

STIMA DELLE AREE INONDABILI MEDIANTE METODI GEOMORFOLOGICI E MODELLAZIONE IDRAULICA MONO E BI-DIMENSIONALE: APPLICAZIONE AL FIUME BRADANO

A. Sole, C. Samela, A. Cantisani, L. Giuzio, S. Manfreda

Università degli Studi della Basilicata, Via dell'Ateneo Lucano 10, Potenza

SOMMARIO

L'individuazione delle aree inondabili è un problema cruciale che, col passare del tempo, sta diventando sempre più impattante sulla nostra società. Una delimitazione preliminare può essere effettuata mediante procedure basate sull'analisi della geomorfologia del bacino, la quale può essere ricavata da un DEM di sufficiente risoluzione. Nel presente lavoro, la mappatura delle aree inondabili viene condotta utilizzando tecniche di classificazione binaria lineare basate sui descrittori geomorfologici che hanno un ruolo di controllo sul processo di inondazione. I risultati ottenuti possono contribuire alla definizione di nuove strategie per la delimitazione di aree a rischio di inondazione con procedure basate sui DEM. A tal fine sono prese in considerazione alcune caratteristiche locali, generalmente utilizzate per descrivere le caratteristiche idrologiche del bacino, e alcuni indici morfologici compositi, allo scopo di individuare quello più significativo. Le analisi sono effettuate su due diverse serie di dati: una basata su simulazioni idrauliche realizzate con un modello 1-D, e la seconda ottenuta attraverso un modello idraulico 2-D. I risultati evidenziano il potenziale di ogni descrittore morfologico per individuare l'estensione delle aree a rischio d'inondazione e, in particolare, la capacità di un indice geomorfologico di rappresentare le aree inondabili a diverse scale di applicazione.

1. Introduzione

Le inondazioni stanno diventando sempre più frequenti e difficili da prevenire (Douglas et al., 2012). Il fenomeno sembra in costante crescita per l'esposizione delle attività umane (Cannon, 1994; Ceola et al., 2014) e le modifiche legate ai cambiamenti climatici (Milly et al., 2002; Prudhomme, 2002). La situazione ha spinto la comunità internazionale a ricercare nuove strategie per affrontare il rischio di inondazione.

La legislazione europea ha introdotto nuove politiche per la valutazione e la gestione del rischio idraulico per la protezione del territorio attraverso la direttiva sulle alluvioni 2007/60/CE. Tale direttiva impone agli Stati membri di valutare il rischio d'inondazione mappando l'estensione delle aree inondabili sui propri territori, al fine di valutare le attività e le persone a rischio, e di adottare misure adeguate e coordinate per ridurre questo rischio, garantendo la protezione idraulica sostenibile del territorio. Per questo motivo, la definizione di procedure in grado di ottenere una descrizione delle zone soggette al rischio di inondazione è una crescente necessità in Europa e in molti altri paesi. Generalmente, l'individuazione delle aree inondabili è condotta eseguendo simulazioni idrologiche-idrauliche, le quali, tuttavia, richiedono un gran numero di informazioni non sempre disponibili.

In questo ambito, molti autori hanno definito procedure per la delimitazione delle aree inondabili con metodi semplificati basati su caratteristiche geomorfologiche dei bacini idrografici (Nardi et al., 2006; Manfreda et al., 2011; Degiorgis et al., 2012; Manfreda et al., 2014a; Jalayer et al., 2014; De Risi et al., 2014; Papaioannou et al., 2014). Tali procedure possono fornire un'individuazione preliminare delle aree inondabili, utile per la pianificazione di analisi numeriche, ma anche per le compagnie di assicurazione che hanno un interesse crescente verso l'individuazione dei beni e della popolazione a rischio.

Degiorgis et al. (2012) hanno introdotto l'uso di classificatori binari lineari per indagare le relazioni tra diverse caratteristiche morfologiche derivate da modelli digitali del terreno (DEM) e il pericolo di inondazione a scala di bacino. Nel presente lavoro, il numero di descrittori morfologici indagati è stato esteso, considerando caratteristiche locali e indici sintetici costruiti con l'obiettivo specifico di rappresentare una metrica per il pericolo di inondazione. Il metodo è stato testato sul fiume Bradano (Italia meridionale) su diverse scale di applicazione, utilizzando come riferimento due mappe di inondazione: una ottenuta applicando un approccio monodimensionale su tutto il bacino (scala di bacino) e una ottenuta usando un approccio bidimensionale alla foce (scala locale). Quest'ultimo rappresenta un caso di studio estremamente interessante che non è mai stato considerato per applicazioni geomorfologiche. Infatti, la maggior parte delle applicazioni effettuate finora ha previsto il confronto delle aree inondabili ottenute a partire dalle caratteristiche morfologiche esclusivamente con simulazioni monodimensionali in zone montuose, ma è ben noto che la situazione più difficile negli studi idraulici è rappresentata dalle aree pianeggianti. Quindi,

l'obiettivo principale di questo studio è l'individuazione di una metodologia adatta sia alle aree montane che a quelle di pianura.

2. Area di studio

Il fiume Bradano è uno dei maggiori fiumi della Basilicata con un'area drenata pari a circa 2765 km². Il clima è caratterizzato da un regime asciutto-subumido con piogge scarse e portata di base nulla durante il periodo estivo (Fiorentino et al., 2007). Più del 77% della superficie totale è coperta da aree agricole e solo il 23% da boschi e aree semi-naturali (questa informazione è desunta dalla mappa CORINE-Land Cover dell'Agenzia europea per l'ambiente).

La parte alta del bacino è caratterizzata da una marcata topografia; di contro, la parte terminale del bacino, in prossimità della foce, è estremamente pianeggiante. Dal punto di vista delle alluvioni, questo bacino è storicamente uno dei più critici sia per la Basilicata che per la contigua Puglia. Essa è stata recentemente interessata da numerosi eventi alluvionali come quelli verificatisi negli anni 1972, 2004 e 2011. Alcune informazioni aggiuntive sui danni prodotti dalla maggior parte di questi eventi sono disponibili sul sito <http://www.evalmet.it/>.

