



Università degli Studi della Basilicata

Scuola di Dottorato di Ricerca

Dottorato di Ricerca in:

“Metodi e Tecnologie per il Monitoraggio Ambientale”

TITOLO DELLA TESI

“Monitoraggio e modellazione per la protezione dal rischio idraulico in aree pianeggianti mediante lo sviluppo e l’applicazione di modelli bidimensionali e l’utilizzo di strumenti GIS Open Source”

Settore Scientifico Disciplinare

“ICAR/02”

Coordinatore del Dottorato:

Prof. Ing. Aurelia Sole

Dottorando:

Dott. Ing. Andrea Cantisani

Tutori:

Prof. Ing. Aurelia Sole

Prof. Ing. Angela Celeste Taramasso

Dott. Ing. Leonardo Mancusi

Dott. Ing. Luciana Giosa

Indice

Introduzione	1
1. Stato dell'arte	4
1.1. Influenza della vegetazione sulla resistenza al moto	4
1.2. Determinazione del coefficiente di scabrezza in presenza di vegetazione rigida	8
1.3. Determinazione del coefficiente di scabrezza in presenza di vegetazione flessibile	10
1.4. Applicazione sulla distribuzione della portata in canali a differente vegetazione	13
2. Il modello FLORA-2D	21
2.1. Introduzione	21
2.2. Le equazioni utilizzate	23
2.3. La discretizzazione numerica	25
2.4. L'equazione risolvente	26
2.5. Il trattamento degli argini	30
2.6. Le componenti del modello	34
3. Strumenti GIS Open Source	46
3.1. Introduzione	46
3.2. Il software open source o software libero	46
3.3. I GIS open source	49
3.4. Il software Quantum GIS	51
4. L'area di studio	55
4.1. Introduzione	55
4.2. Il fiume Bradano	58
4.3. Il Bradano a valle della S.S. 106 Jonica	60
4.4. Il rilievo laser scan effettuato lungo la costa jonica lucana	63
4.5. La vulnerabilità idraulica nel tratto vallivo del fiume Bradano	66
4.6. L'evento di piena del 1 marzo 2011	72
4.7. La caratterizzazione della vegetazione alla foce del fiume Bradano	74
5. L'analisi idrologica	81
5.1. Introduzione	81
5.2. Il modello afflussi-deflussi AD2	82

5.3. Il calcolo della propagazione delle portate attraverso il metodo di Muskingum _____	86
6. L'applicazione e la validazione del modello _____	94
6.1. Introduzione _____	94
6.2. Dominio di calcolo _____	95
6.3. Risultati della simulazione e confronto con il caso reale _____	101
6.4. Considerazioni sulla variazione temporale della scabrezza _____	106
Conclusioni e sviluppi futuri _____	110
Bibliografia _____	115
Ringraziamenti _____	121

Introduzione

La valutazione delle aree a rischio di inondazione rappresenta un problema di grande complessità viste le incertezze di determinazione dovute alle semplificazioni che necessariamente la accompagnano. L'individuazione del rischio di inondazione in aree fortemente pianeggianti è ancor di più difficoltosa dal momento che la modesta pendenza del terreno non consente un'accurata e precisa determinazione delle porzioni di territorio inondabili.

Tra i fattori che influenzano l'estensione delle aree inondabili e i tiranti che si raggiungono durante un'inondazione vi è sicuramente la resistenza al moto offerta dalla vegetazione presente. La vegetazione può essere presente nei corsi d'acqua e nelle aree golenali in modo estremamente vario passando da erbacea, ad arbustiva e ad arborea e la resistenza che essa offre dipende dalle sue proprietà biomeccaniche (rigidezza), dalla sua struttura (densità, diametri, altezze, ecc.) e dalle caratteristiche della corrente. Inoltre, anche all'interno della stessa specie, si possono osservare resistenze diverse in funzione del grado di sommersione.

Il presente lavoro mira a costruire un modello di simulazione idraulica capace di stimare le aree a rischio di inondazione tenendo in conto l'influenza della vegetazione sulla resistenza al moto. Sebbene durante un'inondazione la resistenza offerta dalle piante vari in funzione dell'altezza d'acqua raggiunta, i modelli di simulazione delle inondazioni, commerciali e non, più utilizzati considerano generalmente un valore della

resistenza al moto costante nel tempo. Nell'ambito della collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente (DIFA) dell'Università degli Studi della Basilicata e la società di ricerca RSE (Ricerca sul Sistema Energetico), invece, si è voluto sperimentare la possibilità di implementare un codice numerico bidimensionale in grado di calcolare la resistenza al moto, istante per istante, in funzione dell'altezza idrica. Il modello implementato è stato denominato FLORA-2D (FLOOD and Roughness Analysis) e l'intento finale è quello di rendere tale modello di libero utilizzo.

La metodologia di riferimento per il codice idrodinamico è quella proposta da Molinaro et al. (1994) mentre le formule adottate per il calcolo dell'influenza della vegetazione sulla resistenza al moto sono state tratte dalla letteratura. Per quanto riguarda la presenza di vegetazione rigida si è fatto riferimento alla teoria di Petryk e Bosmajian (1975), secondo la quale il coefficiente di scabrezza di Manning varia con la cosiddetta densità di vegetazione. Per la valutazione della scabrezza prodotta dalla vegetazione flessibile si è invece considerato il metodo proposto da Freeman et al., secondo il quale la resistenza al moto dipende da quattro diversi parametri: il rapporto tra la forza della corrente e la resistenza meccanica offerta dalla pianta, il livello di sommersione, la densità di vegetazione e il numero di Reynolds.

L'area di studio in cui è stata sperimentata la metodologia è la costa jonica della Basilicata in corrispondenza della foce del fiume Bradano e la caratterizzazione della sua copertura vegetale è stata realizzata a partire dalle informazioni desunte da rilievi laser-scan ed aerofotogrammetria digitale.

La ricerca condotta ha portato alla caratterizzazione dettagliata della copertura vegetale della pianura costiera, all'implementazione delle procedure di calcolo della resistenza al moto per la vegetazione rigida e flessibile e ad una prima validazione del

modello attraverso la simulazione di uno scenario quanto più possibile vicino all'evento verificatosi in data 1 marzo 2011, che ha causato notevoli danni ad una delle aree più ricche e produttive della Basilicata.

L'evento di piena del 1 marzo 2011 è stato ricostruito dal punto di vista idrologico utilizzando il modello afflussi-deflussi AD2 di Fiorentino e Manfreda (2004) per ricavare gli idrogrammi delle portate provenienti dai bacini a monte ed il metodo di Muskingum per calcolarne la propagazione fino alla piana. L'idrogramma di piena ottenuto è stato introdotto nel modello come condizione al contorno di monte.

Il dominio di calcolo, costruito a partire dal rilievo laser-scan, ha una risoluzione pari a 10 m e non tiene in conto del reticolo idrografico secondario e della rete di bonifica presente. Si è invece tenuto conto delle rotture arginali riscontrate nell'area di studio durante la piena considerata.

Una prima validazione del modello è stata realizzata confrontando i risultati della simulazione in termini di aree allagate con le immagini satellitari COSMO-SkyMed acquisite nelle ore successive all'evento.

A supporto di quest'attività di ricerca si sono utilizzati strumenti GIS Open Source. La scelta è ricaduta su di essi sia perché ormai sono molto simili nell'interfaccia utente e nelle funzioni ai pacchetti GIS commerciali, sia per andare nella stessa direzione che ha portato a voler rendere di libero utilizzo il modello proposto.

1. Stato dell'arte

1.1. Influenza della vegetazione sulla resistenza al moto

Nello studio delle correnti a pelo libero, la stima del coefficiente di resistenza al moto è generalmente realizzata ricorrendo alla formula proposta da Manning:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

in cui n è il coefficiente di scabrezza di Manning, V la velocità media, R il raggio idraulico e J la cadente.

I metodi per la stima del coefficiente di Manning possono essere classificati come diretti, descrittivo-fotografici e analitici.

Tale coefficiente viene in genere esplicitato facendo riferimento alle diverse proposte di letteratura, come quelle di Cowan (1956) e Chow (1959), ma anche di Marchi et al. (1981) o a quelle suggerite dagli stessi autori dei software più utilizzati per il calcolo idraulico. Si può anche attingere ad esperienze di laboratorio finalizzate alla determinazione della scabrezza al variare delle caratteristiche del fondo alveo ed alla eventuale presenza di elementi sul letto del canale (Di Cristo et al., 2002) o esperimenti che stimano il coefficiente di scabrezza in funzione delle tipologie vegetali distribuite sul fondo (Medina et al., 2002).

Cowan (1956), inoltre, ha proposto un metodo nel quale il coefficiente di Manning si ottiene attraverso la conoscenza di una serie di coefficienti che tengono conto della presenza di diversi fattori dissipativi.

L'espressione da lui fornita è la seguente:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5 \quad (1.2)$$

dove:

- n_0 è un valore di base che tiene conto del tipo di materiale di cui è costituito il contorno ed è valido per un canale rettilineo, con sezione trasversale costante e privo di irregolarità;
- n_1 tiene conto delle irregolarità del contorno bagnato;
- n_2 controlla le variazioni di forma e dimensioni della sezione del corso d'acqua;
- n_3 è un fattore relativo alla presenza di impedimenti ed ostacoli;
- n_4 considera l'effetto della vegetazione;
- m_5 è un termine correttivo dovuto all'eventuale presenza di meandri.

A ciascuno dei suddetti fattori Cowan associa, per le diverse condizioni, un valore numerico.

Il metodo di Cowan può essere utilizzato anche nelle aree golenali, apportando delle dovute correzioni. In questo caso non entra in gioco il coefficiente n_2 , essendo legato alla geometria delle sezioni trasversali, mentre il valore di m_5 è sempre uguale ad 1.

La scelta dei valori più idonei a caratterizzare i fattori che compaiono nell'espressione 1.2 è sempre accompagnata da un margine di incertezza dal momento che i valori suggeriti in letteratura sono spesso correlati anche al livello idrico della corrente che investe la pianta che, ovviamente, non è noto a priori (figura 1.1).

Amount of vegetation (n_4)		
Small	0.001-0.010	Dense growths of flexible turf grass, such as Bermuda, or weeds growing where the average depth of flow is at least two times the height of the vegetation; supple tree seedlings such as willow, cottonwood, arrow-weed, or saltcedar growing where the average depth of flow is at least three times the height of the vegetation.
Medium	0.010-0.025	Turf grass growing where the average depth of flow is from one to two times the height of the vegetation; moderately dense stemmy grass, weeds, or tree seedlings growing where the average depth of flow is from two to three times the height of the vegetation; brushy, moderately dense vegetation, similar to 1-to-2-year-old willow trees in the dormant season.
Large	0.025-0.050	Turf grass growing where the average depth of flow is about equal to the height of the vegetation; 8-to-10-years-old willow or cottonwood trees intergrow with some weeds and brush (none of the vegetation in foliage) where the hydraulic radius exceeds 0.607 m.; or mature row crops such as small vegetables, or mature field crops where depth of flow is at least twice the height of the vegetation.
Very Large	0.050-0.100	Turf grass growing where the average depth of flow is less than half the height of the vegetation; or moderate to dense brush, or heavy stand of timber with few down trees and little undergrowth where depth of flow is below branches, or mature field crops where depth of flow is less than the height of the vegetation.
Extreme	0.100-0.200	Dense bushy willow, mesquite, and saltcedar (all vegetation in full foliage), or heavy stand of timber, few down trees, depth of reaching branches.

Tabella 1.1. Valori del fattore n_4 suggeriti per l'applicazione della formula di Cowan in funzione del tipo di vegetazione presente in alveo e del rapporto tra tirante idrico e altezza della pianta (G.J. Arcement, Jr. e V.R. Schneider, Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains, United States Geological Survey, Water-supply Paper 2339).

Chow (1959) ha raccolto in una documentazione fotografica una vasta gamma di corsi d'acqua fornendo, per ciascuna tipologia individuata, una breve descrizione e una proposta di valori da assegnare al coefficiente n di Manning (figura 1.1).

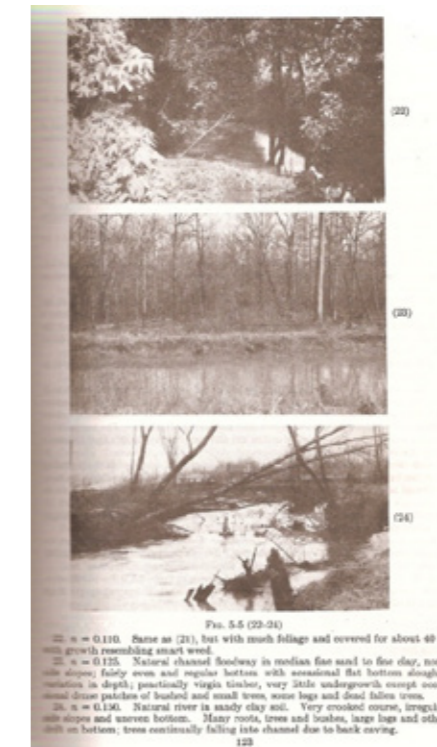


Figura 1.1. Valori di n suggeriti da V.T. Chow in Open-Channel Hydraulics (1959).

Altri metodi descrittivo-fotografici sono quelli di Aldridge e Garrett (1973), Ree and Crow (1977), Schneider et al. (1977), Colson et al. (1979).

La scelta del coefficiente di scabrezza è quindi un'operazione molto delicata perché affidata spesso a considerazioni soggettive.

Numerose sono le ricerche condotte in ambito sia nazionale che internazionale tese ad una migliore quantificazione della resistenza al moto dovuta alla vegetazione. In esse la copertura vegetale è generalmente distinta in arborea o rigida e arbustiva o flessibile.



Figura 1.2. Vegetazione rigida (a sinistra) e vegetazione flessibile (a destra).

1.2. Determinazione del coefficiente di scabrezza in presenza di vegetazione rigida

Una convincente determinazione del coefficiente di Manning in presenza di vegetazione arborea è stata effettuata da Petryk e Bosmajian (1975), i quali hanno studiato la sua variazione con la densità della vegetazione nell'ipotesi in cui il tirante idrico sia inferiore o al più uguale all'altezza delle piante.

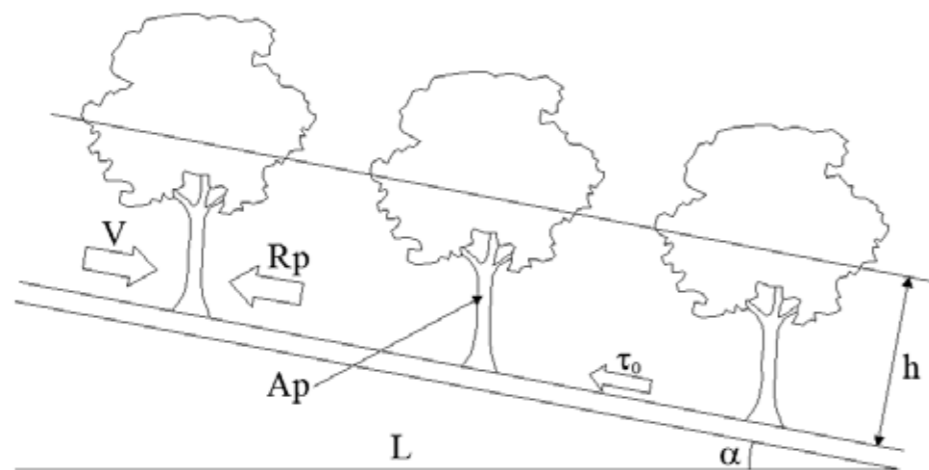


Figura 1.3. Schema del calcolo della scabrezza in presenza di vegetazione rigida.

Facendo riferimento alla figura 1.3 e supponendo condizioni di moto uniforme, la componente della forza peso nella direzione del moto di un tratto di canale lungo L ($\rho g A L i$) è bilanciata dagli sforzi alla parete agenti sul contorno ($\tau_0 P L$) e dalla somma delle resistenze idrodinamiche offerte dalle singole piante ($\sum R p_i$).

$$\rho g A L i = \tau_0 P L + \sum R p_i \quad (1.3)$$

Risolvendo si ottiene l'espressione per il calcolo della scabrezza in presenza di vegetazione rigida, parzialmente sommersa:

$$n_{eq} = \sqrt{n_0^2 + \frac{R^{\frac{1}{3}} C_D A_p}{2g a_x a_y}} \quad (1.4)$$

dove il termine $\frac{C_D A_p}{a_x a_y}$ rappresenta proprio la cosiddetta densità della vegetazione, C_D è il coefficiente di resistenza detto anche coefficiente di drag, A_p è la sezione di ingombro di una pianta, a_x è la distanza tra le piante nella direzione della corrente e a_y è la distanza tra le piante nella direzione perpendicolare alla corrente.

Nel caso in cui l'altezza del tirante sia superiore a quella delle piante, lo schema proposto da Petryk e Bosmajian non è più valido perché la velocità di riferimento per la valutazione della resistenza al moto indotta dalla vegetazione risulta significativamente più bassa della velocità media nel canale, intesa come rapporto tra portata liquida e area della sezione di deflusso.

Righetti (2004) ha evidenziato la necessità di considerare un opportuno modello di turbolenza e ha suggerito un fattore correttivo α pari al rapporto tra la velocità media dello strato vegetato (U_f) e quella della sezione (U), da inserire nella relazione 1.4 che diventa quindi:

$$n_{eq} = \sqrt{n_0^2 + \alpha^2 \frac{R^{\frac{1}{3}} C_D A_p}{2g a_x a_y}} \quad (1.5)$$

dove i valori di α sono sempre minori di 1 e decrescono all'aumentare del livello di sommersione.

