rifugiodorigoni.it/geologia.php>

<http://www.pcn.minambiente.it/GN>

<http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm>

Appendice

Di seguito viene riportata la ricapitolazione delle modellazioni eseguite per i bacini di Rio Cortina, Rio Fraviano e Rio Pizzano.

CORTINA D8					CORTINA Dinf				
Algoritmo	Coesione prato (N/m ²)	Coesione bosco (N/m ²)	Angolo attrito interno (°)	Profondità suolo (m)	Algoritmo	Coesione prato (N/m ²)	Coesione bosco (N/m ²)	Angolo attrito interno (°)	Profondità suolo (m)
D8	500	5000	38	1	Dinf	500	5000	38	1
D8	500	5000	34	1	Dinf	500	5000	34	1
D8	500	2500	38	1	Dinf	500	2500	38	1
D8	500	2500	34	1	Dinf	500	2500	34	1
D8	500	1500	38	1	Dinf	500	1500	38	1
D8	500	1500	34	1	Dinf	500	1500	34	1
D8	500	800	38	1	Dinf	500	800	38	1
D8	500	800	34	1	Dinf	500	800	34	1
D8	800	5000	38	1	Dinf	800	5000	38	1
D8	800	5000	34	1	Dinf	800	5000	34	1
D8	800	2500	38	1	Dinf	800	2500	38	1
D8	800	2500	34	1	Dinf	800	2500	34	1
D8	800	1500	38	1	Dinf	800	1500	38	1
D8	800	1500	34	1	Dinf	800	1500	34	1
D8	800	800	38	1	Dinf	800	800	38	1
D8	800	800	34	1	Dinf	800	800	34	1
D8	500	5000	38	0.8	Dinf	500	5000	38	0.8
D8	500	5000	34	0.8	Dinf	500	5000	34	0.8
D8	500	2500	38	0.8	Dinf	500	2500	38	0.8
D8	500	2500	34	0.8	Dinf	500	2500	34	0.8
D8	500	1500	38	0.8	Dinf	500	1500	38	0.8
D8	500	1500	34	0.8	Dinf	500	1500	34	0.8
D8	500	800	38	0.8	Dinf	500	800	38	0.8
D8	500	800	34	0.8	Dinf	500	800	34	0.8
D8	800	5000	38	0.8	Dinf	800	5000	38	0.8
D8	800	5000	34	0.8	Dinf	800	5000	34	0.8
D8	800	2500	38	0.8	Dinf	800	2500	38	0.8
D8	800	2500	34	0.8	Dinf	800	2500	34	0.8
D8	800	1500	38	0.8	Dinf	800	1500	38	0.8
D8	800	1500	34	0.8	Dinf	800	1500	34	0.8
D8	800	800	38	0.8	Dinf	800	800	38	0.8
D8	800	800	34	0.8	Dinf	800	800	34	0.8
D8	500	5000	38	0.6	Dinf	500	5000	38	0.6
D8	500	5000	34	0.6	Dinf	500	5000	34	0.6
D8	500	2500	38	0.6	Dinf	500	2500	38	0.6
D8	500	2500	34	0.6	Dinf	500	2500	34	0.6
D8	500	1500	38	0.6	Dinf	500	1500	38	0.6
D8	500	1500	34	0.6	Dinf	500	1500	34	0.6
D8	500	800	38	0.6	Dinf	500	800	38	0.6
D8	500	800	34	0.6	Dinf	500	800	34	0.6
D8	800	5000	38	0.6	Dinf	800	5000	38	0.6
D8	800	5000	34	0.6	Dinf	800	5000	34	0.6
D8	800	2500	38	0.6	Dinf	800	2500	38	0.6
D8	800	2500	34	0.6	Dinf	800	2500	34	0.6
D8	800	1500	38	0.6	Dinf	800	1500	38	0.6
D8	800	1500	34	0.6	Dinf	800	1500	34	0.6
D8	800	800	38	0.6	Dinf	800	800	38	0.6
D8	800	800	34	0.6	Dinf	800	800	34	0.6

Tabella 9. Riassunto prove bacino Rio Cortina con algoritmo area drenata D8 e Dinf.