3. Metodologia e serie di dati

3.1 Mappatura delle aree inondabili

L'estensione delle aree inondabili è stata definita, per tutti i principali corsi d'acqua della regione, dall'Autorità di Bacino della Basilicata (AdB Basilicata). Le complesse caratteristiche morfologiche del bacino hanno costretto l'AdB Basilicata ad utilizzare sia modelli idraulici monodimensionali (1D) che bidimensionali (2D). I primi sono stati utilizzati per la propagazione delle portate lungo il canale principale, mentre, al fine di ridurre gli sforzi computazionali, l'applicazione del modello 2D è stata limitata alla porzione del bacino prossima alla foce (circa 80 km²) caratterizzata da superfici estremamente pianeggianti. I modelli bidimensionali, infatti, sono molto utili nella descrizione di piene in aree vaste e pianeggianti, dove non è possibile ipotizzare a priori una direzione principale di propagazione dei volumi esondati. Tuttavia, questi modelli sono più gravosi dal punto di vista computazionale e per questo motivo la loro applicazione è generalmente limitata a porzioni di bacino. Nello specifico, l'individuazione delle aree inondabili lungo il canale principale per un assegnato periodo di ritorno è avvenuta mediante l'uso del modello HEC-RAS (HEC-RAS, 2010), mentre il tratto terminale della foce è stato studiato utilizzando un approccio bidimensionale. Entrambe le mappe sono state ottenute utilizzando un idrogramma sintetico derivato da analisi regionali assumendo un periodo di ritorno pari a 30 anni. La portata al colmo di piena è stata calcolata utilizzando la metodologia VAPI (Claps et al., 1999), mentre l'idrogramma sintetico è stato dedotto dalle curve di riduzione dei colmi di piena proposte dal NERC (1975) e modificate da Fiorentino & Margiotta (1999).

È necessario sottolineare che gli studi dell'AdB Basilicata si riferiscono soltanto ai corsi d'acqua principali, mentre i reticoli secondari non sono stati analizzati. Pertanto, è molto utile avere uno strumento in grado di fornire un'ampia caratterizzazione del pericolo di inondazione sull'intera rete fluviale. Con questo obiettivo si è sperimentato l'uso di classificatori binari che sfruttano le due diverse mappe, ma differiscono per scala di rappresentazione, risoluzione del DEM e metodologia adottata per la mappatura delle aree inondabili.

Il modello monodimensionale HEC-RAS è un software ampiamente utilizzato e ben documentato sulla pagina web dell'US Army Corps of Engineers (<http://www.hec.usace.army.mil>). Il modello idraulico bidimensionale denominato FLORA-2D (FLOOD and Roughness Analysis) è stato recentemente implementato da Cantisani et al. (2012, 2014). FLORA-2D è un modello capace di computare la variazione sia spaziale che temporale del coefficiente di resistenza al moto offerto dalla vegetazione. Ogni cella del dominio di calcolo ha un coefficiente di scabrezza a seconda del tipo di vegetazione presente, dell'altezza d'acqua e della velocità. In particolare, il modello consente di calcolare il coefficiente di scabrezza n di Manning distinguendo tra vegetazione rigida e flessibile risolvendo l'equazione di Petryk e Bosmajian (1975) nel primo caso e quella di Freeman et al. (2000) nel secondo. Per la vegetazione flessibile è altresì possibile distinguere la condizione di totale sommersione da quella di parziale sommersione. L'algoritmo generale che disciplina la propagazione delle piene si basa sulle "equazioni delle acque basse" semplificate trascurando i termini convettivi.

3.2 Modelli digitali di elevazione

I modelli digitali di elevazione (DEM) contengono una notevole quantità di informazioni che possono essere utili per la delimitazione delle aree inondabili. Nel presente caso, come base informativa per l'intero bacino idrografico sono stati utilizzati DEM derivati da USGS HydroSHEDS (hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php) reperibili gratuitamente per quasi l'intero globo a diverse risoluzioni spaziali. Invece, per l'area in corrispondenza della foce si è utilizzato un DEM ad alta risoluzione derivato da un rilievo LiDAR.

La figura 1 fornisce una descrizione dell'area investigata. In particolare, la figura 1A descrive il modello digitale di elevazione del bacino del fiume Bradano estratto dai dati HydroSHEDS (SRTM DEM), mentre la figura 1B mostra il modello digitale di elevazione nella parte valliva del medesimo bacino (chiamato DEM LiDAR), ottenuto da un rilievo ad alta risoluzione e campionato mediante una griglia 10m x 10m.

I DEM HydroSHEDS sono derivati da dati di quota telerilevati durante la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) della NASA e poi condizionati utilizzando una sequenza di procedure automatizzate. Tra i prodotti resi disponibili da HydroSHEDS sono stati utilizzati il DEM-VOID, ottenuto dalla correzione dei dati SRTM originali attraverso il riempimento dei valori no-data e la rimo-

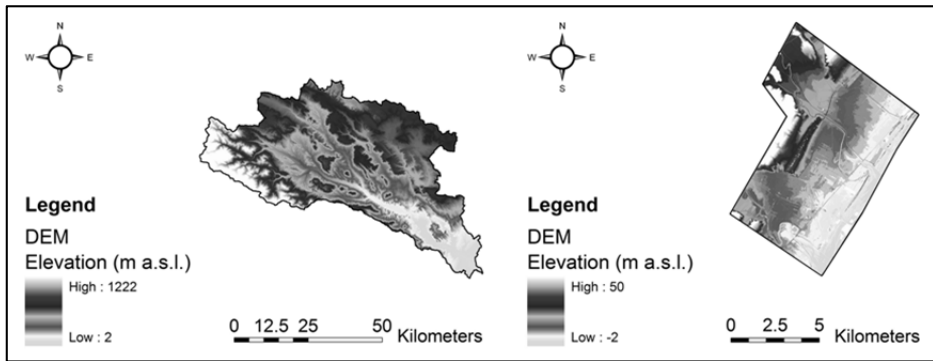


Fig. 1 - A) SRTM DEM dell'intero bacino del fiume Bradano. B) DEM LiDAR dell'area in prossimità della foce del fiume Bradano