1.3. Determinazione del coefficiente di scabrezza in presenza di vegetazione flessibile

Per quanto riguarda la determinazione del coefficiente di scabrezza in presenza di vegetazione arbustiva diversi studi (Fathi e Kouwen, 1997; Vischer e Oplatka, 1998; Kouwen e Fathi, 2000; Freeman et al., 2000; Järvelä, 2002; Chiaradia, 2006) hanno dimostrato che la scabrezza di un alveo con vegetazione arbustiva non rimane costante ma, al contrario, in determinate condizioni tende addirittura a decrescere come conseguenza del piegamento delle chiome che presentano comportamento elastico. Tuttavia, allo stato attuale non esistono molti riferimenti per la stima della scabrezza in tali condizioni.

Un metodo empirico è quello proposto da Freeman et al. (2000), suffragato da un notevole numero di prove eseguite su materiale vivo e considerando diverse condizioni idrauliche.

I fenomeni determinati dalla presenza di vegetazione arbustiva in alveo, vengono descritti attraverso quattro parametri secondo una relazione del tipo:

$$\frac{V_0}{V} = f\left(\frac{\rho V^2 A_i}{E_s A_s}, \frac{h}{h_{veg}}, MA_p, Re\right) \quad (1.6)$$

dove E_s è il modulo di elasticità caratteristico della vegetazione (N/m^2), A_s è l'area della sezione del fusto di diametro D_s (m), h è il tirante (m), h_{veg} è l'altezza della vegetazione eretta in condizioni di riposo (m), M è il numero di piante per unità di superficie e A_p è la superficie frontale di ciascuna pianta (m^2). Il primo parametro identifica il rapporto tra la forza della corrente e la resistenza meccanica offerta dalla pianta; quest'ultima viene schematizzata come una vela di dimensioni note (la chioma) montata su di un perno (il fusto) su cui si scaricano le forze. Il secondo parametro adimensionale indica il livello di sommersione, il terzo la densità della vegetazione ovvero la superficie totale assorbente la quantità di moto, mentre il quarto rappresenta il numero di Reynolds, che esprime l'equilibrio tra le forze di inerzia e le forze di resistenza viscosa.

Dall'analisi numerica delle sperimentazioni sono state estrapolate due funzioni che descrivono la variazione del coefficiente di scabrezza dell'alveo vegetato in condizione di sommersione totale ($h > 0,8 h_{veg}$):

$$n = 0,183 \left(\frac{E_s A_s}{\rho V_0^2 A_i}\right)^{0,183} \left(\frac{h_{veg}}{h}\right)^{0,243} (MA_i)^{0,278} \left(\frac{V}{V_0 R}\right)^{0,115} \left(\frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{V_0}\right) \quad (1.7)$$

e parziale ($h < 0,8 h_{veg}$):

$$n = 3,487E - 05 \left(\frac{E_s A_s}{\rho V_0^2 A_i}\right)^{0,150} (MA_i)^{0,166} \left(\frac{V_0 R}{V}\right)^{0,622} \left(\frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{V_0}\right) \quad (1.8)$$

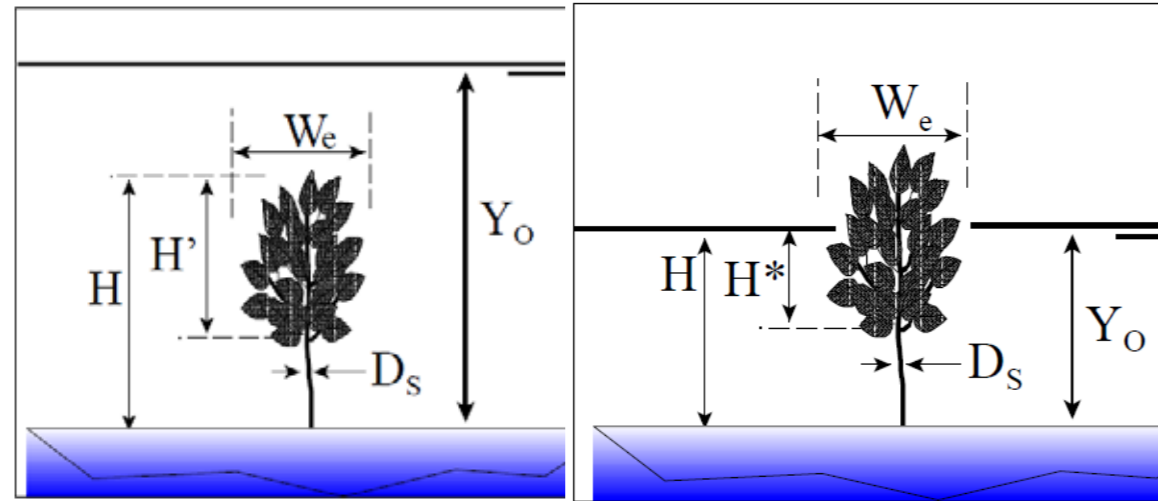


Figura 1.4. Schema relativo alla proposta di Freeman et al. nel caso di vegetazione completamente sommersa (a sinistra) e parzialmente sommersa (a destra). Tratto da Freeman et al., Determination of Resistance Due to Shrubs and Woody Vegetation, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2000.

Freeman et al. hanno proposto anche un'espressione per la determinazione del modulo di elasticità della pianta basato sulla misura della forza orizzontale necessaria a piegare il fusto di 45 gradi.

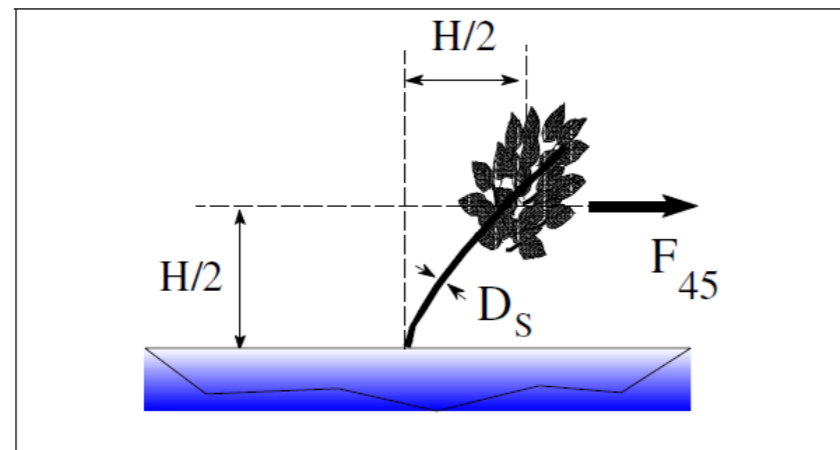


Figura 1.5. Schema relativo alla proposta di Freeman et al. per la stima del modulo di elasticità nel caso in cui l'altezza della chioma è approssimativamente uguale a quella della pianta. Tratto da Freeman et al., Determination of Resistance Due to Shrubs and Woody Vegetation, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2000.

$$E_S = \frac{F_{45}H^2}{3I} = 6.791 \left(\frac{F_{45}H^2}{D_S^4} \right) \quad (1.9)$$

Misure effettuate sul campo e in laboratorio hanno inoltre permesso di ottenere una relazione tra il modulo di elasticità della pianta ed il rapporto tra altezza della pianta e diametro del fusto.

$$E_S \left(\frac{N}{m^2} \right) = 7.648E06 \left(\frac{H}{D_S} \right) + 2.174E04 \left(\frac{H}{D_S} \right)^2 + 1.809E03 \left(\frac{H}{D_S} \right)^3 \quad (1.10)$$

Nell'applicazione del modello di Freeman et al. occorre prestare attenzione ai limiti della attività sperimentale su cui si basa.

I limiti di validità del modello di Freeman riguardano sia le caratteristiche della vegetazione che quelle della corrente e sono di seguito elencati:

- tiranti compresi tra 0,4 e 1,4 m;
- velocità tra 0,15 e 1,1 m/s;
- n di Manning compreso tra 0,04 a 0,14;
- altezza delle piante da 0,20 a 1,52 m;
- larghezza della chioma da 0,076 a 0,91 m;
- densità di piante da 0,53 a 13 piante / m²;
- modulo di elasticità da 5,3 x 10⁷ a 4,8 x 10⁹ N/m²;
- numero di Reynolds da 1,4 x 10⁵ a 1,6 x 10⁶.

1.4. Applicazione sulla distribuzione della portata in canali a differente vegetazione

Per meglio apprezzare le teorie descritte nei precedenti paragrafi, si è svolta una applicazione per stimare la distribuzione della portata in canali con differente vegetazione. Facendo riferimento allo schema riportato in figura 1.6, si è considerato un

canale (1) dal quale si diramano due canali (2) e (3). Il canale (1) di monte ha sezione rettangolare di dimensioni 5 m x 3 m, mentre i canali (2) e (3) di valle, sempre a sezione rettangolare, hanno entrambi base pari a 3 m ed altezza pari a 3 m. A valle della biforcazione, il canale (2) presenta un fondo simile a quello del canale (1) (ciottoli e sponde pulite). Per il canale (3) si sono ipotizzati i seguenti due scenari: presenza di vegetazione rigida (betulla), nel primo caso, e presenza di vegetazione flessibile (arbusti), nel secondo.

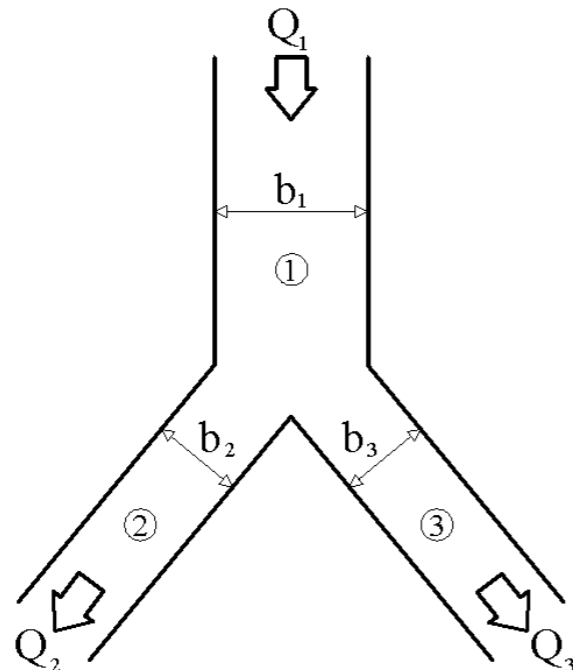


Figura 1.6. Schema considerato nell'applicazione.

La stima della distribuzione della portata nei due canali di valle è stata effettuata utilizzando l'equazione di conservazione dell'energia:

$$\begin{cases} y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + S_{f2}L + C \left| \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} \right| \\ y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = y_3 + z_3 + \frac{\alpha_3 U_3^2}{2g} + S_{f3}L + C \left| \frac{\alpha_3 U_3^2}{2g} - \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} \right| \end{cases} \quad (1.11)$$

Nel primo caso, relativo alla presenza di vegetazione rigida, la determinazione della scabrezza indotta dalla vegetazione è realizzata utilizzando la formula di Petryk e Bosmajian. In questo modo, si sono ricavati i valori di scabrezza in relazione all'altezza d'acqua calcolata per le diverse portate defluenti nel ramo considerato.

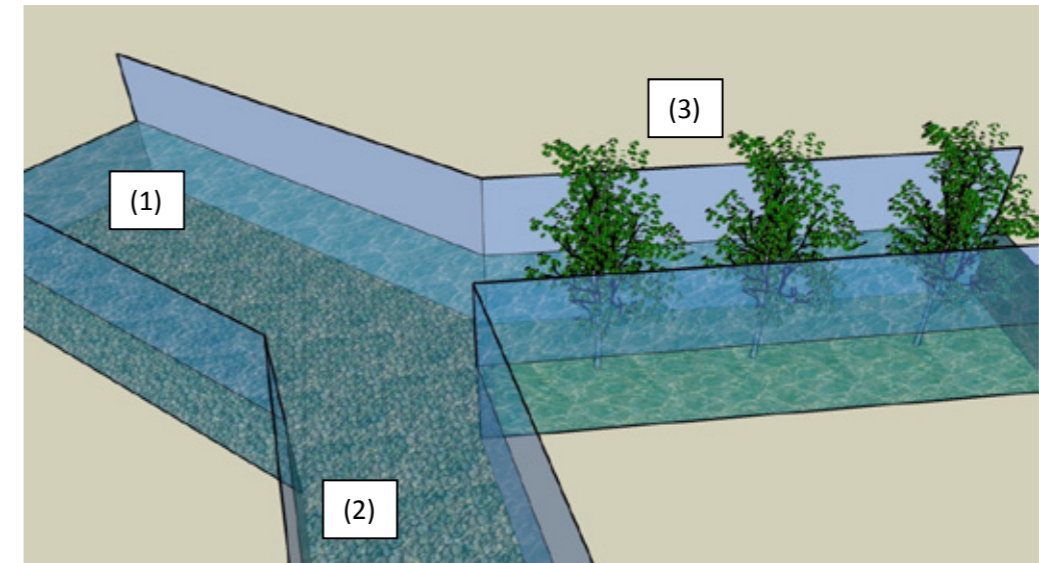


Figura 1.7. Schema relativo al primo caso: canali (1) e (2) senza vegetazione e canale (3) con vegetazione rigida sul fondo.

I risultati ottenuti sono sintetizzati nella figura 1.8, dalla quale si evince che, applicando nella sezione con vegetazione rigida la formula di Petryk e Bosmajian, il coefficiente di scabrezza aumenta linearmente con l'aumentare del tirante.

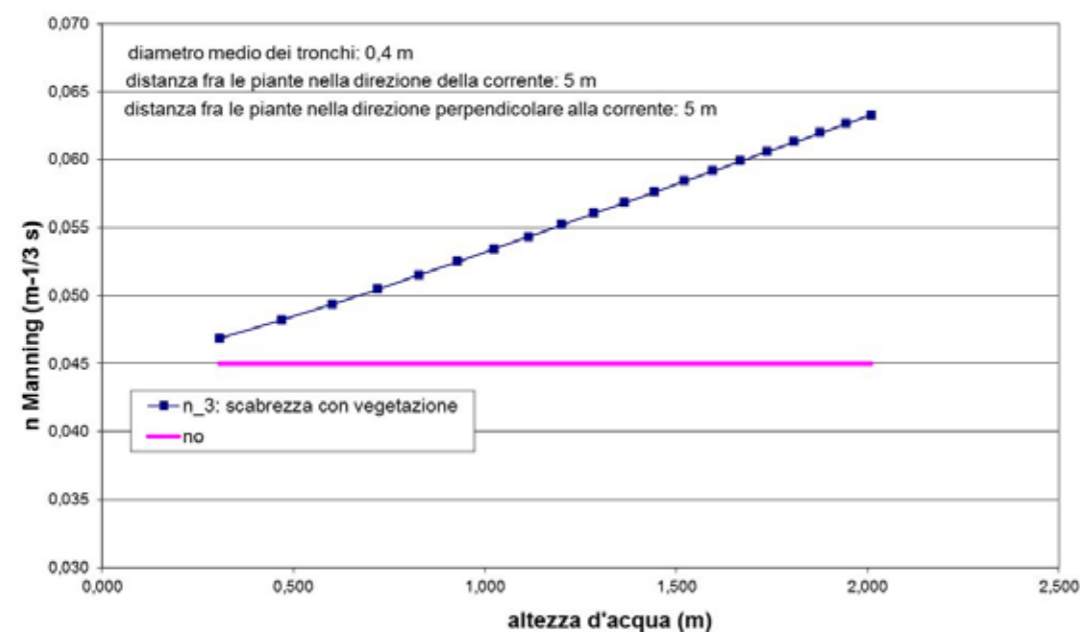


Figura 1.8. Variazione della scabrezza con l'altezza d'acqua in una sezione del canale (3) con vegetazione rigida sul fondo.

Nella seguente figura, inoltre, si mostra come la portata Q1 defluente nel canale (1) di monte si distribuisce nei due canali a valle della biforcazione: la portata Q2 che defluisce nel ramo (2) senza vegetazione risulta maggiore di quella Q3 che defluisce nel ramo (3) con vegetazione rigida sul fondo. A causa dell'incremento di scabrezza nel canale 3 all'aumentare del tirante, anche la disuniformità di distribuzione della portata aumenta al crescere della portata.

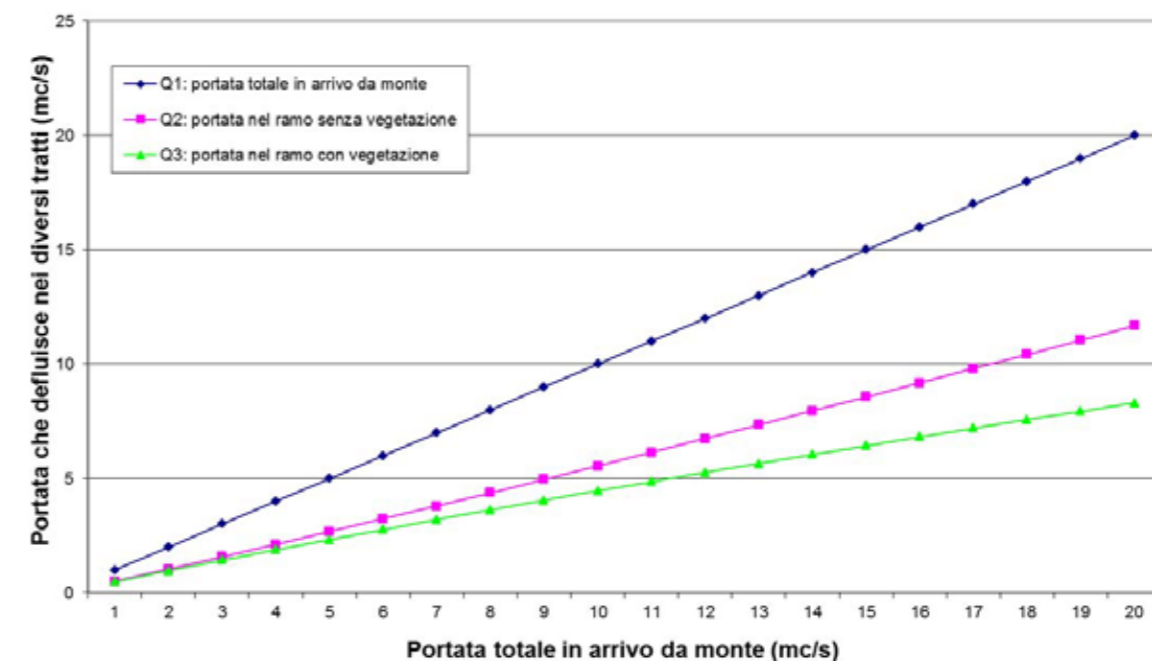


Figura 1.9. Esempio di split della portata nei due rami (1) e (2) di uguale geometria e differenti caratteristiche di scabrezza idraulica considerati nell'applicazione. Primo caso relativo alla presenza di vegetazione rigida sul fondo del canale (3).