CORTINA Multiflow				
Algoritmo	Coesione prato (N/m²)	Coesione bosco (N/m²)	Angolo attrito interno (°)	Profondità suolo (m)
Mult.	500	5000	38	1
Mult.	500	5000	34	1
Mult.	500	2500	38	1
Mult.	500	2500	34	1
Mult.	500	1500	38	1
Mult.	500	1500	34	1
Mult.	500	800	38	1
Mult.	500	800	34	1
Mult.	800	5000	38	1
Mult.	800	5000	34	1
Mult.	800	2500	38	1
Mult.	800	2500	34	1
Mult.	800	1500	38	1
Mult.	800	1500	34	1
Mult.	800	800	38	1
Mult.	800	800	34	1
Mult.	500	5000	38	0.8
Mult.	500	5000	34	0.8
Mult.	500	2500	38	0.8
Mult.	500	2500	34	0.8
Mult.	500	1500	38	0.8
Mult.	500	1500	34	0.8
Mult.	500	800	38	0.8
Mult.	500	800	34	0.8
Mult.	800	5000	38	0.8
Mult.	800	5000	34	0.8
Mult.	800	2500	38	0.8
Mult.	800	2500	34	0.8
Mult.	800	1500	38	0.8
Mult.	800	1500	34	0.8
Mult.	800	800	38	0.8
Mult.	800	800	34	0.8
Mult.	500	5000	38	0.6
Mult.	500	5000	34	0.6
Mult.	500	2500	38	0.6
Mult.	500	2500	34	0.6
Mult.	500	1500	38	0.6
Mult.	500	1500	34	0.6
Mult.	500	800	38	0.6
Mult.	500	800	34	0.6
Mult.	800	5000	38	0.6
Mult.	800	5000	34	0.6
Mult.	800	2500	38	0.6
Mult.	800	2500	34	0.6
Mult.	800	1500	38	0.6
Mult.	800	1500	34	0.6
Mult.	800	800	38	0.6
Mult.	800	800	34	0.6

FRAVIANO D8				
Algoritmo	Coesione prato (N/m²)	Coesione bosco (N/m²)	Angolo attrito interno (°)	Profondità a suolo (m)
D8	500	5000	38	1
D8	500	5000	34	1
D8	500	2500	38	1
D8	500	2500	34	1
D8	500	1500	38	1
D8	500	1500	34	1
D8	500	800	38	1
D8	500	800	34	1
D8	800	5000	38	1
D8	800	5000	34	1
D8	800	2500	38	1
D8	800	2500	34	1
D8	800	1500	38	1
D8	800	1500	34	1
D8	800	800	38	1
D8	800	800	34	1
D8	500	5000	38	0.8
D8	500	5000	34	0.8
D8	500	2500	38	0.8
D8	500	2500	34	0.8
D8	500	1500	38	0.8
D8	500	1500	34	0.8
D8	500	800	38	0.8
D8	500	800	34	0.8
D8	800	5000	38	0.8
D8	800	5000	34	0.8
D8	800	2500	38	0.8
D8	800	2500	34	0.8
D8	800	1500	38	0.8
D8	800	1500	34	0.8
D8	800	800	38	0.8
D8	800	800	34	0.8
D8	500	5000	38	0.6
D8	500	5000	34	0.6
D8	500	2500	38	0.6
D8	500	2500	34	0.6
D8	500	1500	38	0.6
D8	500	1500	34	0.6
D8	500	800	38	0.6
D8	500	800	34	0.6
D8	800	5000	38	0.6
D8	800	5000	34	0.6
D8	800	2500	38	0.6
D8	800	2500	34	0.6
D8	800	1500	38	0.6
D8	800	1500	34	0.6
D8	800	800	38	0.6
D8	800	800	34	0.6

Tabella 10. Riassunto prove bacino Rio Cortina con algoritmo area drenata Multiflow e Rio Fraviano con algoritmo area drenata D8.