delle principali incongruenze nei valori di quota, ed inoltre il DEM-CON condizionato per applicazioni idrologiche in modo da riprodurre fedelmente il reale reticolo idrografico. Il processo di condizionamento altera i dati di quota effettivi e questo limita l'uso del DEM-CON alla procedura di identificazione della rete di drenaggio. Entrambi i DEM citati sono stati utilizzati per il fiume Bradano, con una risoluzione di 3 arco-secondi che corrisponde, per l'area di studio, ad una griglia quadrata di risoluzione pari a circa 90m.

Il DEM ad alta risoluzione, invece, è stato ottenuto combinando un rilievo aereo LiDAR e rilievi in situ, entrambi effettuati per conto dell'AdB Basilicata, prestando particolare attenzione alla posizione e alla quota dei rilevati arginali. Il rilievo laser originale presentava una densità di punti pari a 0,7 punti/m².

La figura 2 fornisce una rappresentazione delle aree inondabili standard utilizzate come riferimento per l'applicazione della classificazione binaria lineare. In particolare, la figura 2A mostra le aree inondabili ottenute attraverso un approccio monodimensionale sull'intero fiume Bradano, invece la figura 2B fornisce una rappresentazione delle aree inondabili individuate mediante l'applicazione del modello FLORA-2D nell'area prossima alla foce del Bradano.

3.3 Classificatori binari lineari e ROC

Le tecniche di classificazione vengono utilizzate per confrontare caratteristiche morfologiche quantitative derivate dai DEM e mappe di pericolosità idraulica esistenti. I classificatori binari lineari rappresentano un utile strumento per questo scopo, permettendo un confronto quantitativo tra due mappe binarie. Nello specifico, le aree inondate sono facilmente convertite in mappe binarie assegnando ad esse il codice 1 e alle aree con pericolo marginale il codice 0. Il confronto con le caratteristiche morfologiche è possibile imponendo un valore di soglia che serve a distinguere tra i due possibili valori della mappa. In tale schema, il valore di soglia diventa un parametro che può essere modificato al fine di ottimizzare le prestazioni di ogni descrittore.

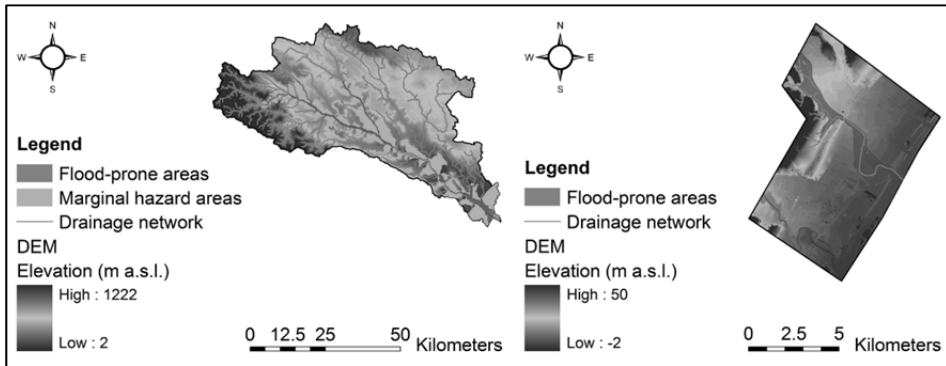


Fig. 2 - A) Aree inondabili ottenute attraverso l'utilizzo del modello monodimensionale sull'intero fiume Bradano. B) Aree inondabili individuate mediante l'applicazione del modello FLORA-2D nell'area prossima alla foce del Bradano

I classificatori binari devono essere addestrati. Per questo motivo, le aree individuate come inondate dai modelli idraulici vengono utilizzate per calibrare la soglia ottimale che permetta di distinguere le aree inondabili per ogni caratteristica selezionata.

Le caratteristiche morfologiche semplici e composite sono scalate in caratteristiche normalizzate comprese tra -1 e 1. Diverse soglie normalizzate vengono applicate a ciascun descrittore normalizzato, ottenendo una mappa binaria di 0 e 1. Confrontando questa mappa con quella delle aree inondabili ottenute dal modello idraulico, ci sono quattro possibili condizioni in ogni punto della mappa: se la soglia rileva una zona allagata quando questa condizione è presente, il punto viene conteggiato come vero positivo; altrimenti, se si classifica il punto come non inondato (negativo), è considerato come un falso negativo. Se il punto è definito non inondato dalla mappa ed è classificato come negativo, viene considerato come un vero negativo; altrimenti, se è classificato come positivo, è considerato come un falso positivo.

La qualità di ogni classificatore binario è valutata utilizzando le *Receiver Operating Characteristic* (ROC) *curves* che rappresentano una buona misura di performance. I grafici ROC sono ottenuti variando iterativamente la soglia del classificatore e sono definiti come l'insieme delle coppie di tasso di veri positivi (tracciato sull'asse Y) e tasso di falsi positivi (tracciato sull'asse X). Le curve ROC sono anche utilizzate per individuare il valore di soglia ottimale (Fawcett, 2006).

Si ricorda che il tasso di veri positivi è stimato come:

$$r_{ip} \approx \frac{\text{positivi classificati correttamente}}{\text{positivi totali}} \quad (1)$$

Il tasso di falsi positivi del classificatore è:

$$r_{fp} \approx \frac{\text{negativi classificati non correttamente}}{\text{negativi totali}} \quad (2)$$

La retta $y = x$ individua il comportamento di un classificatore casuale. Qualsiasi classificatore che appare nel triangolo in alto a sinistra si comporta meglio di un classificatore casuale. Il miglior valore della soglia normalizzata è ottenuto minimizzando la somma del tasso di falsi positivi e del tasso di falsi negativi $r_{fp} + (1 - r_{tp})$ assegnando pesi uguali alle due aliquote.