Nel secondo caso (figura 1.10) si sono ipotizzate le stesse caratteristiche geometriche del caso precedente e si è fatto riferimento allo stesso coefficiente di scabrezza n di Manning nei canali (1) e (2). Nel canale (3), invece, si è ipotizzata la presenza di vegetazione flessibile sul fondo e si è utilizzata la formula di Freeman et al. per la stima del suo coefficiente di scabrezza. In aggiunta, per valori del rapporto tra tirante e altezza della pianta minori di 0,8 la vegetazione è stata considerata parzialmente sommersa; mentre per valori maggiori di 0,8 si è utilizzata la formula proposta per vegetazione completamente sommersa.

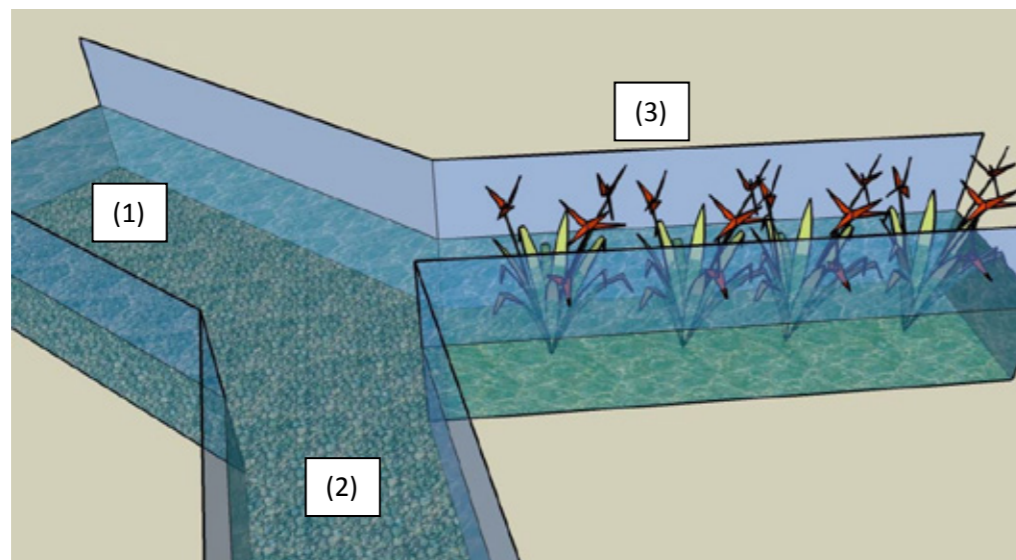


Figura 1.10. Schema relativo al secondo caso: canali (1) e (2) senza vegetazione e canale (3) con vegetazione flessibile sul fondo.

Come mostrato nella figura seguente, in questo caso il coefficiente di Manning aumenta con il tirante in condizioni di sommersione parziale e decresce con il tirante in condizioni di sommersione totale, come conseguenza del piegamento delle chiome.

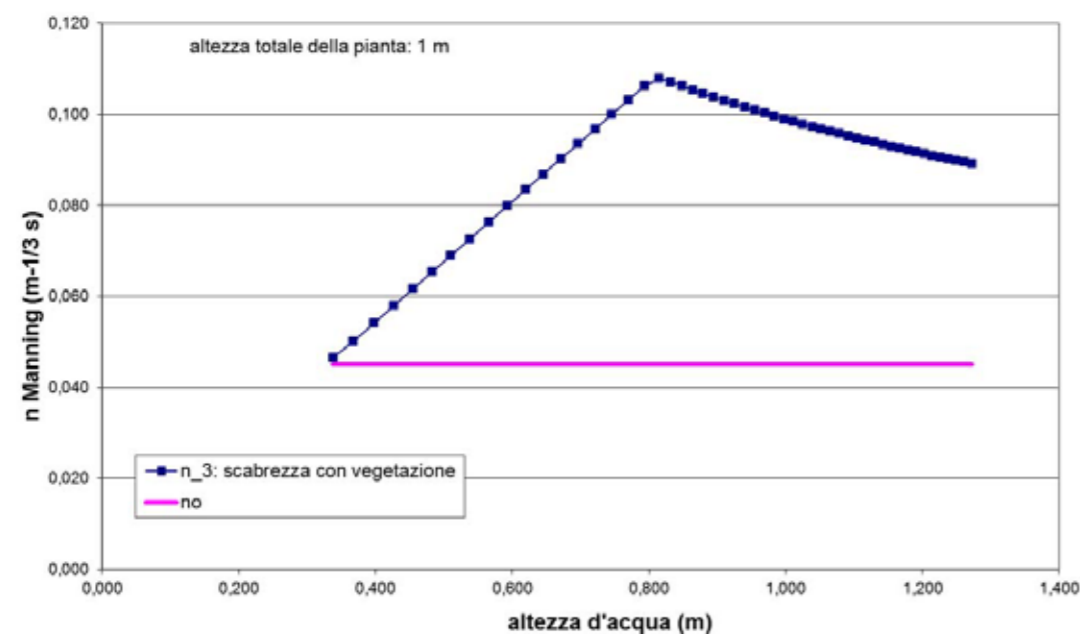


Figura 1.11. Variazione della scabrezza con l'altezza d'acqua in una sezione del canale (3) con vegetazione flessibile sul fondo.

Anche in presenza di vegetazione flessibile, come nel caso di vegetazione rigida, la portata che defluisce nel ramo (2) senza vegetazione è maggiore di quella che defluisce nel ramo (3) con vegetazione flessibile sul fondo (figura 1.12).

In questo caso, si nota come inizialmente la differenza fra portate dei rami (2) e (3) aumenta all'aumentare della portata, poi una volta raggiunte le condizioni di sommersione totale la differenza tende a rimanere costante.

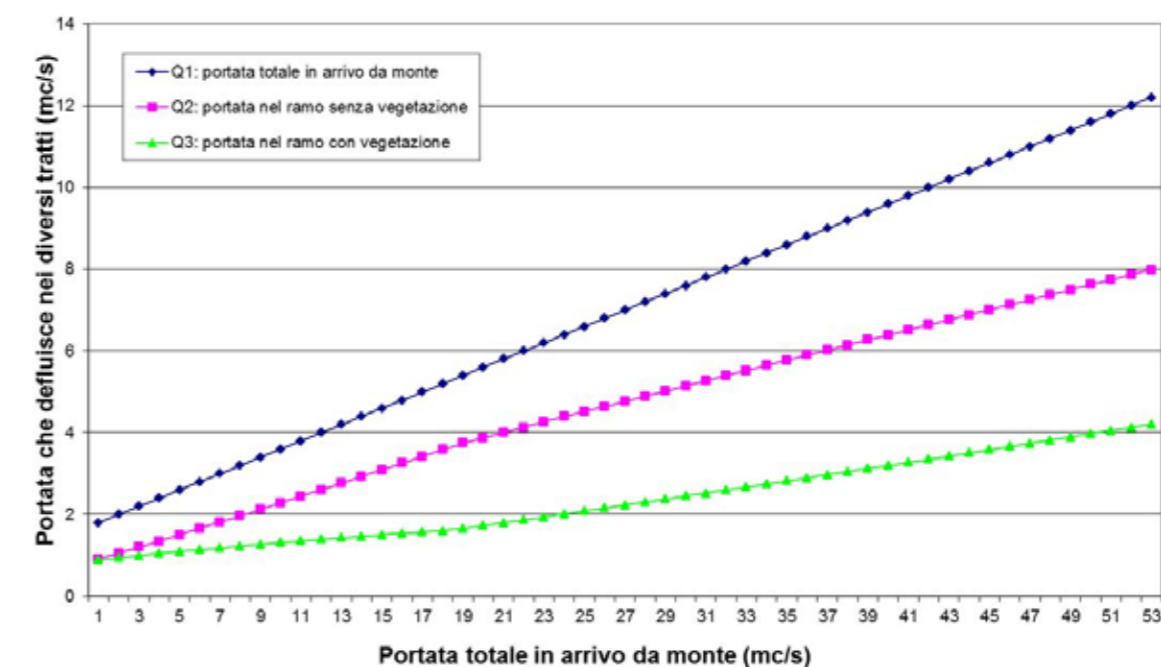


Figura 1.12. Esempio di split della portata in due rami di uguale geometria e differenti caratteristiche di scabrezza idraulica considerati nell'applicazione. Secondo caso relativo alla presenza di vegetazione flessibile sul fondo del canale (3).

L'applicazione evidenzia l'importanza della stima della scabrezza nei fenomeni idraulici. Nel caso presentato, infatti, a parità di geometria dei canali e di portata e resistenza al moto del canale di monte, la distribuzione della portata nei canali a valle della biforcazione è fortemente influenzata dalla resistenza al moto offerta dalla

vegetazione presente sul fondo. Inoltre tale influenza varia al variare del tirante e si ha un comportamento differente a seconda che si tratti di vegetazione rigida o flessibile.

Negli studi volti a determinare il pericolo di inondazione, la scelta del coefficiente di scabrezza risulta particolarmente delicata: da essa infatti, può dipendere l'inondabilità di un territorio.

2. Il modello FLORA-2D

2.1. Introduzione

Lo studio delle inondazioni avviene attraverso l'utilizzo di modelli monodimensionali o bidimensionali di simulazione idraulica.

Il modello monodimensionale è applicabile quando il percorso del fluido è orientato, sezione per sezione, pressoché in una sola direzione. È questo il caso di un fiume con argini ben definiti e regolari senza brusche modifiche nella sezione oppure di un corso d'acqua che scorre all'interno di un alveo inciso. Attraverso lo schema bidimensionale è invece possibile simulare numericamente la propagazione dell'onda nel piano. Pertanto, il suo impiego è più utile nella descrizione di piene in aree vaste e pianeggianti, dove non è possibile ipotizzare a priori una direzione principale di propagazione dei volumi esondati.

La parte più innovativa e anche più laboriosa della presente tesi di dottorato riguarda l'implementazione del modello numerico bidimensionale di simulazione idraulica denominato FLORA-2D (FLOOD and Roughness Analysis) realizzata nell'ambito della collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente (DIFA) dell'Università degli Studi della Basilicata e la società di ricerca RSE (Ricerca sul Sistema Energetico).



Figura 2.1. Logo del modello FLORA-2D.

Partendo dalla metodologia proposta nel 1994 da Molinaro et al. riguardante un modello bidimensionale per lo studio degli allagamenti in alvei a topografia complessa e in presenza di singolarità artificiali e naturali, si è implementato un modello idraulico capace di computare la variazione sia spaziale che temporale del coefficiente di resistenza al moto offerto dalla vegetazione. Infatti, come descritto nel capitolo precedente, tale coefficiente dipende non solo dalle caratteristiche della copertura vegetale ma anche dall'altezza d'acqua che investe la pianta e che, a sua volta, varia nel tempo durante l'evento di piena.

I modelli di simulazione idrodinamica mono e bidimensionali, commerciali e non, prevedono di specificare in input la resistenza al moto mediante un coefficiente di scabrezza caratteristico dell'area di studio, generalmente variabile nello spazio, ma costante nel tempo, trascurando la dipendenza di tale parametro dal livello idrico.

FLORA-2D consente di calcolare il coefficiente di scabrezza n di Manning distinguendo tra vegetazione rigida e flessibile risolvendo l'equazione di Petryk e Bosmajian nel primo caso e quella di Freeman et al., invece, nel secondo. Per la vegetazione flessibile è altresì possibile distinguere la condizione di totale sommersione da quella di parziale sommersione.

2.2. Le equazioni utilizzate

Il modello FLORA-2D, essendo un modello bidimensionale, considera le due componenti orizzontali del moto trascurando le sole componenti verticali, di entità generalmente modesta, e si basa sulle cosiddette “shallow water equations” o “equazioni delle acque basse” scritte in forma bidimensionale. Sviluppando le derivate dei termini convettivi, tali equazioni assumono la seguente forma (Molinaro et al., 1994):

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial q_x}{\partial t} + u \frac{\partial q_x}{\partial x} + v \frac{\partial q_x}{\partial y} + u \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) + (gh - u^2) \frac{\partial h}{\partial x} - uv \frac{\partial h}{\partial y} + gh(C_f q_x - S_x) = 0 \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + u \frac{\partial q_y}{\partial x} + v \frac{\partial q_y}{\partial y} + v \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) + (gh - v^2) \frac{\partial h}{\partial y} - uv \frac{\partial h}{\partial x} + gh(C_f q_y - S_y) = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

dove:

- x, y, t coordinate spaziali e temporali;
- h profondità dell'acqua;
- u, v componenti rispettivamente lungo gli assi x e y del vettore velocità mediato rispetto alla profondità;
- q_x, q_y componenti rispettivamente lungo gli assi x e y del vettore portata per unità di larghezza;
- g accelerazione di gravità;

- S_x, S_y pendenza del fondo del terreno nelle direzioni degli assi;
- C_f termine relativo alla resistenza offerta localmente dal terreno.

I termini convettivi, che considerano gli effetti dell'energia cinetica posseduta dalla corrente e quindi le forze dinamiche collegate alla variazione di quantità di moto, possono in alcuni casi essere trascurati.

Ciò accade nei fenomeni di inondazione di vaste aree pianeggianti, dove l'importanza di queste forze risulta relativamente ridotta rispetto alle altre forze presenti (inerzia, attrito, gravità, spinte idrostatiche). In questi casi, inoltre, le dimensioni generalmente significative delle celle del dominio fanno sì che le derivate spaziali discretizzate abbiano, in genere, denominatori molto grandi e quindi importanza relativa minore nelle equazioni.

Nei fenomeni di piena, infine, elevate velocità dell'acqua vengono raggiunte solo in zone generalmente ben localizzate; il loro effetto viene però distribuito a causa delle dimensioni stesse della griglia di calcolo.

In base a queste considerazioni, trascurando per semplicità i termini convettivi, il sistema di equazioni da risolvere diviene:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial q_x}{\partial t} + gh \frac{\partial h}{\partial x} + gh(C_f q_x - S_x) = 0 \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + gh \frac{\partial h}{\partial y} + gh(C_f q_y - S_y) = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Tali equazioni vengono poi discretizzate, secondo uno schema alle differenze finite.

2.3. La discretizzazione numerica

Uno schema possibile per discretizzare nel tempo le equazioni semplificate è il seguente:

$$\begin{cases} \frac{h^{n+1} - h^n}{\Delta t} + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right)^{n+1} + \left(\frac{\partial q_y}{\partial y}\right)^{n+1} = 0 \\ \frac{q_x^{n+1} - q_x^n}{\Delta t} + gh^n \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^{n+1} + gh^n (C_f^n q_x^{n+1} - S_x)^{n+1} = 0 \\ \frac{q_y^{n+1} - q_y^n}{\Delta t} + gh^n \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^{n+1} + gh^n (C_f^n q_y^{n+1} - S_y)^{n+1} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Gli apici "n" ed "n+1" indicano rispettivamente le grandezze misurate al tempo t e t+Δt dell'intervallo temporale Δt di calcolo. Effettuando la discretizzazione temporale si ottiene quindi un sistema di equazioni differenziali a coefficienti costanti in quanto ogni grandezza incognita (indice "n+1") viene moltiplicata per grandezze note (indice "n"). In tale modo il sistema risolvibile risulta di più agevole e rapida soluzione.

La discretizzazione spaziale, utilizzata per le derivate rispetto agli assi x e y, è ottenuta basandosi su due griglie sfalsate come di seguito rappresentato:

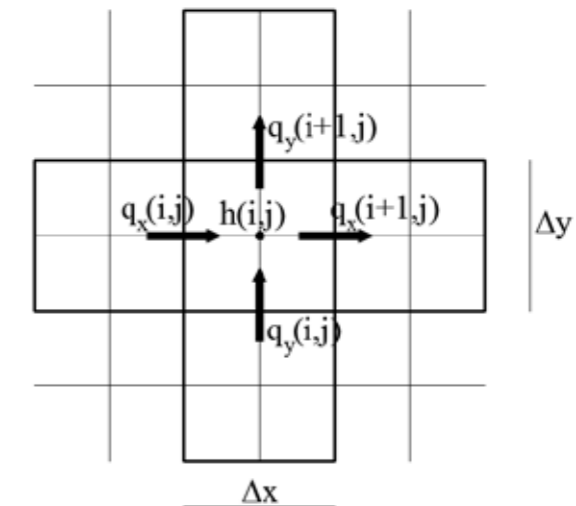


Figura 2.2. Discretizzazione spaziale attraverso l'utilizzo di due griglie sfalsate.

La grandezza h (profondità dell'acqua) è localizzata nel centro della cella della griglia principale, mentre le portate q_x e q_y sono situate rispettivamente sui lati perpendicolari agli assi x e y della stessa maglia. L'utilizzo di maglie sfalsate è preferibile se si vogliono evitare oscillazioni anomale della soluzione (chess-bordering).