FRAVIANO Dinf					FRAVIANO Multiflow				
Algoritmo	Coesione prato (N/m²)	Coesione bosco (N/m²)	Angolo attrito interno (°)	Profondità suolo (m)	Algoritmo	Coesione prato (N/m²)	Coesione bosco (N/m²)	Angolo attrito interno (°)	Profondità suolo (m)
Dinf	500	5000	38	1	Mult.	500	5000	38	1
Dinf	500	5000	34	1	Mult.	500	5000	34	1
Dinf	500	2500	38	1	Mult.	500	2500	38	1
Dinf	500	2500	34	1	Mult.	500	2500	34	1
Dinf	500	1500	38	1	Mult.	500	1500	38	1
Dinf	500	1500	34	1	Mult.	500	1500	34	1
Dinf	500	800	38	1	Mult.	500	800	38	1
Dinf	500	800	34	1	Mult.	500	800	34	1
Dinf	800	5000	38	1	Mult.	800	5000	38	1
Dinf	800	5000	34	1	Mult.	800	5000	34	1
Dinf	800	2500	38	1	Mult.	800	2500	38	1
Dinf	800	2500	34	1	Mult.	800	2500	34	1
Dinf	800	1500	38	1	Mult.	800	1500	38	1
Dinf	800	1500	34	1	Mult.	800	1500	34	1
Dinf	800	800	38	1	Mult.	800	800	38	1
Dinf	800	800	34	1	Mult.	800	800	34	1
Dinf	500	5000	38	0.8	Mult.	500	5000	38	0.8
Dinf	500	5000	34	0.8	Mult.	500	5000	34	0.8
Dinf	500	2500	38	0.8	Mult.	500	2500	38	0.8
Dinf	500	2500	34	0.8	Mult.	500	2500	34	0.8
Dinf	500	1500	38	0.8	Mult.	500	1500	38	0.8
Dinf	500	1500	34	0.8	Mult.	500	1500	34	0.8
Dinf	500	800	38	0.8	Mult.	500	800	38	0.8
Dinf	500	800	34	0.8	Mult.	500	800	34	0.8
Dinf	800	5000	38	0.8	Mult.	800	5000	38	0.8
Dinf	800	5000	34	0.8	Mult.	800	5000	34	0.8
Dinf	800	2500	38	0.8	Mult.	800	2500	38	0.8
Dinf	800	2500	34	0.8	Mult.	800	2500	34	0.8
Dinf	800	1500	38	0.8	Mult.	800	1500	38	0.8
Dinf	800	1500	34	0.8	Mult.	800	1500	34	0.8
Dinf	800	800	38	0.8	Mult.	800	800	38	0.8
Dinf	800	800	34	0.8	Mult.	800	800	34	0.8
Dinf	500	5000	38	0.6	Mult.	500	5000	38	0.6
Dinf	500	5000	34	0.6	Mult.	500	5000	34	0.6
Dinf	500	2500	38	0.6	Mult.	500	2500	38	0.6
Dinf	500	2500	34	0.6	Mult.	500	2500	34	0.6
Dinf	500	1500	38	0.6	Mult.	500	1500	38	0.6
Dinf	500	1500	34	0.6	Mult.	500	1500	34	0.6
Dinf	500	800	38	0.6	Mult.	500	800	38	0.6
Dinf	500	800	34	0.6	Mult.	500	800	34	0.6
Dinf	800	5000	38	0.6	Mult.	800	5000	38	0.6
Dinf	800	5000	34	0.6	Mult.	800	5000	34	0.6
Dinf	800	2500	38	0.6	Mult.	800	2500	38	0.6
Dinf	800	2500	34	0.6	Mult.	800	2500	34	0.6
Dinf	800	1500	38	0.6	Mult.	800	1500	38	0.6
Dinf	800	1500	34	0.6	Mult.	800	1500	34	0.6
Dinf	800	800	38	0.6	Mult.	800	800	38	0.6
Dinf	800	800	34	0.6	Mult.	800	800	34	0.6

Tabella 11. Riassunto prove bacino Rio Fraviano con algoritmo area drenata Dinf e Multiflow.