Al fine di confrontare i diversi tipi di classificatori binari, un metodo comune per ridurre le prestazioni delle ROC ad un singolo valore scalare è quello di calcolare l'area (AUC) sotto la curva ROC. Il range dei valori della AUC va da 0,5 (classificatore completamente casuale) a 1.0 (classificatore perfettamente discriminante).

3.3.1 Caratteristiche morfologiche singole

In questo paragrafo si fornisce una descrizione sintetica delle caratteristiche morfologiche derivate dal DEM e adottate nel presente studio. Tra tutte le caratteristiche possibili abbiamo preso in considerazione le stesse adottate da Degiorgis et al. (2012):

1. l'area contribuyente a monte, A_s [m^2];
2. la curvatura della superficie, $\nabla^2 H$ [-], definita come il Laplaciano della quota;
3. la pendenza locale S [-], stimata come la pendenza massima tra le otto possibili direzioni di flusso che collegano la cella in esame alle celle adiacenti;
4. la distanza dal reticolo più vicino, D [m], definita come la lunghezza del percorso che connette idrologicamente il punto in esame con l'elemento più vicino della rete idrografica;
5. la differenza di quota dal reticolo più vicino, H [m], calcolata come differenza di quota tra il punto in esame e il punto finale del percorso precedentemente menzionato.

3.3.2 Indici morfologici compositi

In aggiunta alle caratteristiche sopra elencate, sono state utilizzate anche una serie di indici compositi. Alcuni di questi indici provengono dalla letteratura, mentre altri sono stati definiti allo scopo di descrivere la distanza relativa tra la superficie dell'acqua durante una piena e la quota locale (Manfreda et al., 2014b). In particolare, sono stati adottati gli indici qui di seguito elencati:

- l'indice topografico modificato, TI_m , introdotto da Kirkby (1975), ha dimostrato di essere un buon indicatore per la delimitazione delle aree inondabili (Manfreda et al., 2011). Esso assume la forma:

$$TI_m = \ln \left(\frac{A_d^n}{\tan(\beta)} \right) \quad (3)$$

dove A_d [m] è l'area drenata per unità di lunghezza, $\tan(\beta)$ è il gradiente locale, n è un esponente <1 .

- il downslope index, DW_i proposto da Hjerdt et al. (2004) rappresenta un nuovo modo di stimare il gradiente idraulico. Il metodo non utilizza come riferimento il punto di uscita del corso d'acqua, ma calcola quanto lontano (L_d [m]) una particella di acqua deve viaggiare lungo il suo percorso di deflusso affinché perda una certa quantità di energia potenziale (d [m]). Questo indice è definito come:

$$\tan(\alpha_d) = \frac{d}{L_d} \quad (4)$$

dove d nel presente caso è stato posto uguale a 5 m.

- H/D : si ottiene calcolando il rapporto tra la distanza D e la differenza di quota H .
- $\ln[h(A_s)/H]$: questo indice si propone di confrontare in ogni punto del bacino una altezza d'acqua variabile h con la differenza di quota H , dove h è calcolato per ciascuna cella del bacino in funzione dell'area contribuyente (A_s) utilizzando la seguente relazione idraulica di scala:

$$h(A_s) \approx A_s^n \quad (5)$$

dove h è l'altezza d'acqua [m], A_s è l'area contribuyente a monte [m^2], n è l'esponente (adimensionale) fissato pari al 0,3 (Nardi et al., 2006).

- $\ln[h(A_r)/H]$: questo indice è simile al precedente, ma in questo caso h è calcolato in funzione dell'area contribuyente A_r nella sezione del reticolo idrografico idrologicamente connessa al punto in esame (vedi Fig. 3).
- $[h(A_r)-H]/\tan(\alpha_d)$: questo indice ha lo scopo di descrivere, in ogni punto del bacino indagato, la differenza tra l'altezza $h(A_r)$ e il valore H , divisa per un surrogato del gradiente idraulico rappresentato dal downslope index.
- $[h(A_r)-H]/D$: questo indice ha lo scopo di descrivere, in ogni punto del bacino indagato, la differenza tra l'altezza $h(A_r)$ e il valore H , divisa per la distanza D .

Tutti gli indici e le caratteristiche sono normalizzati per assumere un valore compreso tra -1 e 1.

Tale lista di indici è stata sviluppata dagli autori con il preciso scopo di identificare una metrica idraulica in grado di spiegare le caratteristiche principali che influenzano il processo di inondazione. Questi indici sono stati testati anche sul Tevere da Manfreda et al. (2014b).

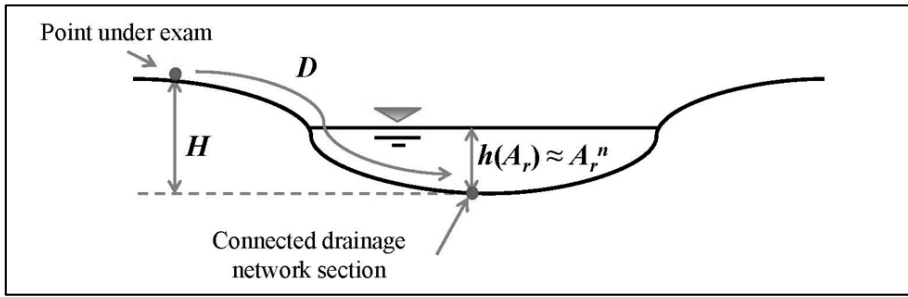


Fig. 3 - Esempio di sezione trasversale con descrizione dei parametri H e h

4. Risultati e discussione

Tutte le caratteristiche e gli indici compositi suggeriti sono stati utilizzati per esplorare la loro capacità individuale nel descrivere la pericolosità idraulica nel bacino del fiume Bradano. Date le forti differenze morfologiche esistenti tra la quasi totalità del corso d'acqua principale e la sua parte terminale, è estremamente interessante confrontare le prestazioni degli indici applicati sulle due aree.