Le derivate spaziali, che compaiono nelle equazioni di continuità e del moto viste in precedenza, assumono forma discretizzata. Le distanze Δx e Δy al denominatore hanno significato di lato della cella della maglia principale di calcolo per quanto riguarda le derivate della portata (equazione di continuità) e di distanza fra i centri della cella della maglia principale (o fra i lati della maglia secondaria), quando si tratta di derivate dei livelli (equazioni del moto).

2.4. L'equazione risolvete

Il sistema di equazioni differenziali, semplificato e discretizzato come visto precedentemente, viene risolto numericamente con un procedimento basato sull'annullamento del residuo.

L'equazione risolvete vincola fra loro il livello della cella cui si riferisce con i livelli delle quattro celle adiacenti e con le portate sui quattro lati della cella stessa e può essere ottenuta secondo la procedura descritta di seguito.

Dette h^p , q_x^p e q_y^p , i valori delle incognite alla p -esima iterazione dell' $n+1$ -esimo passo temporale Δt , si calcolano per ogni lato della cella (ovvero per i lati verticali quando consideriamo l'equazione del moto lungo l'asse x e per i lati orizzontali quando consideriamo l'equazione del moto lungo l'asse y), i valori q_x^p e q_y^p dalla 2^a e dalla 3^a equazione del sistema 2.3 scritte nella forma:

$$\frac{q_x^p - q_x^n}{\Delta t} + gh^n \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^p + gh^n (C_f^n q_x^p - S_x)^p = 0$$

$$\frac{q_y^p - q_y^n}{\Delta t} + gh^n \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^p + gh^n (C_f^n q_y^p - S_y)^p = 0$$

dove:

n = indice per i valori noti (tempo precedente);

p = indice per i valori all'iterazione p -esima.

Si ottengono quindi:

$$q_x^p = -\frac{gh^n \Delta t}{1+gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^p + \frac{gh^n S_x \Delta t + q_x^n}{1+gh^n C_f^n \Delta t} \quad (2.4a)$$

$$q_y^p = -\frac{gh^n \Delta t}{1+gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^p + \frac{gh^n S_y \Delta t + q_y^n}{1+gh^n C_f^n \Delta t} \quad (2.4b)$$

dove h^p , che compare discretizzando le derivate spaziali, è un valore di tentativo che si può inizialmente assumere pari a quello ricavato nel passo temporale precedente.

Sostituendo i valori trovati di q^p ed il valore utilizzato di h^p nell'equazione di continuità (1^a equazione della 2.3) si ottiene:

$$\frac{h^p - h^n}{\Delta t} + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right)^p + \left(\frac{\partial q_y}{\partial y} \right)^p = R^p \quad (2.4c)$$

che è l'espressione del residuo R in funzione di h^p , cioè dell'altezza d'acqua alla iterazione p -esima.

Affinchè sia $R(h^p + \Delta h^p) = 0$ bisogna valutare la correzione Δh^p da apportare ad h^p .

Se si sostituisce al posto di h^p , il valore $(h^p + \Delta h^p)$ nelle espressioni scritte in precedenza, q^p assumerà il valore $(q^p + \Delta q^p)$ e l'espressione del residuo $R(h^p + \Delta h^p)$ da porre uguale a zero è:

$$\frac{(h^p + \Delta h^p) - h^n}{\Delta t} + \frac{\partial(q_x^p + \Delta q_x^p)}{\partial x} + \frac{\partial(q_y^p + \Delta q_y^p)}{\partial y} = R(h^p + \Delta h^p) = 0 \quad (2.5a)$$

Dalle equazioni utilizzate per il calcolo della portata si ottiene:

$$(q_x^p + \Delta q_x^p) = -\frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \frac{\partial(h^p + \Delta h^p)}{\partial x} + \frac{gh^n S_x \Delta t + q_x^n}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \quad (2.5b)$$

$$(q_y^p + \Delta q_y^p) = -\frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \frac{\partial(h^p + \Delta h^p)}{\partial y} + \frac{gh^n S_y \Delta t + q_y^n}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \quad (2.5c)$$

Derivando le espressioni (2.5b) e (2.5c) rispettivamente lungo l'asse x e lungo l'asse y e considerando che le grandezze al tempo "n" sono note o costanti, si ottiene:

$$\frac{\partial(q_x^p + \Delta q_x^p)}{\partial x} = -\frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right)^p - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial x^2}\right)^p \quad (2.5d)$$

$$\frac{\partial(q_y^p + \Delta q_y^p)}{\partial y} = -\frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right)^p - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial y^2}\right)^p \quad (2.5e)$$

Sostituendo le espressioni ora ottenute nella (2.5a) si ha:

$$\begin{aligned} & \frac{(h^p + \Delta h^p) - h^n}{\Delta t} - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right)^p - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial x^2}\right)^p + \\ & - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right)^p - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial y^2}\right)^p = 0 \end{aligned}$$

Ponendo per semplicità di scrittura:

$$A = \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t}$$

si può scrivere:

$$\frac{h^p - h^n}{\Delta t} - A \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right)^p - A \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right)^p + \frac{\Delta h^p}{\Delta t} - A \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial x^2}\right)^p - A \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial y^2}\right)^p = 0$$

Dato che i primi tre termini di questa equazione coincidono con l'espressione del residuo R^p vista in precedenza, si può scrivere l'espressione per valutare la correzione " Δh^p " da apportare ad h^p perché sia $R(h^p + \Delta h^p) = 0$:

$$\frac{\Delta h^p}{\Delta t} - A \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial x^2}\right)^p - A \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial y^2}\right)^p + R^p = 0 \quad (2.6)$$

Questa equazione (di tipo parabolico) può essere risolta rispetto alle incognite " Δh^p ", dapprima lungo le righe (asse x) e poi lungo le colonne (asse y).

Agendo in tal modo compariranno in ogni equazione del sistema risolvete le tre sole incognite Δh_{i-1}^p , Δh_i^p , Δh_{i+1}^p , mentre per le celle di inizio e fine di ogni tratto le incognite contenute da ciascuna equazione saranno solamente due. Ogni tratto orizzontale o verticale di celle limitrofe sarà descritto pertanto da un sistema con matrice a banda tridiagonale.

Quando la massima correzione Δh_{max}^p incontrata risulta minore di un certo valore ε , i cicli di calcolo sulle righe e sulle colonne del dominio vengono arrestati e viene accettato il risultato raggiunto.

Il test di convergenza è quindi il seguente:

$$|\Delta h_{max}^p| \leq \varepsilon \quad (2.7)$$

2.5. Il trattamento degli argini

Particolare attenzione viene rivolta al processo di interpolazione dell'altezza d'acqua di passaggio fra due celle limitrofe, per simulare processi di incipiente esondazione, di sormonto degli argini o del semplice passaggio di acqua su un terreno inclinato.

La rappresentazione topografica a gradoni del fondo del dominio di calcolo può non essere sempre idonea alla rappresentazione del comportamento fisico reale del moto dell'acqua durante una inondazione. Infatti l'altezza d'acqua di passaggio fra due celle limitrofe HN, cioè la profondità nota all'inizio del processo iterativo, è valutata come media delle profondità dei due centri cella (Molinari et al., 1994). Con questo criterio si rende uniforme la pendenza del piano campagna; tuttavia esistono situazioni per le quali la conformazione a gradoni del fondo del dominio di calcolo raffigura un reale profilo del suolo (casi di incipiente esondazione o casi di caduta da un argine). In queste condizioni la valutazione della altezza di passaggio HN, come precedentemente descritta, non ha più alcuna giustificazione fisica e l'altezza di passaggio dell'acqua non deve essere valutata utilizzando le quote di fondo delle due celle limitrofe, ma considerando opportunamente la sola altezza della cella con quota di fondo più elevata. Queste condizioni danno origine a diversi criteri di valutazione di HN che discendono da differenti stime della quota di fondo ZFFON e della quota di pelo libero media fra le due celle.

Poiché l'utilizzo di parametri di controllo, per la valutazione dei differenti criteri da adottare, può generare delle discontinuità nella stima dei successivi valori di HN,

dovute a brusche discontinuità nella valutazione della quota di fondo ZFFON fra le due celle, i valori di quest'ultima grandezza vengono calcolati pesando le due valutazioni possibili in funzione dei parametri di controllo stabiliti.

Per effettuare i confronti fra i valori vengono utilizzati i parametri DH e HN rispettivamente uguali al modulo della differenza fra le altezze d'acqua presenti sulle due celle contigue (che può essere considerata nel caso di pelo libero suborizzontale una misura della differenza fra le quote di fondo delle due celle) e la media fra le altezze d'acqua presenti sulle due celle.

Il rapporto DH/HN fornisce una misura della disuniformità dell'altezza d'acqua, e del fondo, nel caso di pelo libero suborizzontale. Questo rapporto viene pertanto utilizzato dal codice per decidere se ci troviamo di fronte ad una soglia o se, in caso contrario, la quota di fondo fra le due celle deve essere ricavata come di norma per interpolazione. Il confronto viene effettuato utilizzando il parametro VMRH, definito fra i dati di input del codice come rapporto fra la altezza d'acqua minore e quella maggiore delle due celle.

In particolare:

- 1) se $DH/HN \geq VMRH$, la differenza di tirante è elevata rispetto all'altezza media di passaggio dell'acqua; pertanto si ritiene che essa sia dovuta alla grande irregolarità del fondo e quindi si è in presenza di una soglia (cioè che non sia dovuta alla raffigurazione a gradoni del suolo, ma ad una effettiva irregolarità), e la quota di fondo fra le due celle viene scelta identificando il valore più elevato delle due quote di fondo, cioè:

$$ZFFON = ZFMAX = \max(ZF(I,J), ZF(I-1,J));$$

- 2) se $DH/HN < VMRH$, si ritiene che la soglia, ridotta rispetto all'altezza media di passaggio dell'acqua fra le due celle, sia dovuta esclusivamente alla raffigurazione a gradoni della topografia del suolo e la quota di fondo tra le due celle dovrebbe essere ricavata mediando tra le due quote di fondo delle celle stesse, cioè:

$$ZFFON = \left(1 - \frac{DH}{VMRH}\right) * ZFMED + \left(\frac{DH}{VMRH}\right) * ZFMAX$$

La formula precedente assicura la continuità nella valutazione di ZFFON nel caso si passasse dalla condizione 1) alla 2). Un'eventuale discontinuità, infatti, potrebbe innescare fittizie oscillazioni delle portate e dei livelli, difficilmente controllabili dal punto di vista numerico.

Il significato di ogni termine può essere meglio compreso attraverso il seguente schema:

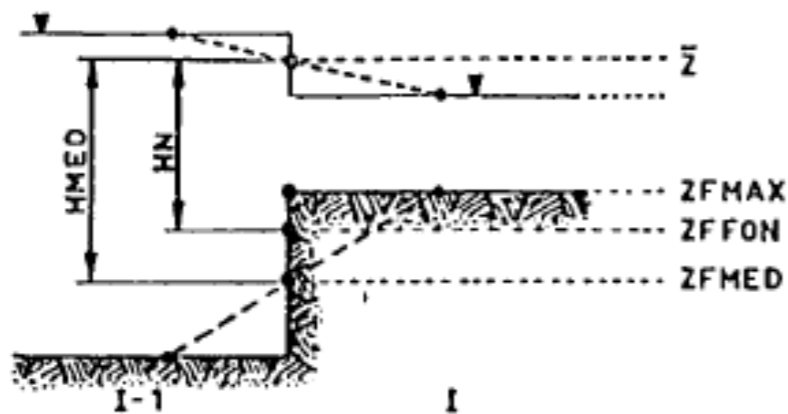


Figura 2.3. Trattamento degli argini: schema considerato. Tratto da Molinaro, Di Filippo e Ferrari in "Modelling of Flood Wave Propagation Over Flat Dry Areas of Complex Topography in Presence of Different Infrastructures" (1994).

Facendo riferimento allo schema sopra riportato, dove è illustrato il significato di ogni termine, se H è la profondità dell'acqua in corrispondenza del centro di una cella, la profondità media dell'acqua è:

$$HMED = 0.5 * [H(I,J) + H(J - 1,J)]$$

mentre la quota media del pelo libero è pari a:

$$\bar{Z} = ZFMED + HMED$$

e l'altezza di passaggio dell'acqua fra le due celle risulta pari a:

$$HN = \bar{Z} - ZFFON$$

Se il valore di HN è minore o uguale a 0 allora la portata viene posta pari a 0. Da applicazioni pratiche si evince che il valore ottimale di $VMRH$ varia in un intervallo compreso tra 0.25 e 0.5.

Le possibili situazioni considerate dal codice sono riportate nella seguente figura:

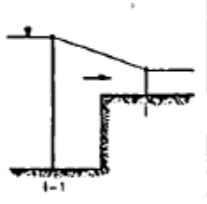
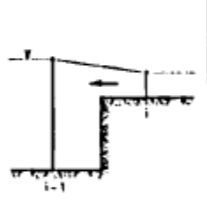
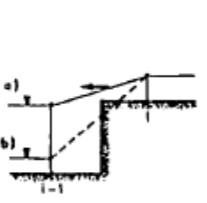

1) GROWING FLOOD		$\frac{\partial Z}{\partial x} < 0, q > 0, \frac{\partial ZF}{\partial x} \geq 0$ $HN = Z - ZFFON$ $Z = \frac{Z_i + Z_{i-1}}{2}$
2) FLOOD GROWING AFTER A DECREASING PHASE		$\frac{\partial Z}{\partial x} < 0, q < 0, \frac{\partial ZF}{\partial x} \geq 0$ $HN = Z - ZFFON$ $Z = \frac{Z_i + Z_{i-1}}{2}$
3) DECREASING FLOOD AND ALSO PROPAGATION ON AN ALMOST DRY BOTTOM OR WATER FALL		$\frac{\partial Z}{\partial x} > 0, q \leq 0, \frac{\partial ZF}{\partial x} \geq 0$ $HN = Z - ZFFON$ $HN < \frac{h_i}{2}$ $HN = \frac{h_i}{2}$
4) BEGINNING OF THE DECREASING PHASE OF THE FLOOD		$\frac{\partial Z}{\partial x} > 0, q > 0, \frac{\partial ZF}{\partial x} \geq 0$ $HN = Z - ZFFON$ $Z = \frac{Z_i + Z_{i-1}}{2}$

Figura 2.4. Situazioni considerate dal codice. Tratto da Molinaro, Di Filippo e Ferrari in “Modelling of Flood Wave Propagation Over Flat Dry Areas of Complex Topography in Presence of Different Infrastructures” (1994). - 1) Fase di piena crescente; 2) Fase di piena crescente dopo una fase di decrescita; 3) Fase di piena decrescente e propagazione su un tratto asciutto o caduta d’acqua; 4) Inizio fase decrescente della piena.

2.6. Le componenti del modello

Il codice proposto, scritto in Fortran, richiede per l’inserimento dei dati di input la creazione di quattro differenti file, ciascuno relativo ad una tipologia di informazione in ingresso: il primo relativo al terreno, il secondo che riguarda il dominio, il terzo relativo alle condizioni iniziali ed al contorno necessarie per la soluzione delle equazioni utilizzate ed infine, in aggiunta a quanto proposto da Molinaro et al., un

quarto opzionale nel caso si voglia tenere conto della variabilità nel tempo del coefficiente di scabrezza. Vediamo nel dettaglio le informazioni contenute in ciascuno di questi file:

1) TERRENO: contiene le quote di fondo di ciascuna cella compresa nel dominio in studio. È composto da tre diversi tipi di schede:

- la scheda n.1 ha il compito di abbinare ad ogni cella della griglia di calcolo sia la quota di fondo che un codice numerico. Quest’ultimo identifica gruppi di celle (aree omogenee) del dominio in studio, caratterizzati da alcuni parametri caratteristici del calcolo definiti nelle schede del file “CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO”;
- la scheda n.2 contiene le quote di fondo riferite alle celle della riga j-esima;
- la scheda n.3 contiene i codici numerici dell’aree omogenee riferite alle celle della riga j-esima.

Le schede permettono all’utente di gestire autonomamente il file “TERRENO”, qualora sorgesse l’esigenza di modificare localmente la quota di fondo o il codice numerico dell’area omogenea di appartenenza di una o più celle.

La numerazione delle righe e delle colonne della griglia è riferita alla cella (numero di riga e numero di colonna uguale a 1) posta in basso a sinistra nella griglia.

1	512	512																	
	0.76																		
163	2	510	513																
	1.01			0.98		0.80		-2.52											
161	163	163	163																
3	508	514																	
	1.11		1.31		1.13		0.83		0.79		0.27		-2.52						
161	163	163	163	163	163	160													
4	507	515																	
	1.30		0.98		1.22		1.02		0.79		0.69		0.27		-0.28				
	-2.52																		
161	163	163	163	163	163	160	161												
5	505	515																	
	2.30		1.96		1.54		0.95		0.97		0.95		0.68		0.60				
	0.32		-0.29		-2.52														
161	177	163	163	163	163	163	163	160	160										
6	504	516																	
	1.78		1.77		1.92		1.86		1.02		0.95		0.93		0.67				
	0.60		0.12		-0.27		-0.33		-2.52										
161	177	177	163	163	163	163	163	163	160	160	160								
7	502	516																	
	1.47		1.70		1.27		1.64		1.90		1.64		0.99		1.01				
	1.08		0.67		0.51		0.11		-0.31		-0.29		-2.52						
161	177	177	163	163	163	163	163	163	163	160	160	160							
8	501	517																	
	1.23		1.26		1.29		2.00		1.15		1.38		1.50		1.32				
	1.08		0.86		0.79		0.41		0.31		-0.25		-0.26		-0.30				
	-2.52																		
161	177	177	177	177	177	163	163	163	163	163	163	160	160	160					
160																			
9	499	518																	
	1.15		0.89		1.26		1.48		0.84		0.86		1.08		1.72				
	1.64		1.40		1.45		1.05		0.71		0.33		0.18		-0.18				
	-0.23		-0.27		-2.52		-2.52												
161	177	177	177	177	177	177	177	163	163	163	163	163	163	163	160				
160	160	160	161																
10	498	518																	
	1.73		0.95		1.15		1.31		2.77		0.59		0.89		1.37				
	1.14		1.09		1.37		1.90		1.21		0.51		0.19		0.06				
	-0.31		-0.26		-2.52		-2.52		-2.52										
161	177	177	177	177	177	177	177	163	163	163	163	163	163	163	163				

Figura 2.5. Esempio di file "TERRENO" di FLORA-2D.