PIZZANO D8					PIZZANO Dinf				
Algoritmo	Coesione prato (N/m ²)	Coesione bosco (N/m ²)	Angolo attrito interno (°)	Profondità suolo (m)	Algoritmo	Coesione prato (N/m ²)	Coesione bosco (N/m ²)	Angolo attrito interno (°)	Profondità suolo (m)
D8	500	5000	38	1	Dinf	500	5000	38	1
D8	500	5000	34	1	Dinf	500	5000	34	1
D8	500	2500	38	1	Dinf	500	2500	38	1
D8	500	2500	34	1	Dinf	500	2500	34	1
D8	500	1500	38	1	Dinf	500	1500	38	1
D8	500	1500	34	1	Dinf	500	1500	34	1
D8	500	800	38	1	Dinf	500	800	38	1
D8	500	800	34	1	Dinf	500	800	34	1
D8	800	5000	38	1	Dinf	800	5000	38	1
D8	800	5000	34	1	Dinf	800	5000	34	1
D8	800	2500	38	1	Dinf	800	2500	38	1
D8	800	2500	34	1	Dinf	800	2500	34	1
D8	800	1500	38	1	Dinf	800	1500	38	1
D8	800	1500	34	1	Dinf	800	1500	34	1
D8	800	800	38	1	Dinf	800	800	38	1
D8	800	800	34	1	Dinf	800	800	34	1
D8	500	5000	38	0.8	Dinf	500	5000	38	0.8
D8	500	5000	34	0.8	Dinf	500	5000	34	0.8
D8	500	2500	38	0.8	Dinf	500	2500	38	0.8
D8	500	2500	34	0.8	Dinf	500	2500	34	0.8
D8	500	1500	38	0.8	Dinf	500	1500	38	0.8
D8	500	1500	34	0.8	Dinf	500	1500	34	0.8
D8	500	800	38	0.8	Dinf	500	800	38	0.8
D8	500	800	34	0.8	Dinf	500	800	34	0.8
D8	800	5000	38	0.8	Dinf	800	5000	38	0.8
D8	800	5000	34	0.8	Dinf	800	5000	34	0.8
D8	800	2500	38	0.8	Dinf	800	2500	38	0.8
D8	800	2500	34	0.8	Dinf	800	2500	34	0.8
D8	800	1500	38	0.8	Dinf	800	1500	38	0.8
D8	800	1500	34	0.8	Dinf	800	1500	34	0.8
D8	800	800	38	0.8	Dinf	800	800	38	0.8
D8	800	800	34	0.8	Dinf	800	800	34	0.8
D8	500	5000	38	0.6	Dinf	500	5000	38	0.6
D8	500	5000	34	0.6	Dinf	500	5000	34	0.6
D8	500	2500	38	0.6	Dinf	500	2500	38	0.6
D8	500	2500	34	0.6	Dinf	500	2500	34	0.6
D8	500	1500	38	0.6	Dinf	500	1500	38	0.6
D8	500	1500	34	0.6	Dinf	500	1500	34	0.6
D8	500	800	38	0.6	Dinf	500	800	38	0.6
D8	500	800	34	0.6	Dinf	500	800	34	0.6
D8	800	5000	38	0.6	Dinf	800	5000	38	0.6
D8	800	5000	34	0.6	Dinf	800	5000	34	0.6
D8	800	2500	38	0.6	Dinf	800	2500	38	0.6
D8	800	2500	34	0.6	Dinf	800	2500	34	0.6
D8	800	1500	38	0.6	Dinf	800	1500	38	0.6
D8	800	1500	34	0.6	Dinf	800	1500	34	0.6
D8	800	800	38	0.6	Dinf	800	800	38	0.6
D8	800	800	34	0.6	Dinf	800	800	34	0.6

Tabella 12. Riassunto prove bacino Rio Pizzano con algoritmo area drenata D8 e Dinf.

PIZZANO Multiflow				
Algoritmo	Coesione prato (N/m ²)	Coesione bosco (N/m ²)	Angolo attrito interno (°)	Profondità suolo (m)
Mult.	500	5000	38	1
Mult.	500	5000	34	1
Mult.	500	2500	38	1
Mult.	500	2500	34	1
Mult.	500	1500	38	1
Mult.	500	1500	34	1
Mult.	500	800	38	1
Mult.	500	800	34	1
Mult.	800	5000	38	1
Mult.	800	5000	34	1
Mult.	800	2500	38	1
Mult.	800	2500	34	1
Mult.	800	1500	38	1
Mult.	800	1500	34	1
Mult.	800	800	38	1
Mult.	800	800	34	1
Mult.	500	5000	38	0.8
Mult.	500	5000	34	0.8
Mult.	500	2500	38	0.8
Mult.	500	2500	34	0.8
Mult.	500	1500	38	0.8
Mult.	500	1500	34	0.8
Mult.	500	800	38	0.8
Mult.	500	800	34	0.8
Mult.	800	5000	38	0.8
Mult.	800	5000	34	0.8
Mult.	800	2500	38	0.8
Mult.	800	2500	34	0.8
Mult.	800	1500	38	0.8
Mult.	800	1500	34	0.8
Mult.	800	800	38	0.8
Mult.	800	800	34	0.8
Mult.	500	5000	38	0.6
Mult.	500	5000	34	0.6
Mult.	500	2500	38	0.6
Mult.	500	2500	34	0.6
Mult.	500	1500	38	0.6
Mult.	500	1500	34	0.6
Mult.	500	800	38	0.6
Mult.	500	800	34	0.6
Mult.	800	5000	38	0.6
Mult.	800	5000	34	0.6
Mult.	800	2500	38	0.6
Mult.	800	2500	34	0.6
Mult.	800	1500	38	0.6
Mult.	800	1500	34	0.6
Mult.	800	800	38	0.6
Mult.	800	800	34	0.6

Tabella 13. Riassunto prove bacino Rio Pizzano con algoritmo area drenata Multiflow