Le figure 4 e 5 mostrano rispettivamente le curve ROC ottenute per ogni caratteristica nell'area di studio investigata per i due insiemi di dati precedentemente introdotti. Nella figura 4, le curve ROC sono ottenute confrontando le mappe ottenute dai classificatori morfologici con la mappa delle aree inondabili del Bradano derivata da un modello idraulico 1-D, mentre in figura 5 confrontando le mappe ottenute dai classificatori morfologici con la mappa delle aree inondabili dell'area costiera valutata utilizzando un modello idraulico 2-D. Generalmente, i parametri migliori sono quelle che massimizzano l'area al di sotto della curva ROC.

Il confronto visivo tra tutte le curve ROC mette in evidenza il potenziale di ogni caratteristica morfologica o di ogni indice nell'individuare le aree inondabili in diversi contesti. Il confronto incrociato dei quattro grafici presentati nelle figure 4 e 5 permettono di affermare che:

- i. tra tutte le caratteristiche singole considerate, quelle che forniscono prestazioni migliori sono la differenza di quota tra il punto considerato e la sorgente di pericolo (H), e la distanza dal reticolo più vicino (D). Infatti, la curva ROC di tali caratteristiche ha un grande AUC nella prima area (Fig. 4A).
- ii. il comportamento delle caratteristiche singole è diverso nei due casi di studio considerati. In particolare, essi subiscono una riduzione significativa delle loro prestazioni quando sono applicati alla zona più pianeggiante del bacino (Fig. 5A).
- iii. tra gli indici sintetici, i migliori risultati si ottengono con gli indici $\ln[h(A_s)/H]$ e $\ln[h(A_r)/H]$ per l'area in cui è stato applicato il modello idraulico monodimensionale e con gli indici $\ln[h(A_r)/H]$ e $[h(A_r)-H]/D$ per l'area in cui è stato applicato il modello bidimensionale (vedere Figg. 4B e 5B).

iv. l'indice composito $\ln[h(A_r)/H]$ offre prestazioni analoghe nelle due aree di studio qui considerate e sembra quindi il più utilizzabili tra tutti i descrittori investigati.

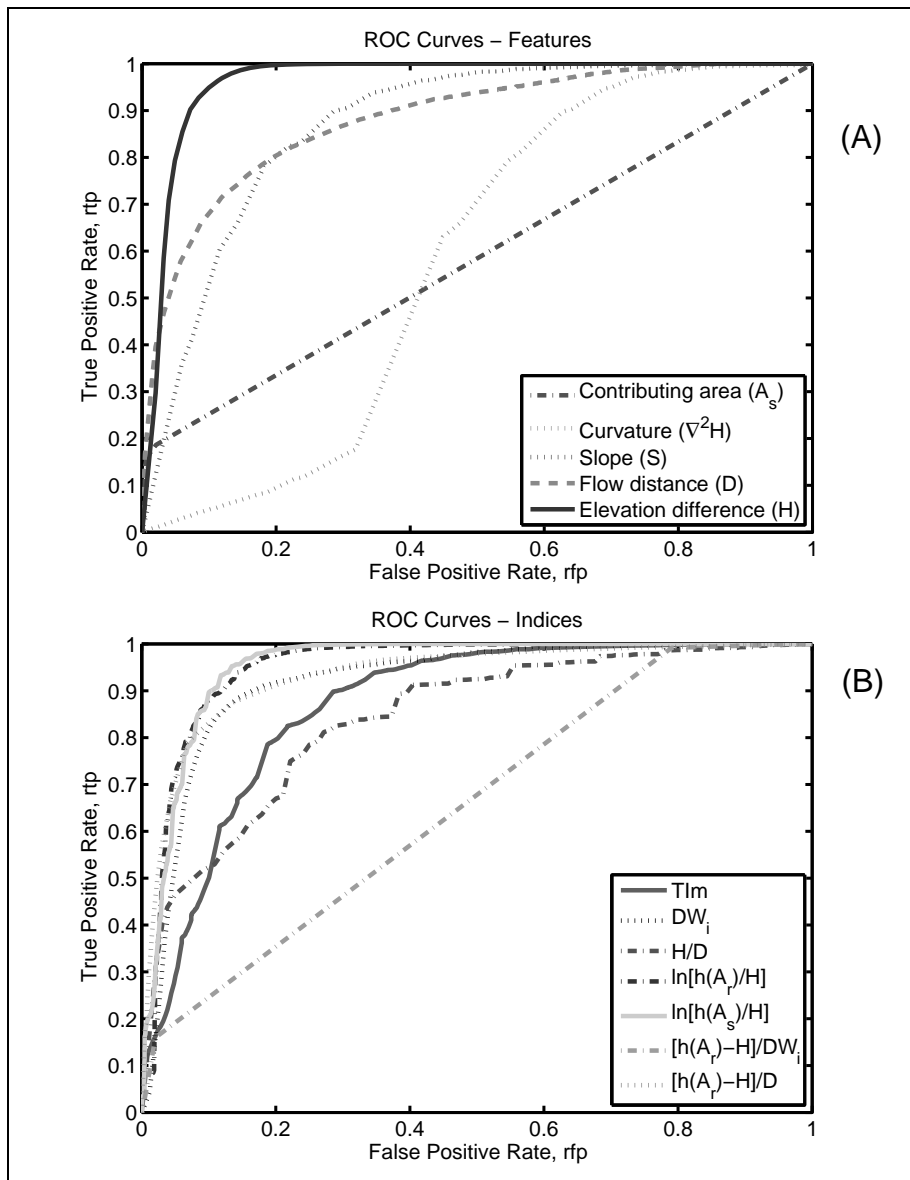


Fig. 4 – Curve ROC delle caratteristiche locali (A) e degli indici compositi (B) ottenute confrontando tali parametri con le aree inondabili del Bradano individuate utilizzando un modello idraulico 1-D