2) DOMINIO: contiene la definizione della griglia di calcolo a celle rettangolari e la definizione del contorno del dominio da studiare. È composto da cinque diversi tipi di schede:

- la scheda n.1 permette all'utente di fornire al codice FLORA-2D la prima definizione del dominio di calcolo ricorrendo a dei punti sulla griglia che delimitano in senso antiorario il dominio in studio;
- la scheda n.2 permette di definire le ascisse che definiscono la griglia del dominio di calcolo in studio;
- la scheda n.3 permette di definire le ordinate che definiscono la griglia del dominio di calcolo in studio;

- le schede n.4 e n.5 permettono all'utente di fornire al codice FLORA-2D la seconda definizione del dominio di calcolo, basata sull'individuazione di gruppi di celle contigue, detti tratti, per ogni riga (scheda 4) e per ogni colonna (scheda 5);

Anche in questo caso le diverse schede permettono all'utente di gestire autonomamente il file "DOMINIO", qualora sorgesse l'esigenza di modificare localmente il dominio di calcolo o le dimensioni della griglia.

Anche nel file "DOMINIO" la numerazione delle righe e delle colonne della griglia è riferita alla cella (numero di riga e numero di colonna uguale a 1) posta in basso a sinistra nella griglia.

21	1			
482	0	527	3	
22	1			
480	0	527	3	
23	1			
479	0	528	3	
24	1			
477	0	529	3	
25	1			
476	0	529	3	
26	1			
474	0	530	3	
27	1			
473	0	531	3	
28	1			
471	0	531	3	
29	1			
470	0	532	3	
30	1			
468	0	533	3	
31	1			
467	0	533	3	
32	1			
465	0	534	3	
33	1			
464	0	535	3	
34	1			
462	0	535	3	
35	1			
461	0	536	3	

Figura 2.6. Esempio di file "DOMINIO" di FLORA-2D.

3) CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO: contiene i valori iniziali imposti a tutte le celle del dominio per le portate e per il livelli o le altezze d'acqua (condizioni iniziali), le tabelle con gli andamenti imposti alle suddette grandezze sulle celle di contorno aperto del dominio in studio (condizioni al contorno) e i parametri caratteristici del calcolo (coefficiente di scabrezza di Manning, porosità, ecc.). È composto da nove diversi tipi di schede:

- la scheda n.1 contiene le informazioni che riguardano gli istanti di inizio e fine simulazione, il passo di integrazione temporale costante e l'intervallo di tempo per il quale stampare i dati elaborati dal codice;
- la scheda n.2 riporta il valore di confronto per stabilire se durante la simulazione del fenomeno di inondazione si possa ritenere che le differenze di quota del suolo fra due celle limitrofe siano dovute a golene o argini oppure a una pendenza del suolo pressoché uniforme. Inoltre contiene il valore minimo di altezza d'acqua per riconoscere le celle della griglia come bagnate ed il valore di tolleranza usato durante il calcolo iterativo per verificare l'avvenuta convergenza del sistema. In essa è indicato anche il numero massimo di iterazioni oltre il quale il codice arresta il processo iterativo di convergenza e ritiene raggiunta la soluzione del sistema per il corrente passo temporale;
- la scheda n.3 consente di escludere o utilizzare l'aggiornamento automatico del dominio di calcolo in studio, in funzione dell'allagamento e del prosciugamento delle celle della griglia. Escludendo le celle asciutte dal calcolo la soluzione risulta più rapida. In tal modo si può ottenere un risparmio di tempo più o meno considerevole in funzione del

tipo di studio e del numero di celle escluse dal calcolo ad ogni passo temporale. Quando il numero di celle inondate rimane pressoché costante e copre quasi interamente il dominio definito, la soluzione risulterà più rapida evitando di attivare la procedura di ridefinizione dell'area allagabile;

- la scheda n.4 indica ogni quanti passi di integrazione temporale si debba stampare il file di controllo VOLUMI che contiene i dati di controllo ottenuti dal bilancio dei volumi. Essa inoltre stabilisce la stampa o meno delle matrici delle quote di fondo e dei codici delle aree omogenee, della situazione istantanea iniziale del calcolo e, per ogni situazione istantanea, delle matrici e dei vettori che definiscono il dominio allagato per tratti (insiemi di celle contigue) di righe e di colonne;
- la scheda n.5 permette di abbinare ad ogni codice numerico che identifica gruppi di celle (aree omogenee) del dominio di calcolo, i valori di alcuni parametri caratteristici per ognuna di queste aree (coefficiente di scabrezza di Manning, porosità urbana lineare e porosità urbana areale);
- la scheda n.6 permette di definire la tipologia delle tabelle delle condizioni al contorno. Ogni tabella è associata ad un codice numerico diverso da 0 abbinato a quelle parti del contorno per le quali è prevista una condizione al contorno diversa dal flusso nullo. L'attribuzione di tale codice numerico è effettuata con le schede del file "DOMINIO". I tipi di condizione al contorno che si possono inserire sono 4 e precisamente:
 - 1) $q(t)$: flusso entrante assegnato;
 - 2) $q(t)$: flusso uscente assegnato;

- 3) h(t): altezza assegnata;
- 4) q(h): portata uscente in funzione dell'altezza;
- la scheda n.7 permette di inserire i valori delle tabelle delle condizioni al contorno;
- la scheda n.8 permette di definire le celle per le quali si desidera conoscere l'evoluzione temporale dell'altezza d'acqua;
- La scheda n.9 contiene i dati iniziali per il calcolo, e ha significato solo se non si devono considerare i risultati ottenuti da una precedente esecuzione del codice.

```

1 3 0 0 1 ! altezza a mare alla foce
2 1 2 2 0 ! portata in ingresso
3 4 3 3 0 ! scala di deflusso
3
1 0 2 ! Tabella per il tratto n. 1 : altezza alla foce
0.0 0.96 252000.0 0.96
2 0 71 ! Tabella per il tratto n. 2: portata entrante per ogni metro di bordo cella
0.0 0.06 3600.0 0.06 7200.0 0.10 10800.0 0.19
14400.0 0.29 18000.0 0.34 21600.0 0.39 25200.0 0.56
28800.0 0.91 32400.0 1.40 36000.0 1.97 39600.0 2.62
43200.0 3.30 46800.0 3.97 50400.0 4.80 54000.0 5.87
57600.0 7.13 61200.0 8.56 64800.0 10.14 68400.0 11.57
72000.0 13.05 75600.0 14.92 79200.0 16.55 82800.0 17.96
86400.0 19.67 90000.0 21.67 93600.0 23.55 97200.0 24.85
100800.0 25.33 104400.0 25.06 108000.0 24.22 111600.0 23.03
115200.0 21.61 118800.0 20.05 122400.0 18.46 126000.0 16.91
129600.0 15.44 133200.0 14.02 136800.0 12.63 140400.0 11.29
144000.0 10.10 147600.0 9.12 151200.0 8.38 154800.0 7.82
158400.0 7.38 162000.0 7.04 165600.0 6.74 169200.0 6.48
172800.0 6.26 176400.0 6.05 180000.0 5.87 183600.0 5.70
187200.0 5.55 190800.0 5.42 194400.0 5.29 198000.0 5.18
201600.0 5.08 205200.0 4.99 208800.0 4.89 212400.0 4.77
216000.0 4.62 219600.0 4.46 223200.0 4.31 226800.0 4.20
230400.0 4.10 234000.0 3.98 237600.0 3.82 241200.0 3.63
244800.0 3.46 248400.0 3.30 252000.0 3.13
3 1 16 ! Tabella per il tratto n. 3
0.0 0.0 0.10 0.1 0.16 0.2 0.21 0.3
0.29 0.5 0.47 1.0 0.61 1.5 0.74 2.0
0.97 3.0 1.37 5.0 2.17 10.0 3.44 20.0
6.34 50.0 10.06 100.0 15.98 200.0 19.51 270.0
4
1 766 536
2 904 579
3 909 485
4 711 876
0 0.0 0.0 0.0
0 0.1
    
```

Figura 2.7. Esempio di file "CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO" di FLORA-2D.

4) TABELLE SCABREZZE: contiene i dati relativi alle tipologie vegetative presenti (rigide o flessibili). Questo file va creato nel caso in cui si decide di considerare la variabilità del coefficiente di scabrezza nel tempo, altrimenti si inserisce un valore

costante del coefficiente n di Manning all'interno della scheda delle condizioni iniziali e al contorno.

Per le aree ricoperte da vegetazione rigida, è necessario che le tabelle che mettono in relazione, attraverso l'applicazione dell'equazione di Petryk e Bosmajian (1.4), il coefficiente di Manning con il tirante vengano costruite prima della simulazione e per ogni tipologia arborea individuata (figura 2.8).

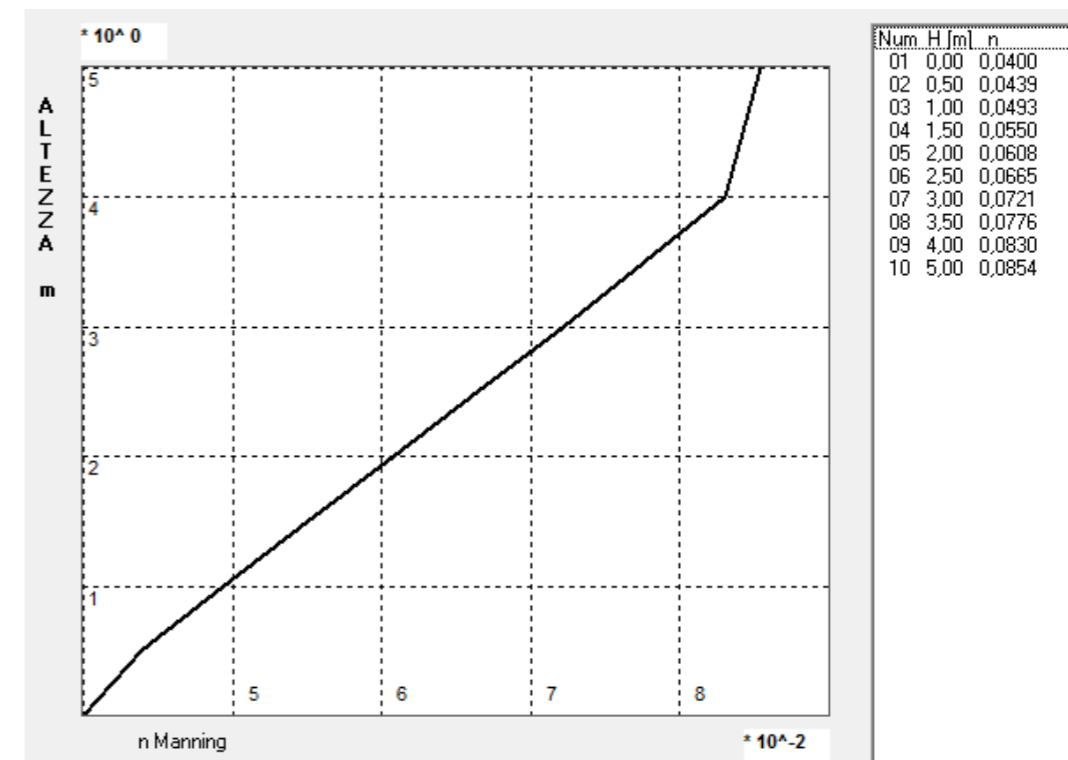


Figura 2.8. Esempio di tabella delle scabrezze nel caso di vegetazione rigida prodotta dal modello FLORA-2D.

Per quanto riguarda le aree ricoperte da vegetazione flessibile nella fase di preprocessing vengono create le tabelle contenenti le informazioni necessarie all'applicazione delle formule di Freeman et al. nel caso di vegetazione totalmente sommersa (1.7) e parzialmente sommersa (1.8). Durante la computazione la stima del

coefficiente di scabrezza n di Manning è eseguita istante per istante sulla base dei valori del tirante, della velocità e della pendenza della linea dell'energia.

Scabrezza di base	.040
Altezza pianta	.30
Diametro tronco	.003
Altezza chioma	.30
Larghezza chioma	.30
Piante al mq	12.00
Modulo Elasticità x As	628020.03
Ai	.09

Figura 2.9. Esempio di tabella delle scabrezze nel caso di vegetazione flessibile prodotta dal modello FLORA-2D.

Nella figura seguente si riporta un diagramma di flusso che rappresenta in maniera semplificata il funzionamento del modello per quel che riguarda l'attribuzione del coefficiente di scabrezza.

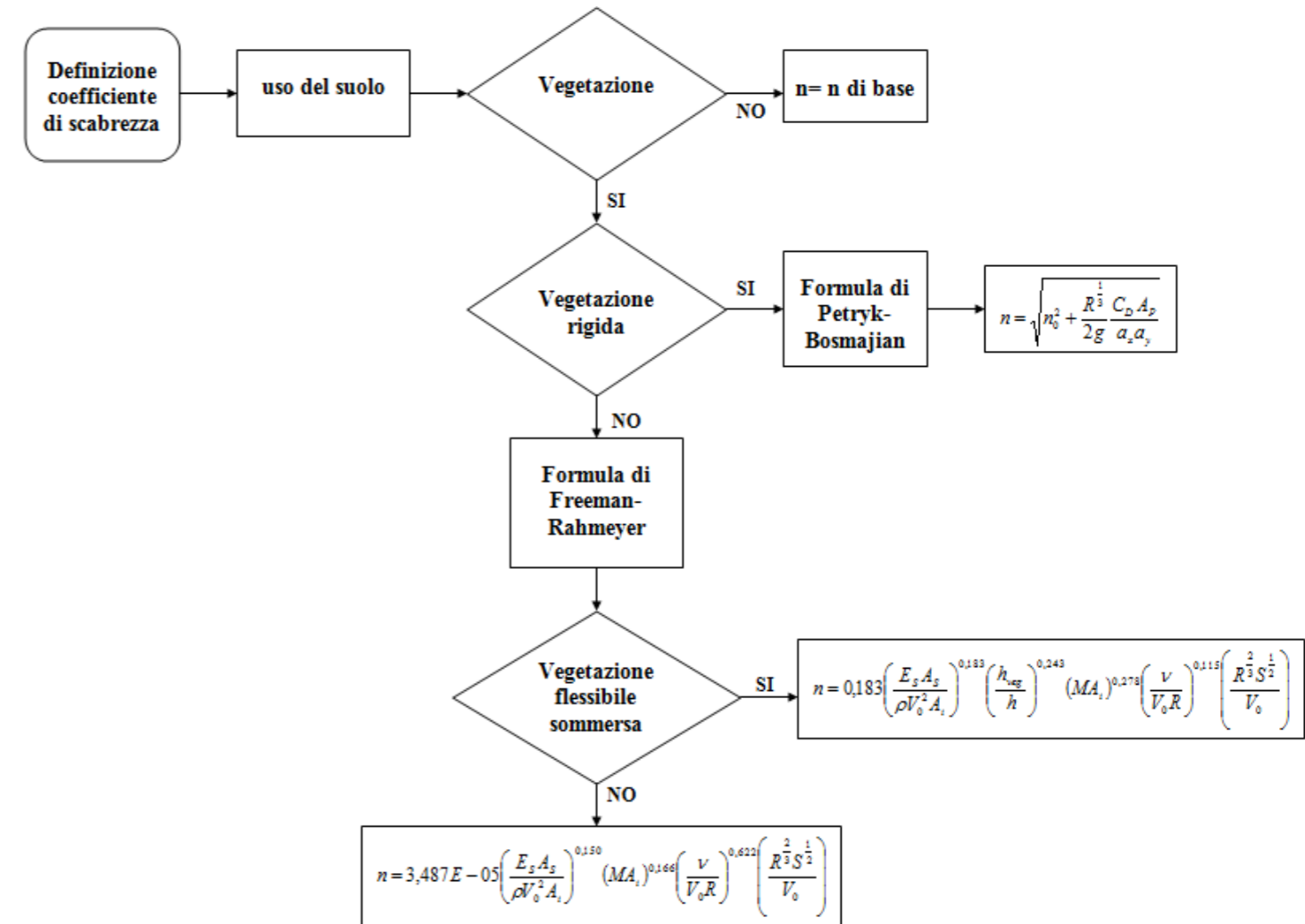


Figura 2.10. Schema di calcolo del coefficiente di scabrezza nel modello FLORA-2D.

Per facilitare l'esecuzione della simulazione, è stata creata un'interfaccia grafica che consente di richiamare tutti i file di input. Una volta avviata la simulazione è possibile verificare il tempo trascorso dall'inizio della computazione e l'istante temporale a cui è giunta.



Figura 2.11. Interfaccia grafica del modello FLORA-2D.

Il codice fornisce in output tutta una serie di informazioni quali la definizione del dominio allagato, l'identificazione delle celle allagate, l'altezza d'acqua in ogni cella, la portata sui lati di ogni cella, il numero di Froude, l'inviluppo dei massimi dell'altezza d'acqua e della portata fino all'istante di tempo considerato, le evoluzioni temporali dell'altezza d'acqua, della velocità e del coefficiente di scabrezza nelle celle del dominio scelte in fase di input, le informazioni su come la soluzione è riuscita a giungere a convergenza ad ogni passo temporale, il bilancio dei volumi entranti, uscenti

ed accumulati per ogni passo temporale. Attraverso quest'ultimo controllo è possibile verificare la correttezza e la coerenza dei parametri di input della simulazione.

Infine, per la creazione dei file di input e per l'esportazione e la lettura delle schede di output del modello in ambiente GIS, si sono create delle apposite utility che consentono la loro conversione in formati compatibili con i software GIS:

- GRID TO FLORA-2D: partendo dal file del terreno creato in ambiente GIS nel formato raster ASCII grid (vedi http://en.wikipedia.org/wiki/Esri_grid) e nel quale ad ogni cella è associata una quota, permette di ricavare il file "TERRENO" nel formato richiesto dal codice. La stessa utility permette di ricavare il file "TABELLE SCABREZZE" a partire da un file di tipo raster ASCII grid nel quale ad ogni cella è associato il codice dell'area omogenea e da un file di testo nel quale per ogni tipologia vegetativa rigida o flessibile sono elencate le caratteristiche necessarie per l'applicazione delle formule di letteratura;
- CREADOM: partendo dal file del dominio creato in ambiente GIS nel formato raster ASCII grid e nel quale ad ogni cella del contorno è associato un numero identificativo del tipo di condizione al contorno presente, permette di ricavare il file "DOMINIO" nel formato richiesto dal codice;
- WRITE OUTPUT: esporta in ambiente GIS nel formato SHAPE file e geo TIFF i risultati della simulazione per ogni istante temporale per il quale è stato chiesto al codice di stampare i dati elaborati, nonché per il file che contiene i dati dell'inviluppo dei massimi.

3. Strumenti GIS Open Source

3.1. Introduzione

Per la predisposizione dei dati di input del modello FLORA-2D e per la visualizzazione dei risultati delle simulazioni idrauliche si è utilizzato uno strumento GIS Open Source, il Quantum GIS.

La scelta del GIS da utilizzare è stata indirizzata verso l'Open Source in coerenza con l'idea di rendere di libero utilizzo lo stesso modello FLORA-2D.

3.2. Il software open source o software libero

Il software libero è attualmente conosciuto in ambito internazionale come Free Open Source Software (FOSS) o Free Libre Open Source Software (FLOSS), ed è il risultato di 30 anni di sviluppo, conferenze e progetti portati avanti da singoli sviluppatori, imprese, compagnie e agenzie internazionali, università e istituti di ricerca. Mentre nel mondo anglosassone il termine Free Software può significare sia software libero sia software gratuito, nella lingua italiana non ci sono dubbi: il software libero implica che il suo utilizzo, il suo sviluppo e la sua distribuzione sono sottoposti a regole diverse da quelle del software non libero o software proprietario.

Il concetto di software libero non è nuovo in ambito informatico, infatti i primi computer in circolazione avevano un costo elevato e solo centri di ricerca avanzati potevano affrontarne l'acquisto e la manutenzione. Questi sistemi venivano gestiti da software che veniva normalmente distribuito senza costo e condiviso tra sviluppatori ed utenti. Il codice scritto dagli utenti era a sua volta disponibile per altri utenti che lo avessero voluto usare o migliorare.

Con la diffusione dei computer all'esterno degli ambiti di ricerca e sviluppo, tra la seconda metà degli anni '70 e la prima metà degli anni '80, venne proposto un modello differente dal precedente, che prevedeva che il software, ovvero l'insieme di istruzioni impartite a un computer per eseguire operazioni, avesse un proprietario che potesse vendere copie agli utenti che sottoscrivono una licenza che definisce i termini di utilizzo del software. Negli accordi stipulati all'acquisto del software tra il proprietario del software e l'utente finale vengono di solito specificate il numero di installazioni possibili e obblighi sul tipo di utilizzo e di distribuzione del software.

Questo modello, che implica un accesso esclusivo al codice sorgente dei programmi, ha portato alla diffusione della pratica dell'esternalizzazione, o outsourcing, dello sviluppo del software al di fuori degli ambienti dove veniva normalmente utilizzato ed ottimizzato.

In questo periodo, programmatori e ricercatori interni a istituzioni che avevano sempre avuto modo di migliorare il software in collaborazione con i fornitori si trovarono in difficoltà. In caso di problemi, ogni collaborazione che prevedesse l'accesso al codice sorgente di un programma doveva essere fatta nei termini di un contratto di esclusività (Non Disclosure Agreement, NDA) che impediva allo sviluppatore di utilizzare il proprio contributo in altri ambiti.

In questo contesto, un ricercatore del Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Boston decise di interrompere la propria carriera per dedicarsi a tempo pieno a un progetto che permettesse a tutti di avere maggiori libertà in termini di sviluppo e di fruizione del software. Così Richard M. Stallman, nel 1984, fondò la Free Software Foundation con lo scopo di sviluppare e promuovere un sistema operativo corredato di strumenti di sviluppo che permettesse di generare altro software. Al fine di rendere il software accessibile e sviluppabile liberamente, la Free Software Foundation in collaborazione con un pool di esperti di legge ideò un sistema di licenze che utilizza il copyright per tutelare sia gli sviluppatori che gli utenti finali.

All'interno del testo delle licenze pubblicate dalla Free Software Foundation (FSF) si trova la definizione di cosa si intende per programma che sia identificabile come software libero. Per software libero si intende quindi un programma che soddisfa i seguenti quattro punti:

- il software è utilizzabile per qualsiasi scopo in tutte le sue funzionalità;
- il software può essere copiato e distribuito, senza limiti nel numero di installazioni possibili;
- il codice sorgente del software deve essere accessibile;
- si possono apportare migliorie al software.

Il termine Open Source è nato verso la fine degli anni '90 del secolo scorso, ad opera di Bruce Perens. Insieme ad Eric Raymond, lo sviluppatore fondò la Open Source Initiative (OSI) finalizzata soprattutto alla promozione e certificazione del software libero in campo industriale, in un momento storico in cui il termine anglosassone free software poteva creare diffidenza. A partire dal 2007, la diffusione del termine Free Open Source Software ingloba il lavoro e le visioni della FSF e della OSI.

3.3. I GIS open source

I Geographical Information Systems (GIS) sono da tempo uno strumento insostituibile nella pianificazione territoriale e ambientale. Dopo una fase dominata dai desktop GIS proprietari, negli ultimi anni, grazie a interfacce utente sempre più user-friendly, i GIS Open Source stanno conoscendo una diffusione sempre maggiore nelle amministrazioni pubbliche, negli enti di ricerca e nella professione.

L'utilizzo dei software liberi è preferibile rispetto a quello dei più diffusi GIS commerciali per diversi motivi:

- 1) sono basati su standard aperti e orientati alla più ampia interoperabilità possibile, e quindi svincolati da formati proprietari;
- 2) aiutano a ridurre i costi e a liberarsi da strategie dei produttori di software commerciali che costringono a rincorrere aggiornamenti continui e costosi;
- 3) sono più sicuri nei confronti di trojans, backdoor, spyware e virus;
- 4) il software è liberamente modificabile ed è quindi possibile personalizzarlo secondo le proprie esigenze.

Fra i diversi software disponibili quelli più utilizzati sono:

- *gvSIG (Generalitat Valenciana – Sistema d'Informació Geogràfica)*: è un sistema informativo geografico Open Source sviluppato in Java e distribuito con licenza GNU General Public License. Esso è caratterizzato da un'interfaccia grafica e di funzionalità molto simili ai più comuni desktop GIS commerciali, e

supporta tutti i più diffusi formati vettoriali (shp, dxf, dgn, dwg) e raster (ecw, mrsid, jpeg, jp2, tiff, geotiff, png, gif). Dispone di un'ampia gamma di strumenti di geoprocessing e di editing di immagini telerilevate. Con gvSIG è possibile lavorare sia su dati locali, sia con dati remoti secondo gli standard OGC (wms, wcs, wfs);

- *GRASS (Geographic Resources Analysis Support System)*: è un Sistema Informativo Geografico Open Source distribuito con licenza GNU General Public License; può essere acquisito, modificato e ridistribuito liberamente nei termini della licenza GNU gpl. Offre funzionalità avanzate di gestione, visualizzazione e modellizzazione dei dati geografici. Il GRASS rappresenta il riferimento per chi usa il GIS per risolvere una vasta quantità di problemi spaziali, specie se si devono elaborare grandi quantità di dati in catene di elaborazione particolari;
- Quantum GIS: è un'applicazione GIS Open Source caratterizzato da interfaccia utente e funzionalità di base molto simili ai più comuni desktop GIS commerciali, che può essere utilizzato con facilità da chi ha familiarità con questi ultimi. QGIS utilizza un plugin di GRASS per le funzionalità più avanzate.

In questo lavoro si è utilizzato come strumento GIS Open Source proprio il Quantum GIS che si è rivelato molto utile sia in fase di input per la creazione della geometria di calcolo, sia in fase di output per la realizzazione delle mappe.

3.4. Il software Quantum GIS

Il Quantum GIS o QGIS nasce nel 2002 quando Gary Sherman inizia a sviluppare un GIS per visualizzare dati di tipo PostGIS (estensione spaziale per PostgreSQL rilasciata l'anno precedente da Refraction Research). Sherman pubblica su SourceForge (una piattaforma web per sviluppare software Open Source in modo collaborativo) il suo progetto e da qui inizia l'ascesa di QGIS.

Numerosi sviluppatori si sono aggiunti al progetto e le release di QGIS si sono succedute con notevole velocità, aumentando stabilità e potenzialità. Fino al 2009 ci sono stati circa 26 rilasci di nuove release di QGIS. Nel 2009 però QGIS raggiunge la maturità con una release, la 1.0.0, che sviluppa una API (Application Programming Interface) stabile e utilizzabile da utenti esperti per sviluppare propri strumenti con linguaggi come Python e C++.

QGIS ha una politica di rilascio di versioni stabili (1.0.0, 1.4.0, 2.0.0) per le quali prevede stabilità delle API per almeno 2 anni dalla uscita della release. Il "release team" prevede poi delle versioni intermedie per le quali si mantiene la compatibilità con le API precedenti, ma queste vengono modificate (estese e aggiornate). Attualmente, il "release team" sta lavorando a nuove versioni che risolvono molti problemi ereditati dalle versioni precedenti e introducono molte nuove funzionalità, come ad esempio la proiezione al volo dei dati di tipo raster.

QGIS è un software semplice da usare che funziona in ambiente Linux, Unix, BSD (incluso Mac OSX), e Windows. QGIS supporta dati vettoriali, raster e database.

Il software permette di visualizzare, interrogare, modificare carte, creare stampe ed effettuare analisi spaziali. Usato come interfaccia del più potente software GIS Open Source GRASS, permette di realizzare le più disparate e complesse operazioni di analisi geografica quali la modellistica spaziale e l'analisi di immagini satellitari.

Le principali caratteristiche sono:

- a) visualizzazione e sovrapposizione di dati vettoriali e raster in vari formati e proiezioni senza necessità di conversione ad un formato proprio. I formati supportati includono:
 - formati vettoriali supportati dalla libreria OGR (ad es. ESRI shapefile, MapInfo, GML, KML, GPX, DGN, ecc.);
 - database PostGIS e Spatialite;
 - formati raster supportati dalla libreria GDAL (ad es. geoTIFF, JPEG e, tramite le opportune librerie proprietarie, ECW, MrSID, ArcSDE, Oracle, ecc.);
 - dati GRASS, sia raster che vettoriali;
 - servizi standard OGC (WMS, WFS, WFS-T);
- b) creazione di mappe ed esplorazione spaziale dei dati con un'interfaccia grafica user friendly. Alcuni dei principali tools includono:
 - riproiezioni al volo di livelli vettoriali;
 - conversione fra formati, e fra differenti proiezioni, sia raster che vettoriali;
 - identificazione e selezione di elementi geometrici;
 - editing, visualizzazione e ricerca di attributi;
 - cambiamento della simbologia raster e vettoriale;

- gestione avanzata del layout di stampa;
 - salvataggio e ripristino dei progetti;
- c) creazione, modifica e esportazione di dati spaziali, utilizzando:
 - tools di digitalizzazione, anche topologica e a mano libera;
 - georeferenziazione di immagini;
 - tools GPS per importare ed esportare il formato GPX, convertire fra vari formati;
 - GPS in GPX, effettuare il download/upload da un GPS, tracking live di un GPS collegato;
 - d) analisi spaziali, sia raster che vettoriali, come:
 - overlay, buffer, merge, ecc.;
 - interpolazioni;
 - algebra delle mappe;
 - analisi geomorfologica, curve di livello, prossimità, intervisibilità;
 - analisi idrologiche;
 - analisi di reti;
 - e molti altri (grazie all'integrazione con GRASS, sono disponibili oltre 250 moduli di analisi);
 - e) pubblicazione della mappa su internet tramite webGIS;
 - f) utilizzo diretto sul desktop di mappe online (Google Maps, OpenStreetMap, ecc.);
 - g) adattamento di QGIS alle proprie necessità grazie alla possibilità di aggiungere plugin personalizzati.

Uno dei punti di forza del QGIS è proprio legato al fatto che la sua architettura di base può essere rafforzata (in termini di gestione di tipologie di dati, di operazioni di calcolo, ecc.) per mezzo di comandi o gruppi di comandi (plugin) presenti nel cosiddetto “core” del sistema e distribuiti con le varie release del programma (scritti in linguaggio C++ o Python) ovvero progettati esternamente (questi sono scritti solo in linguaggio Python) e scaricabili attraverso l’apposito installatore.

I singoli plugin scaricati e poi installati possono poi essere abilitati, nel momento in cui li si vuole utilizzare, grazie al “Gestore QGIS Plugin”. Sono attualmente presenti oltre 100 plugin distribuiti tramite più di dieci archivi.

Tra di essi si rivelato molto utile, per la visualizzazione degli output del modello FLORA-2D, oltre alle principali funzionalità presenti nel software il plugin “Vector Field Renderer” attraverso il quale è possibile visualizzare, sulla base dei vettori velocità, quali sono le direzioni del flusso.

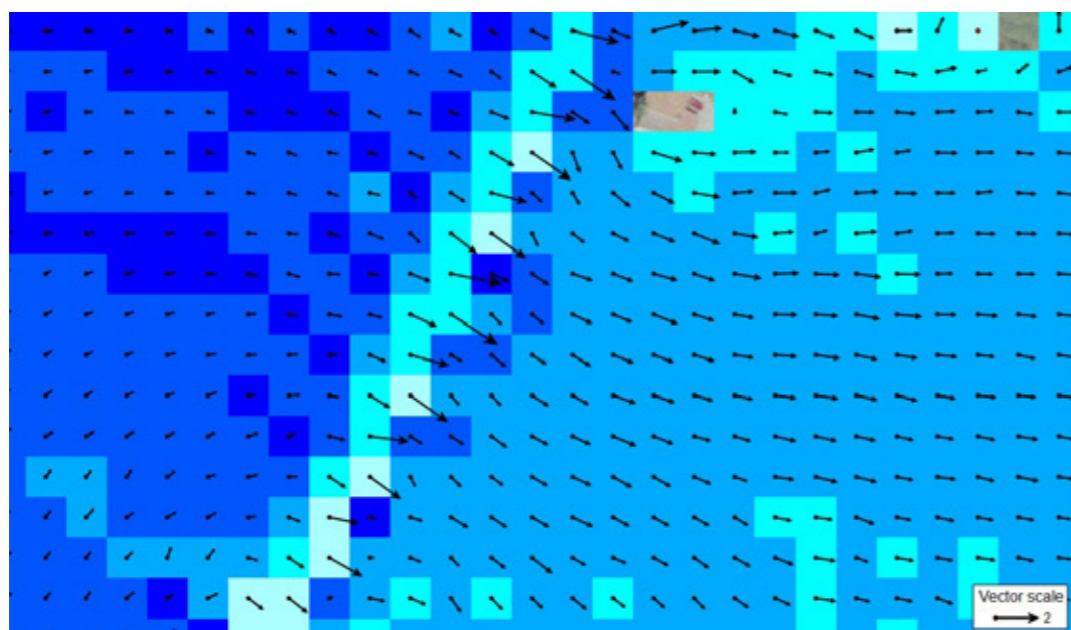


Figura 3.1. Visualizzazione in Quantum GIS dei risultati della simulazione idraulica con FLORA-2D in termini di vettori velocità utilizzando il plugin “Vector Field Renderer”.

4. L’area di studio

4.1. Introduzione

L’applicazione del modello FLORA-2D è stata realizzata considerando un’area di circa 80 km² in corrispondenza della foce del Fiume Bradano. Le sue caratteristiche morfologiche di area fortemente pianeggiante, il grande numero di dati raccolti durante le campagne di rilievo che si sono susseguite negli ultimi anni, il modello digitale del terreno costruito dal rilievo laser-scan del 2006 e le numerose elaborazione numeriche con diversi modelli idrodinamici hanno indirizzato la scelta verso tale area.

I cinque fiumi della costa jonica, nel tratto prossimo allo sbocco a mare assumono le caratteristiche morfologiche tipiche degli alvei incassati di pianura ed, inoltre, sono tutti intercettati sia dalla S.S. 106 jonica che dalla linea ferroviaria Taranto-Reggio Calabria.