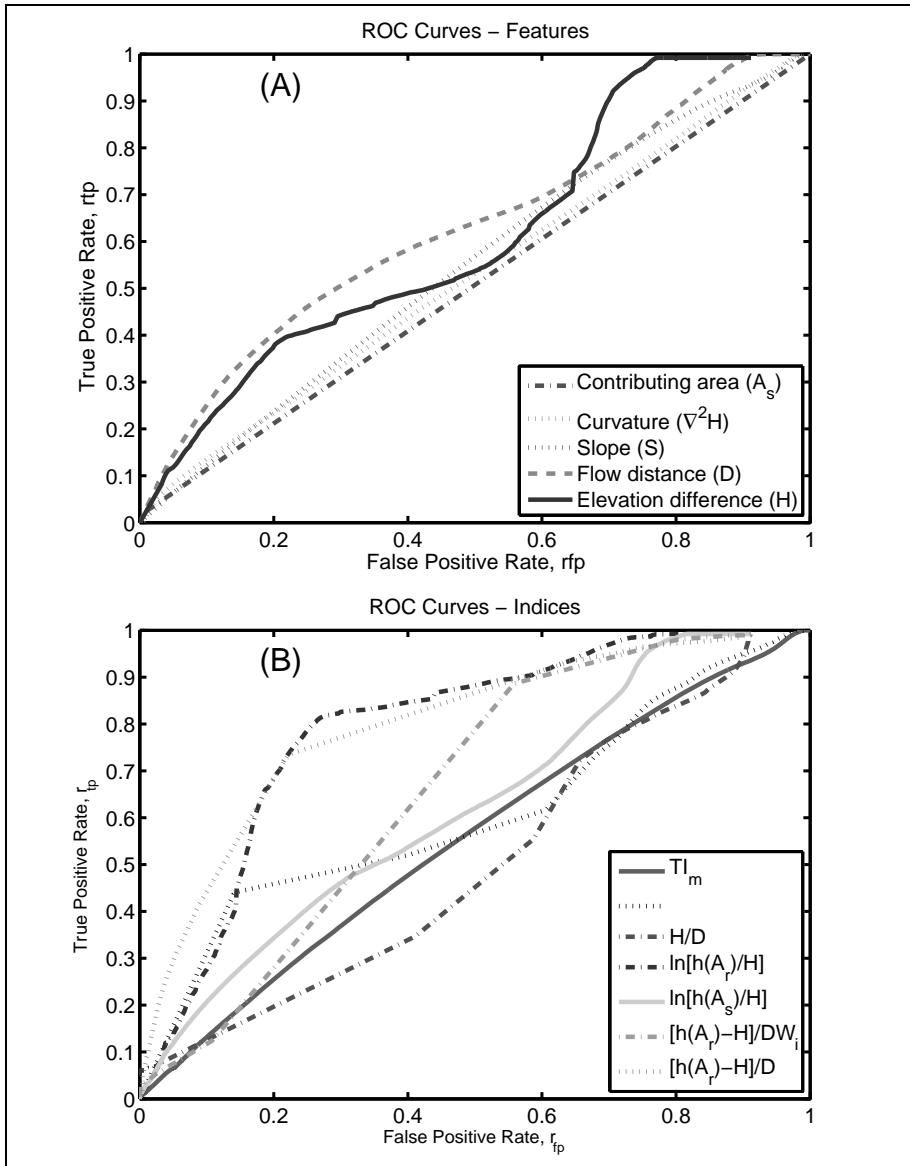


Fig. 5 – Curve ROC delle caratteristiche locali (A) e degli indici compositi (B) ottenute confrontando tali parametri con le aree inondabili della zona prossima alla foce del Bradano individuate utilizzando un modello idraulico 2-D

È interessante sottolineare che le caratteristiche semplici diventano meno sensibili nel caso di aree pianeggianti e anche l'utilizzo di H e D, che nella prima applicazione appaiono adatti per la mappatura delle aree inondabili, sembra fallire in tali aree. Ciò è certamente dovuto alla complessità morfologica

dell'area che probabilmente non può essere caratterizzata attraverso metriche semplici. Di contro, l'indice composito $\ln[h(A_r)/H]$ è in grado di riprodurre con un buon adattamento la mappa delle aree inondabili sia nell'area pianeggiante che nell'intero bacino.

Al fine di fornire una descrizione quantitativa dell'affidabilità di ogni classificatore, nelle tabelle 1 e 2 sono riassunte le performance di ogni descrittore, calcolate per un valore di soglia ottimale, considerando la scala di bacino e la scala locale. I valori di soglia ottimali sono stati individuati minimizzando la somma del tasso di falsi positivi e del tasso di falsi negativi $r_{fp} + (1 - r_{tp})$. In particolare, le tabelle 1 e 2 forniscono le seguenti informazioni: i valori della soglia ottimale normalizzata τ , il tasso di falsi positivi r_{fp} , il tasso di veri positivi r_{tp} , la somma degli errori $r_{fp} + (1 - r_{tp})$ e l'area sottesa alla curva (AUC) per ciascuna delle caratteristiche presentate per il bacino del fiume Bradano.