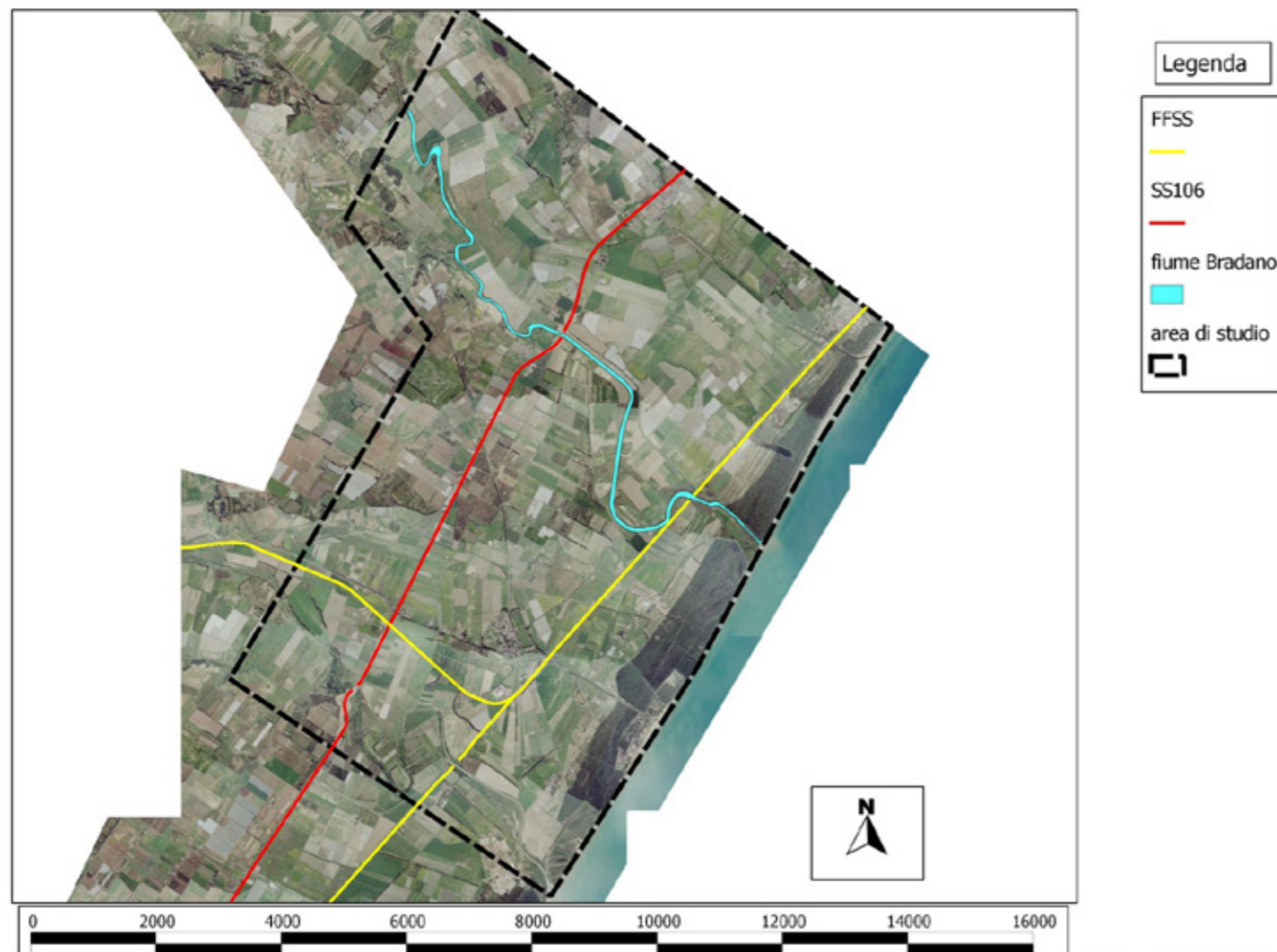


Figura 4.1. Area di studio.



Figura 4.2. Corsi d'acqua lucani che sfociano nel Mar Jonio su carta I.G.M.I. in scala 1:25000. La linea rossa rappresenta la S.S. 106 jonica mentre, quella verde, la linea ferroviaria Taranto-Reggio Calabria.

Frequenti sono stati i fenomeni di inondazione a seguito di eventi di piena verificatisi nell'area di studio. Quello più recente relativo al 1 marzo 2011 è stato preso, come specificato in seguito, a riferimento per una prima validazione del modello FLORA-2D.

4.2. Il fiume Bradano

Il fiume Bradano nasce, in prossimità dell'abitato di Monte Marcone, dalla confluenza del torrente Bradanello con fossi e torrenti che scendono dalle pendici del monte Carmine di Avigliano e la Torretta. L'asta principale è lunga circa 170 km ed il bacino idrografico ha una superficie complessiva di circa 2960 km², confinando con il bacino del fiume Basento a sud e comprendente a nord una zona della Puglia ricadente nelle province di Taranto e Bari.



Figura 4.3. Bacino del fiume Bradano.

Nonostante l'ampiezza del bacino, che è il più esteso della Basilicata, questo fiume ha la più bassa portata media annua alla foce fra i suoi consimili (poco più di 7 mc/s). Ciò è attribuibile sia alle modeste precipitazioni, fra le più basse nella regione Basilicata, che alla predominanza di terreni poco permeabili e alla conseguente povertà di manifestazioni sorgentizie. La scarsità idrica è manifestata anche dal valore della portata unitaria, pari a 2.67 l/s kmq, che è fra le minori osservate nelle stazioni

idrometriche della regione. Pur tuttavia lungo il suo percorso e quello di alcuni suoi affluenti sono state realizzate importanti opere idrauliche:

- la diga di San Giuliano, realizzata a scopo irriguo nel 1955 ed entrata in funzione nel 1961;
- la diga di Serra del Corvo sul Basentello, al confine tra Puglia e Basilicata;
- la diga di Acerenza sul fiume Bradano;
- la diga di Genzano sulla Fiumarella.

Tali invasi rientrano nello schema idrico del Basento-Bradano, destinato ad assicurare l'approvvigionamento idrico, soprattutto a scopi irrigui, della parte orientale della Regione.

Il corso d'acqua principale ha un andamento torrentizio fino ad Acerenza, dove uno sbarramento artificiale ha generato la formazione del lago di Acerenza. In questo tratto riceve in sinistra idraulica il Torrente Bradanello e in destra idraulica il Torrente Rosso.

A valle del lago di Acerenza costeggia per qualche chilometro la tratta ferroviaria Bari-Salerno ricevendo in sinistra idraulica le acque del Torrente Fiumarella. Lungo il suo percorso incontra un altro sbarramento, la diga di San Giuliano, a monte della quale riceve in sinistra idraulica il Torrente Basentello e in destra idraulica il Torrente Bilioso.

A valle della diga di San Giuliano il Bradano riceve in sinistra idraulica il contributo del Torrente Gravina e del Torrente Fiumarella. Nel tratto compreso fra il torrente Fiumarella e la diga di San Giuliano l'asta principale del Bradano in alcuni tratti assume l'aspetto di fiumara, in altri presenta un andamento meandriforme.

A valle della diga di San Giuliano defluisce in una profonda fossa calcarea, per poi riacquistare, nei pressi di Montescaglioso, le caratteristiche di alveo sovralluvionato.

Raggiunta la piana di Metaponto raccoglie il contributo del Torrente Fiumicello quindi scorre sul confine tra Puglia e Basilicata sfociando nel Mar Jonio presso Metaponto.

4.3. Il Bradano a valle della S.S. 106 Jonica

A valle della S.S: 106 Jonica il Fiume Bradano percorre circa 6.5 km prima di riversarsi nel Mar Jonio, in questo tratto il fiume assume le tipiche caratteristiche di un alveo incassato di pianura. L'andamento planimetrico è spiccatamente meandriforme, il fondo alveo è caratterizzato da limi e sabbie e la pendenza media del fondo alveo si attesta intorno allo 0.4‰.

Il Bradano è inoltre attraversato dalla S.S: 106 jonica (figura 4.4) e dalla linea ferroviaria Taranto - Reggio Calabria (figura 4.5) rispettivamente a 6.5 km e 1.5 km dalla foce.



Figura 4.4. Attraversamento della Strada Statale 106 jonica sul fiume Bradano.



Figura 4.5. Attraversamento della linea ferroviaria Taranto-Reggio Calabria.

Confrontando la cartografia dell'I.G.M.I. in scala 1:25000 del 1956 con le ortofotocarte in scala 1:5000 del 2004 è possibile rinvenire una totale invarianza dell'assetto planimetrico del fiume a monte della S.S. 106 Jonica e a valle dell'attraversamento ferroviario.

Nel tratto compreso tra i due attraversamenti, invece, l'originario *thalweg* appare più meandrizzato rispetto a quello attuale come mostra la figura seguente in cui il vecchio e l'attuale alveo sono identificati rispettivamente con il colore celeste e blu.



Figura 4.6. Sovrapposizione tra la carta dell'I.G.M.I. in scala 1:25000 del 1956 (in trasparenza) e le ortofotocarte in scala 1:5000 del 2004 per il tratto fluviale del Bradano in esame: a monte della S.S. 106 jonica (a sinistra), tra gli attraversamenti della S.S. 106 jonica e ferroviario (al centro) e tra la linea ferroviaria Taranto Reggio Calabria e la foce (a destra).

L'analisi morfologica della foce del Fiume Bradano è stata realizzata ricorrendo, oltre che alle informazioni derivanti dal rilievo topografico del 2004, anche (e soprattutto) al DTM (*Digital Terrain Model*) di dettaglio ottenuto a partire dal rilievo laser-scan della costa jonica descritto successivamente. Le informazioni così acquisite hanno permesso sia la caratterizzazione della vegetazione presente, sia l'applicazione del modello matematico bidimensionale per la determinazione delle aree inondabili.

4.4. Il rilievo laser scan effettuato lungo la costa jonica lucana

La probabilità che un'area possa essere interessata da un evento alluvionale è connessa non solo al corso d'acqua e quindi alla sua incapacità di contenere l'onda di piena, ma anche alle direzioni di deflusso delle acque quando queste hanno abbandonato il fiume.

Pertanto la morfologia del territorio riveste un ruolo di grande importanza in quanto la propagazione dei flussi è influenzata dalle caratteristiche di direzione e di pendenza del terreno.

Per le zone particolarmente pianeggianti, come quella in esame, le modeste differenze altimetriche rendono difficile identificare tutti gli elementi significativi presenti sulla superficie se non si possiedono informazioni di estremo dettaglio.

La costruzione di un modello digitale del terreno è, perciò, fondamentale perché consente di definire l'aspetto superficiale dell'area, la presenza di depressioni, di elementi di ostacolo al deflusso di piena (rilevati stradali, argini, ...) ed elementi che favoriscono la propagazione delle piene (canali di bonifica, strade, ...).

Il laser-scan è una tecnica di acquisizione topografica che permette di rilevare forme, dimensioni e posizione di un oggetto mediante la misura di un elevato numero di punti della sua superficie attraverso una sequenza di impulsi laser diversamente orientati. Con il laser a scansione si riesce ad ottenere in breve tempo un Digital Surface Model (DSM) che rappresenta una prima scansione del territorio e, in seguito ad elaborazioni con specifici programmi di filtraggio, un Digital Terrain Model (DTM) di estremo dettaglio. I punti rilevati per metro quadro possono variare da un minimo di uno ad un massimo di qualche decina in funzione della quota di volo del velivolo. Le

esperienze riportate in letteratura confermano che l'errore che si commette nella stima della quota di un punto è inferiore a 30 cm, mentre, l'errore che si commette nella stima della posizione planimetrica è inferiore al metro. Si può oggi ricorrere a sensori capaci addirittura di memorizzare l'intera onda di risposta del singolo raggio laser emesso. Tali sensori risultano particolarmente indicati per le valutazioni idrauliche che mirano alla definizione delle aree inondabili: infatti, in tale ambito risulta di fondamentale importanza il rilevamento della vegetazione e degli elementi presenti sul terreno (naturali o antropici) perché essi influenzano sia la scabrezza sia le direzioni di flusso della corrente idrica.

Per quel che riguarda la costa jonica lucana si dispone di un dettagliato rilievo laser integrato da fotogrammetria digitale eseguito dalla società GEOCART s.r.l. per conto dell'AdB nel 2006 che va ad aggiungersi alle informazioni derivanti dai rilievi delle aste principali dei principali corsi d'acqua di cui si è già scritto consistenti in:

- rilievi topografici delle sezioni trasversali dell'asta principale e delle relative strutture idrauliche e di attraversamento;
- curve granulometriche del fondo alveo e la relativa ubicazione in formato digitale;
- ortofotocarte in formato digitale raster in scala 1:5000, di una fascia comprendente il fiume per una ampiezza di circa 2 km;
- profili longitudinali delle arginature e relativa ubicazione in formato digitale;
- rilievo delle opere idrauliche longitudinali e trasversali.

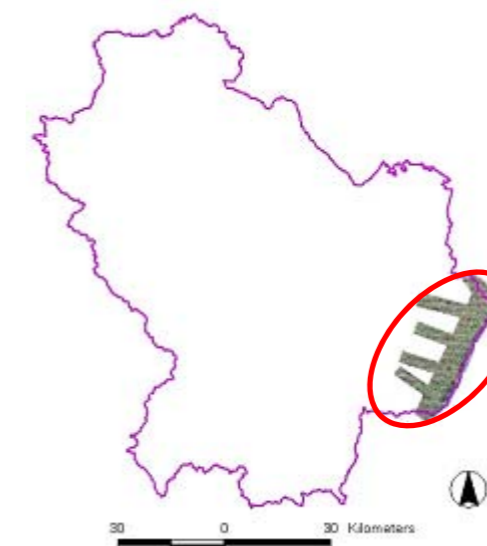


Figura 4.7. Individuazione della fascia jonica lucana interessata dal rilievo laser-scan nel 2006.

L'acquisizione dei dati lungo la costa jonica è avvenuta mediante l'impiego di un sistema "Topeye" integrato denominato "Topeye MKII" montato su elicottero e costituito da un laser scanner, da un sistema di posizionamento GPS (*Global Positioning System*) e da un sistema di orientamento inerziale INS (*Inertial Navigation System*).

Dalle informazioni raccolte durante il rilievo è stato generato il DSM (*Digital Surface Model*) della fascia jonica. Alla costruzione del DTM (*Digital Terrain Model*) si è pervenuti, in collaborazione con la GEOCART, classificando preliminarmente i punti del DSM in:

- default;
- ground, punti rappresentativi del solo terreno;
- low vegetation, punti caratteristici della vegetazione bassa;
- medium vegetation, punti caratteristici della vegetazione di media altezza;

- high vegetation, punti caratteristici degli arbusti;
- buildings, punti rappresentativi delle costruzioni;
- low points, punti non appartenenti a nessuna delle classi considerate. Si tratta di punti isolati posizionati ad altezze non congrue come sotto il terreno o solitari nello spazio determinati da errori strumentali, da falsi riflessi o da oggetti realmente presenti durante il rilievo (per esempio, buche, volatili,...);
- MKP (*Model Key Points*), si tratta dei cosiddetti “*punti chiave*” posizionati in corrispondenza di cambi di pendenza significativi e indispensabili alla creazione del DTM utilizzato per le elaborazioni idrauliche descritte ai capitoli seguenti.

A partire dai soli punti classificati come *Ground* è stato estratto il *Model Key Points*. Il MKP consente la creazione di un DTM leggero e gestibile anche con hardware poco potenti perché, diradando la nuvola di punti sulle zone omogenee e conservando un opportuno infittimento in corrispondenza delle discontinuità del terreno, permette una facile visualizzazione della morfologia del territorio.

4.5. La vulnerabilità idraulica nel tratto vallivo del fiume

Bradano

Il tratto vallivo del fiume Bradano può ragionevolmente considerarsi area a rischio di inondazione.

Questa constatazione deriva innanzitutto dalle informazioni storiche che, attraverso strade diverse, sono giunte fino ai nostri giorni. Infatti, la storia, assieme alla geomorfologia all'idrologia e alla meteorologia, contribuisce in maniera significativa

alla identificazione delle aree idraulicamente vulnerabili e spesso rappresenta l'unico strumento utilizzabile per verificare teorie e modelli.

Come detto, la raccolta più importante di informazioni storiche sui disastri idrogeologici (frane e alluvioni) verificatisi su tutto il territorio nazionale nel periodo 1918-2001 è stata realizzata nell'ambito del progetto AVI (Aree Vulnerate Italiane) dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) su incarico del Dipartimento della Protezione Civile. Il censimento è stato realizzato consultando quotidiani locali, pubblicazioni tecniche e scientifiche ed effettuando interviste ad esperti nel settore dei movimenti franosi e delle inondazioni. Tutte le notizie censite compongono un complesso archivio digitale contenente oltre 31.500 informazioni relative a frane ed oltre 8500 informazioni relative ad inondazioni. Tale archivio è consultabile all'indirizzo Internet <http://sici.irpi.cnr.it>.

Si riporta, nella figura 4.8, uno stralcio della *Carta della densità degli eventi di piena* redatta dal GNDCI – CNR nell'ambito del progetto AVI: da tale immagine è possibile notare come, lungo la costa jonica lucana, sia proprio il territorio in corrispondenza delle foci del Basento e del Bradano ad essere stato interessato in passato da un maggior numero di eventi calamitosi.

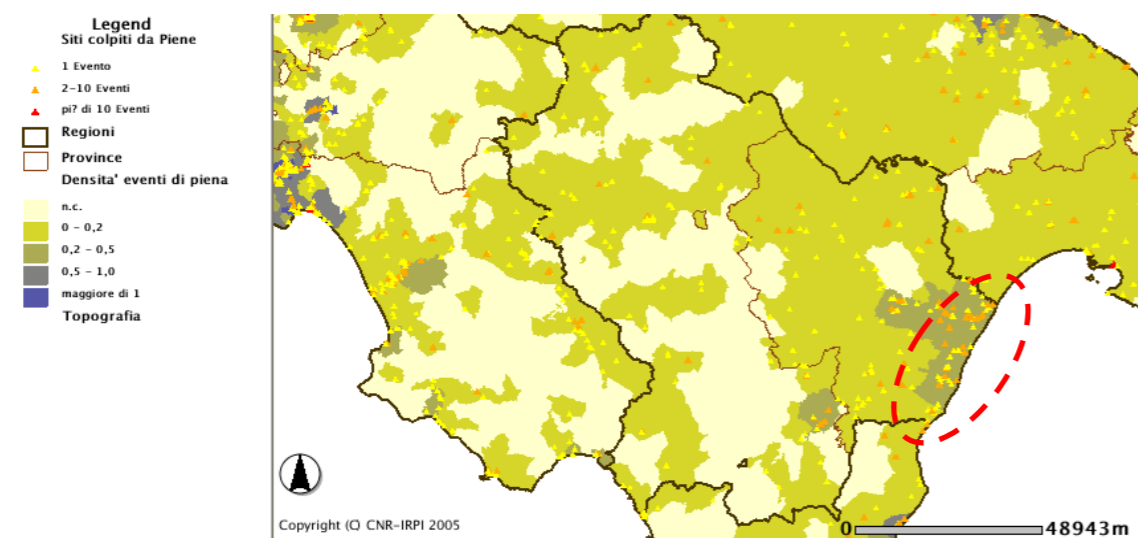


Figura 4.8. Stralcio della *Carta della densità degli eventi di piena*. I triangoli indicano gli eventi calamitosi (giallo = 1 evento, arancio = da 2 a 10 eventi, rosso = più di 10 eventi) mentre le aree con colori dal bianco (densità più bassa) al blu (densità più alta) indicano le diversi livelli di densità. Sistema informativo sulle catastrofi idrogeologiche. AVI – GNDICI. Il cerchio rosso, infine, indica la costa jonica.