I risultati mostrano che l'indice $\ln[h(A_r)/H]$ offre le migliori prestazioni in entrambi i casi presi in considerazione. Inoltre, è evidente che le soglie identificate per questo indice sono simili per le due aree, mentre altre caratteristiche o indici mostrano una grande variabilità sia di valori di soglia sia in termini di prestazioni. Questo risultato è particolarmente significativo se si considera la differenza di scala dei due DEM e i diversi modelli idraulici adottati per la calibrazione. Ciò può essere in qualche modo dovuto al fatto che questo indice è in grado di interpretare meglio il processo di inondazione e pertanto risulta meno influenzata dalla dimensione e dalle caratteristiche morfologiche dell'area di studio. Tutto ciò dovrebbe essere indagato in ulteriori casi di studio, ma risulta

Intero bacino del Bradano – Modello idraulico 1D					
Caratteristiche semplici	τ	r_{fp}	r_{tp}	$r_{fp}+(1-r_{tp})$	AUC
A_s	-0.999	0.021	0.186	0.834	0.584
D	-0.928	0.178	0.784	0.395	0.882
$\nabla^2 H$	0.051	0.627	0.897	0.730	0.578
H	-0.960	0.113	0.963	0.150	0.964
S	-0.956	0.286	0.898	0.388	0.870
Indici	τ	r_{fp}	r_{tp}	$r_{fp}+(1-r_{tp})$	AUC
TI_m	-0.235	0.286	0.899	0.387	0.869
DW_i	-0.980	0.142	0.883	0.259	0.919
H/D	-0.974	0.272	0.812	0.460	0.841
$\ln[h(A_r)/H]$	-0.422	0.143	0.939	0.204	0.950
$\ln[h(A_s)/H]$	-0.612	0.134	0.953	0.182	0.953
$[h(A_r)-H]/DW_i$	-0.991	0.790	0.992	0.799	0.654
$[h(A_r)-H]/D$	0.818	0.133	0.874	0.259	0.933

Tab.1 – Risultati dei classificatori binari lineari per il bacino del fiume Bradano: soglia ottimale normalizzata τ , tasso di falsi positivi r_{fp} , tasso di veri positivi r_{tp} , somma $r_{fp} + (1 - r_{tp})$ e l'area sottesa alla curva AUC per ogni descrittore. Le migliori caratteristiche performanti sono evidenziate in grassetto

Foce del Bradano – Modello idraulico 2D					
Caratteristiche semplici	τ	r_{fp}	r_{tp}	$r_{fp}+(1-r_{tp})$	AUC
As	-0.991	0.000	0.015	0.985	0.507
D	-0.842	0.247	0.458	0.789	0.625
$\nabla^2 H$	0.330	0.421	0.458	0.963	0.527
H	-0.574	0.768	0.990	0.778	0.609
S	-0.986	0.644	0.719	0.926	0.548
Indici	τ	r_{fp}	r_{tp}	$r_{fp}+(1-r_{tp})$	AUC
TI_m	-0.139	0.453	0.531	0.922	0.555
DW_i	0.000	0.142	0.441	0.701	0.609
H/D	-0.755	0.911	0.992	0.919	0.505
$\ln[h(A_r)/H]$	-0.423	0.267	0.811	0.456	0.791
$\ln[h(A_s)/H]$	-0.809	0.759	0.956	0.803	0.623
$[h(A_r)-H]/DW_i$	-0.068	0.558	0.886	0.672	0.659
$[h(A_r)-H]/D$	0.471	0.221	0.734	0.487	0.798

Tab. 2 – Risultati dei classificatori binari lineari per l'area prossima alla foce del fiume Bradano: soglia ottimale normalizzata τ , tasso di falsi positivi r_{fp} , tasso di veri positivi r_{tp} , somma $r_{fp} + (1 - r_{tp})$ e l'area sottesa alla curva AUC per ogni descrittore. Le migliori caratteristiche performanti sono evidenziate in grassetto

estremamente interessante se confermato, perché mostrerebbe il grande vantaggio di questa metodologia, che potrebbe consentire di estendere la mappatura delle aree a inondabili su vaste aree partendo dallo studio di una piccola porzione del bacino ed utilizzando per la calibrazione qualsiasi tipologia di modello idraulico.

Al fine di fornire un esempio visivo dell'utilizzo dei classificatori lineari, si riporta il risultato dell'applicazione della procedura al bacino del fiume Bradano in figura 6A e B, nella quale sono state identificate le zone del bacino che hanno un valore dell'indice $\ln[h(A_r)/H]$ al di sopra della soglia calibrata. In tal modo la mappatura delle aree inondabili è stata estesa a tutti gli affluenti del Bradano che può essere utile per la pianificazione su larga scala.

5. Conclusioni

Il presente studio analizza il ruolo di diversi descrittori morfologici per l'individuazione delle aree inondabili sul bacino del fiume Bradano. In particolare, le prestazioni delle caratteristiche proposte sono valutate utilizzando classificatori binari lineari e l'analisi delle ROC curves su due diverse scale di applicazione: la scala di bacino, utilizzando per il confronto una mappa ricavata attraverso una simulazione monodimensionale, e l'area più pianeggiante della foce dello stesso bacino, utilizzando una mappa delle aree inondabili realizzata con un modello bidimensionale (FLORA-2D). Riguardo le caratteristiche locali, i

migliori risultati si ottengono con il dislivello tra il punto considerato e la sorgente di pericolo (H), e con la distanza dal reticolo più vicino, (D); invece, tra gli indici compositi, quelli più performanti sono $\ln[h(A_s)/H]$ e $\ln[h(A_r)/H]$. In particolare, quest'ultimo sembra essere meno sensibile alla variazione di risoluzione del DEM e alla diversa topografia dell'area di studio. Esso fornisce, inoltre, una rappresentazione affidabile delle aree inondabili anche nel caso di aree pianeggianti, in cui gli altri indici o le altre caratteristiche mostrano di essere meno affidabili. I risultati di questo studio sono particolarmente promettenti, soprattutto se si considera il numero di modifiche artificiali che caratterizzano il fiume Bradano.

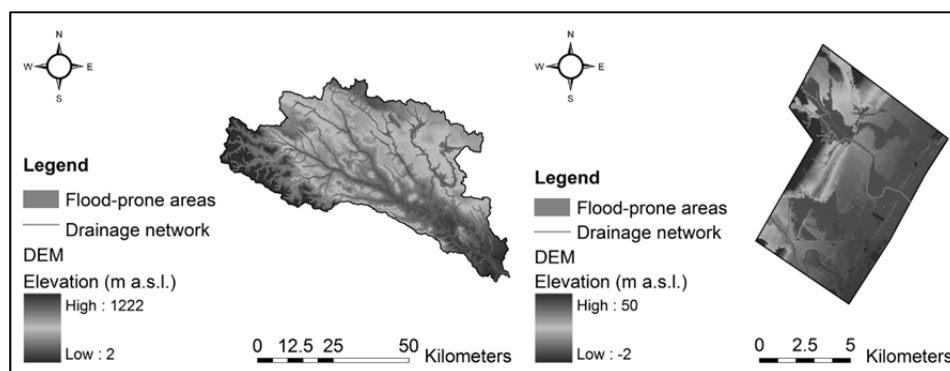


Fig. 6 – A) Aree inondabili del fiume Bradano ottenute utilizzando i classificatori binari lineari basati sull'indice $\ln(h(A_s)/H)$ applicato sull'intero bacino (A) e sull'area prossima alla foce (B)

Bibliografia

1. Cannon T (1994) - *Vulnerability analysis and the explanation of "natural" disasters* - in A. Varley (ed.) *Disasters, development and the environment*, Chichester: John Wiley
2. Cantisani A (2012) - *Monitoraggio e modellazione per la protezione dal rischio idraulico in aree pianeggianti mediante lo sviluppo e l'applicazione di modelli bi-dimensionali e l'utilizzo di strumenti GIS Open Source* - Università della Basilicata
3. Cantisani A, Giosa L, Mancusi L, Sole A, (2014) - *FLORA-2D: A New Model to Simulate the Inundation in Areas Covered by Flexible and Rigid Vegetation* - International Journal of Engineering and Innovative Technology, 3(8), 179-186
4. Ceola S, Laio F, Montanari A, (2014) - *Satellite nighttime lights reveal increasing human exposure to floods worldwide* - Geophysical Research Letters, 41(20), 7184-7190
5. Claps P, Fiorentino M. (1999) - *Rapporto di sintesi sulla valutazione delle piene in Italia* – Guida Operativa all'applicazione dei rapporti regionali sulla valutazione delle piene in Italia, Linea 1 Previsione e Prevenzione degli eventi idrologici estremi. CNR – GNDICI Roma

6. De Risi R., Jalayer F., De Paola F. and Giugni M. (2014) - *Probabilistic delineation of flood-prone areas based on a digital elevation model and the extent of historical flooding: the case of Ouagadougou* - *Boletín Geológico y Minero*, 125 (3): 329-340
7. Degiorgis M, Gnecco G, Gorni S, Roth G, Sanguineti M, Taramasso AC (2012) - *Classifiers for the detection of flood-prone areas using remote sensed elevation data* - *J. Hydrol.*, 470-471, 302–315
8. Douglas I, Alam K, Maghenda M, McDonnell Y, Mclean L and Campbell J, (2008) - *Unjust waters: climate change, flooding and the urban poor in Africa* - *Environment and Urbanization* 20: 187
9. Fawcett T (2006) - *An introduction to ROC analysis* - *Pattern Recognit. Lett.* 27, 861–874
10. Fiorentino M, Manfreda S, Iacobellis V (2007) - *Peak Runoff Contributing Area as Hydrological Signature of the Probability Distribution of Floods* - *Adv. Water Resour.*, 30(10), 2123-2134
11. Fiorentino M, Margiotta MR (1999) - *La valutazione dei volumi di piena ed il calcolo semplificato dell'effetto di laminazione di grandi invasi* - *Atti del 19° corso di aggiornamento su "Tecniche per la difesa dall'inquinamento*, G. Frega (a cura di), Editoriale Bios, Cosenza, 203-222
12. Freeman GE, Rahmeyer W, Copeland R R (2000) - *Determination of Resistance Due to Shrubs and Woody Vegetation*, *Coastal and Hydraulics Laboratory* - ERDC/CHL TR-00-25, U.S. Army Engineer
13. HEC-RAS 4.1: *Reference Manual* su: http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf
14. Hjerdt KN, McDonnell JJ, Seibert J, Rodhe A (2004) - *A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage* - *Water Resour. Res.*, 40, W05
15. Jalayer F, De Risi R, De Paola F, et al. (2014) - *Probabilistic GIS-based method for delineation of urban flooding risk hotspots* - *Natural Hazards*, ISSN: 0921030X, DOI: 10.1007/s11069-014-1119-2
16. Kirkby MJ (1975) - *Hydrograph modelling strategies* - *Progress Phys. Hum. Geogr.*, 69–90
17. Manfreda S, Di Leo M, Sole A (2011) - *Detection of Flood Prone Areas using Digital Elevation Models* - *J. Hydrol. Eng.*, 16(10), 781-790
18. Manfreda S, Nardi F, Samela C, Grimaldi S, Taramasso AC, Roth G and Sole A, (2014a) - *Investigation on the Use of Geomorphic Approaches for the Delineation of Flood Prone Areas* *J. Hydrol.*, 517, 863-876
19. Manfreda S, Samela C, Sole A, and Fiorentino M (2014b) - *Flood-Prone Areas Assessment Using Linear Binary Classifiers based on Morphological Indices* - *Vulnerability, Uncertainty, and Risk: 2002-2011*
20. Milly PCD, Wetherald RT, Dunne KA, Delworth TL (2002) - *Increasing risk of great floods in a changing climate* - *Nature*, 415, 514-517
21. Nardi F, Vivoni ER, Grimaldi S (2006) - *Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method* - *Water Resour. Res.*, 42, W09409
22. Papaioannou G, Vasiliades L, Loukas A (2014) - *Multi-Criteria Analysis Framework for Potential Flood Prone Areas Mapping* - *J Water Resources Management*, Springer Netherlands, <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0817-6>

23. Petryk S, Bosmajian G B (1975) - *Analysis of flow through vegetation, Journal of the Hydraulics Division* - ASCE, 101(7): 871-884
24. Prudhomme C, Reynard N and Crooks S (2002) - *Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now?* - *Hydrol. Process.* 16, 1137–1150