Inoltre, per sottolineare ulteriormente la particolare vulnerabilità idraulica della foce del Bradano (giustificando in un certo senso anche la scelta di queste due foci come area di studio) si riporta quanto raccolto dall'ARPAB (*Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente di Basilicata*, <http://www.settoreimpc.it/idrometeorologico/alluv-met.asp>) e quanto raccolto da un approfondito studio realizzato dal Laboratorio di Tecnologie Informative per la Pianificazione dei Bacini Idrografici dell'Università degli Studi della Basilicata per alcuni dei più significativi eventi di piena verificatesi lungo la costa jonica nell'ultimo secolo.

Del noto evento del 1959 si dispone di alcune immagini fotografiche (Figura 4.9) e di informazioni sui danni prodotti. Dai giornali dell'epoca si apprende di ingenti danni alle opere civili, crolli di strutture viarie importanti sulla S.S. 106 e di un elevato numero di sfollati nei comuni limitrofi. Nel centro di Scanzano Jonico, in particolare,

l'acqua raggiunse anche il metro di altezza. Il Bradano causò anche l'allagamento e l'interruzione della SS175 tra il bivio di Bernalda e quello di Metaponto.



Figura 4.9. Alluvione del 24.10.1959 in corrispondenza dell'attraversamento della S.S. 106 jonica.

Nella seguente mappa messa a disposizione dal C.N.R. sono riportate le aree inondate in tale evento (figura 4.10).

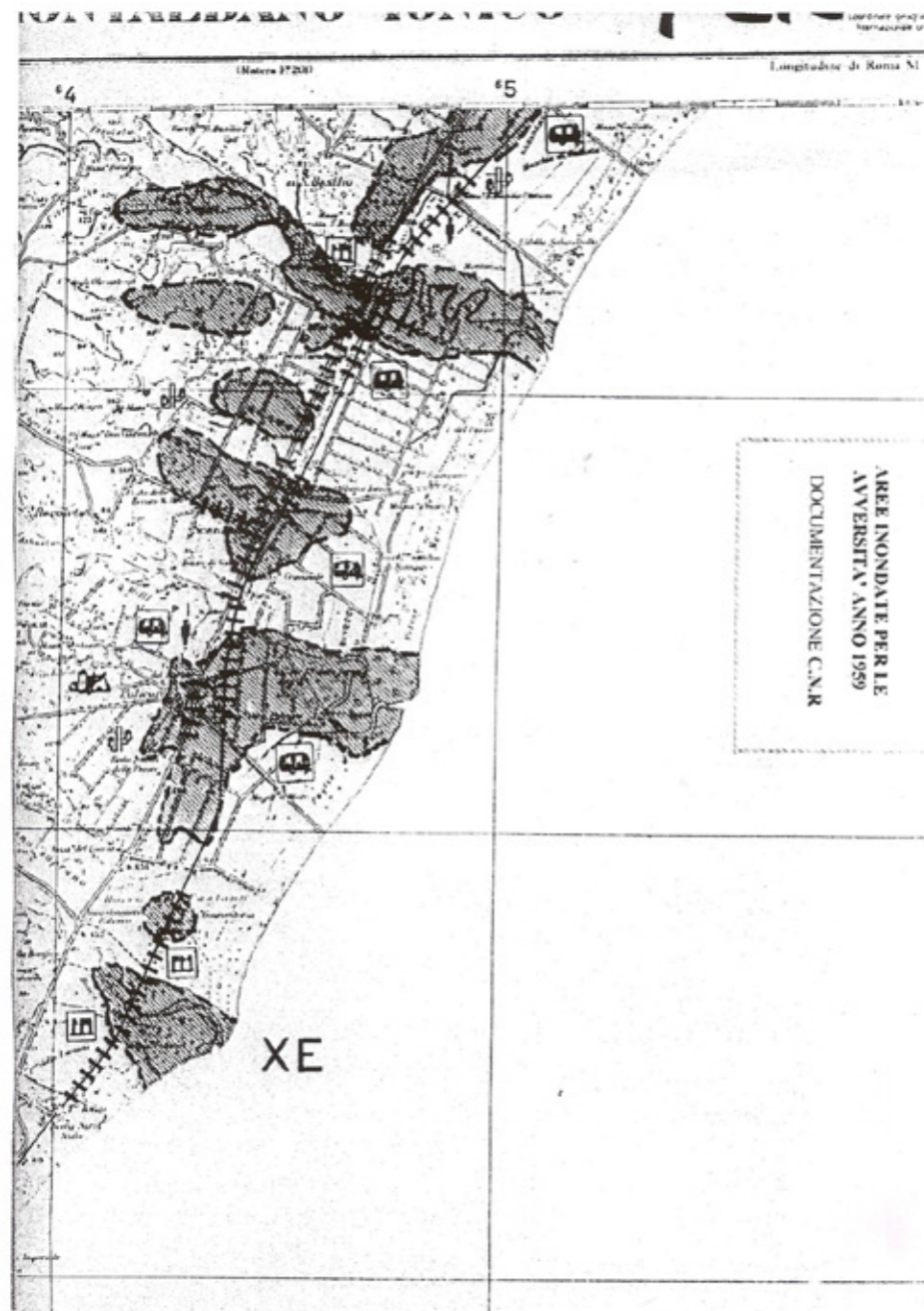


Figura 4.10. Aree inondate lungo la Costa Jonica nell'evento del novembre 1959. Documentazione CNR.

Dal 14 al 24 gennaio 1972, la Basilicata fu interessata da precipitazioni eccezionali che investirono tutti e cinque i bacini dei corsi d'acqua della costa jonica lucana, provocando notevoli danni. Nella seguente mappa realizzata dalla Provincia di Matera sono riportate le aree inondate durante tale evento (figura 4.11).



Figura 4.11. Aree inondate lungo la Costa Jonica nell'evento del gennaio 1972.

Il fenomeno del novembre 2004 è considerato come uno dei più critici nell'ultimo secolo dal momento che, in appena due ore, ha fatto registrare ben 120 mm di pioggia.

Altre alluvioni significative che hanno colpito l'area oggetto di studio sono quelle verificatisi negli anni 1929, 1931, 1957, 1961, 1966, 1979 e 1985. La frequenza di tali eventi dimostra l'elevata vulnerabilità di questo territorio.

Ma molto critico è stato l'evento verificatosi il 1 marzo 2011, che, come detto, è stato considerato per una prima validazione del modello.

4.6. L'evento di piena del 1 marzo 2011

Tale evento alluvionale è stato particolarmente intenso. Inizialmente, a febbraio, per le precipitazioni eccezionali tutti i fiumi lucani che sfociano nel Mar Jonio hanno rotto gli argini in più punti provocando diversi danni. Dopo un miglioramento delle condizioni meteo, a partire dal 1 marzo nuove precipitazioni hanno causato danni ancor più ingenti. Serramarina, Metaponto, ed altre frazioni dell'agro di Bernalda sono state completamente sommerse dalle acque del Bradano e Basento e a Metaponto sono intervenuti in soccorso l'esercito e la protezione civile e sono state allestite tendopoli per ospitare gli sfollati. Migliaia di colture ortive, fragole, agrumeti e frutteti sono stati sommersi dalle acque. Molte serre e fabbricati sono risultati danneggiati, alcune case rurali sono state evacuate mentre alcune aziende zootecniche sono andate quasi completamente distrutte con perdite di diverse centinaia di capi di bestiame. Alcune strade provinciali e statali sono state interrotte da acqua e fango. Il Governo ha dovuto riconoscere lo stato di calamità.

Numerose sono inoltre le rotture riscontrate sulle strutture arginali. Di alcune di queste criticità, come vedremo in seguito, si è tenuto conto nella costruzione della geometria di calcolo per simulare l'evento nella maniera quanto più possibile vicina alla realtà.

Si riportano di seguito alcune foto scattate all'indomani dell'evento alluvionale.



Figura 4.12. Azienda zootecnica completamente sommersa dalle acque immediatamente a monte dell'attraversamento della SS106 sul Bradano.



Figura 4.13. Rottura arginale in sponda sinistra del Fiume Bradano immediatamente a monte dell'attraversamento della SS106.



Figura 4.14. Allagamenti nei pressi di un villaggio turistico a Metaponto.

4.7. La caratterizzazione della vegetazione alla foce del fiume

Bradano

L'area di studio è dominata lungo la fascia costiera dalla vegetazione rigida, prevalentemente eucalipti, mentre nell'entroterra prevalgono le colture agricole e la macchia mediterranea. Quest'ultima è sia alta a portamento arboreo con chiome che raggiungono anche i 4 m che bassa composta da specie a portamento arbustivo. La copertura vegetale è stata classificata a partire da dati LiDAR (immagini multi-spettrali, rilievi laser-scan) e aerofotogrammetria digitale. Come detto in precedenza, l'acquisizione con tecnologia laser-scanning risale al 2006 ed è stata realizzata dall'azienda GEOCART srl per conto dell'Autorità Interregionale di Bacino di Basilicata.

In questo lavoro si è utilizzata una procedura automatica di classificazione che distingue sul dato LiDAR le diverse tipologie di vegetazione dalle strutture antropiche e calcola, partendo da un Digital Surface Model (DSM) e da un accurato Digital Terrain Model (DTM), l'altezza rispetto al terreno di ogni oggetto presente nel rilievo LiDAR (Mumtaz & Mooney, 2008, Andersen et al., 2005). Questo metodo si basa sulla combinazione (fusione dei dati) del dato LiDAR con immagini multi-spettrali di risoluzione pari a 50 cm ed utilizza un approccio bayesiano basato sulla tecnica di classificazione della massima verosimiglianza o Maximum Likelihood (ML) (Varasano, 2009, Sole et al., 2012).

La metodologia applicata (Figura 4.15) ha consentito di derivare in automatico le misure dendrometriche di altezza e diametro degli alberi e l'altezza di ogni struttura antropica dai dati LiDAR. Dopo aver individuato il DSM della vegetazione a partire dai dati LiDAR del primo impulso ed il DTM, è stato calcolato, per sottrazione tra il DSM ed il DTM, il normalized Digital Surface Model (nDSM) della copertura vegetale (Figura 4.16).

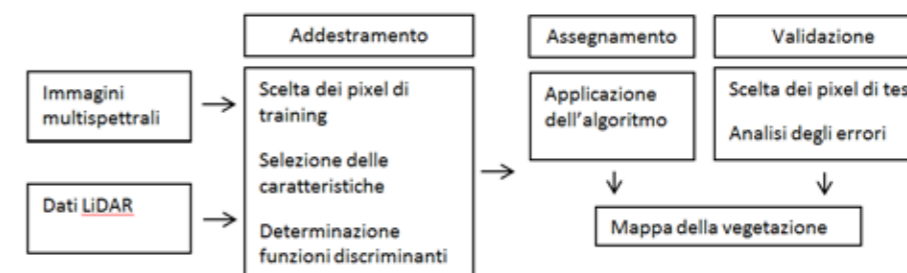


Figura 4.15. Schematizzazione della procedura di costruzione della mappa della vegetazione.

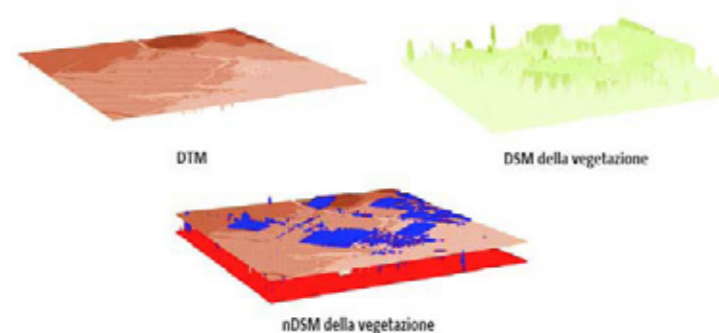


Figura 4.16. Elaborazioni per la stima delle altezze di vegetazione a partire dai modelli digitali (a sinistra) e stralcio di DTM dell'area di studio (a destra).

In ultimo, la procedura di classificazione basata sull'apprendimento bayesiano ha consentito di separare e classificare le diverse tipologie vegetali e le strutture antropiche presenti. Le aree vegetate sono state ulteriormente classificate in aree a vegetazione arborea ed arbustiva integrando i dati laser con le informazioni desunte dalle foto aeree, dalla “Carta di uso del suolo” del Progetto Corine-Land Cover (European Environment Agency, 2006) e dalla “Carta Forestale della Basilicata” (Istituto Nazionale di Economia Agraria, 2006).

Nel dettaglio, per l'applicazione dell'espressione di Petryk e Bosmajan, come coefficiente di Manning di base è stato considerato un valore pari a $0,04 \text{ s/m}^{1/3}$, valore coincidente con quello utilizzato nelle elaborazioni fatte in passato su quest'area con altri modelli di simulazione delle piene. Il raggio idraulico è stato approssimativamente considerato pari al tirante mentre la sezione di ingombro della pianta si è assunta pari al prodotto tra il tirante ed il diametro del tronco. Il coefficiente di drag, in accordo con Petryk e Bosmajian che assumono il coefficiente di resistenza dei fusti degli alberi uguale a quello di un cilindro immerso in una corrente ad elevato numero di Reynolds, si è assunto pari ad 1.

Le distanze tra le piante a_x e a_y sono state valutate analizzando l'ortofoto mentre il diametro del fusto degli alberi è stato stimato in funzione delle specie vegetali presenti sul territorio.

Con l'ausilio della cartografia citata in precedenza, ma anche del Tool “Street View” del Software Google Earth e della documentazione fotografica prodotta nel corso dei sopralluoghi effettuati, la vegetazione rigida è stata distinta in: agrumeti, cedri, cipressi, eucalipti, frutteti, macchia alta, oliveti, pinete e vigneti.



Figura 4.17. Tipologie arboree individuate nell'area di studio e classificate, partendo dall'alto a sinistra, come: frutteti, agrumeti, oliveti, vigneti, pinete, eucalipti, cedri, cipressi e macchia.

Una volta identificate le specie arboree è stato possibile assegnare un valore di diametro del fusto unico in funzione della tipologia di pianta.

CLASSE	d (cm)
Agrumeti	30
Cedri	70
Cipressi	70
Eucalipti	80
Frutteti	30
Macchia alta	70
Oliveti	50
Pinete	70
Vigneti	20

Tabella 4.1. Diametro del fusto per le classi di vegetazione rigida individuate.

Appartenenti alla vegetazione flessibile sono state considerate inizialmente le classi arbusti, colture, serre e prati.



Figura 4.18. Tipologie di vegetazione flessibile individuate nell'area di studio e inizialmente classificate, partendo dall'alto a sinistra, come: arbusti, colture, serre e prati.

Per semplicità, ad eccezione della classe arbusti che è stata considerata come tale, ad ognuna di tali classi si sono attribuiti i valori delle variabili richiamate nella formula di Freeman et al. tipiche della specie vegetale più diffusa ricadente in quella classe (tabella 4.2). Pertanto alla classe colture sono state associate le caratteristiche tipiche del pomodoro, alla classe serre quelle delle fragole e, infine, ai prati quelle del frumento.

tipo	piante/mq	h pianta (m)	d fusto (m)	h chioma (m)	largh chioma (m)
fragola	12	0.3	0.003	0.3	0.3
arbusti	1	1	0.02	1	0.9
pomodori	2.5	0.7	0.01	0.7	0.5
frumento	400				

Tabella 4.2. Caratteristiche tipiche delle tipologie di vegetazione flessibile considerate nel calcolo.

La formula di Freeman et al. non si è potuta applicare al frumento in quanto tale coltivazione è caratterizzata da un numero di piante/mq pari a circa 400, di molto superiore al limite di applicabilità della formula visto in precedenza (12 piante/mq). Per le aree classificate come coltivate a frumento si è pertanto utilizzato un valore costante del coefficiente di scabrezza di Manning pari a $0,04 \text{ s/m}^{1/3}$. Si è scelto tale valore in quanto si è tenuto conto del grado di maturazione di tale coltura nel periodo in cui si è verificato l'evento da simulare per la validazione del modello (inizio marzo), che è pertanto assimilabile alla presenza di un prato.

Le informazioni così ottenute sono state inserite nel database di un file del tipo shape di ESRI (figura 4.19) nel quale sono state riportate le perimetrazioni di tutte le aree a vegetazione omogenea e, attraverso le utility create, tali informazioni sono state importate nel modello per la creazione delle tabelle delle scabrezze.

5. L'analisi idrologica

5.1. Introduzione

L'evento del 1 marzo 2011 è stato ricostruito dal punto di vista idrologico al fine di determinare l'idrogramma da utilizzare come dato di ingresso del modello FLORA-2D, per poterne effettuare una prima validazione. Tale idrogramma è stato ottenuto come somma dell'idrogramma in uscita dall'invaso di San Giuliano, dell'idrogramma sul Torrente Gravina e di quello sul Torrente Fiumicello alla loro confluenza con il Fiume Bradano.



Figura 5.1. Bacino del Bradano con indicazione dei contributi considerati per determinare l'idrogramma di ingresso del modello.

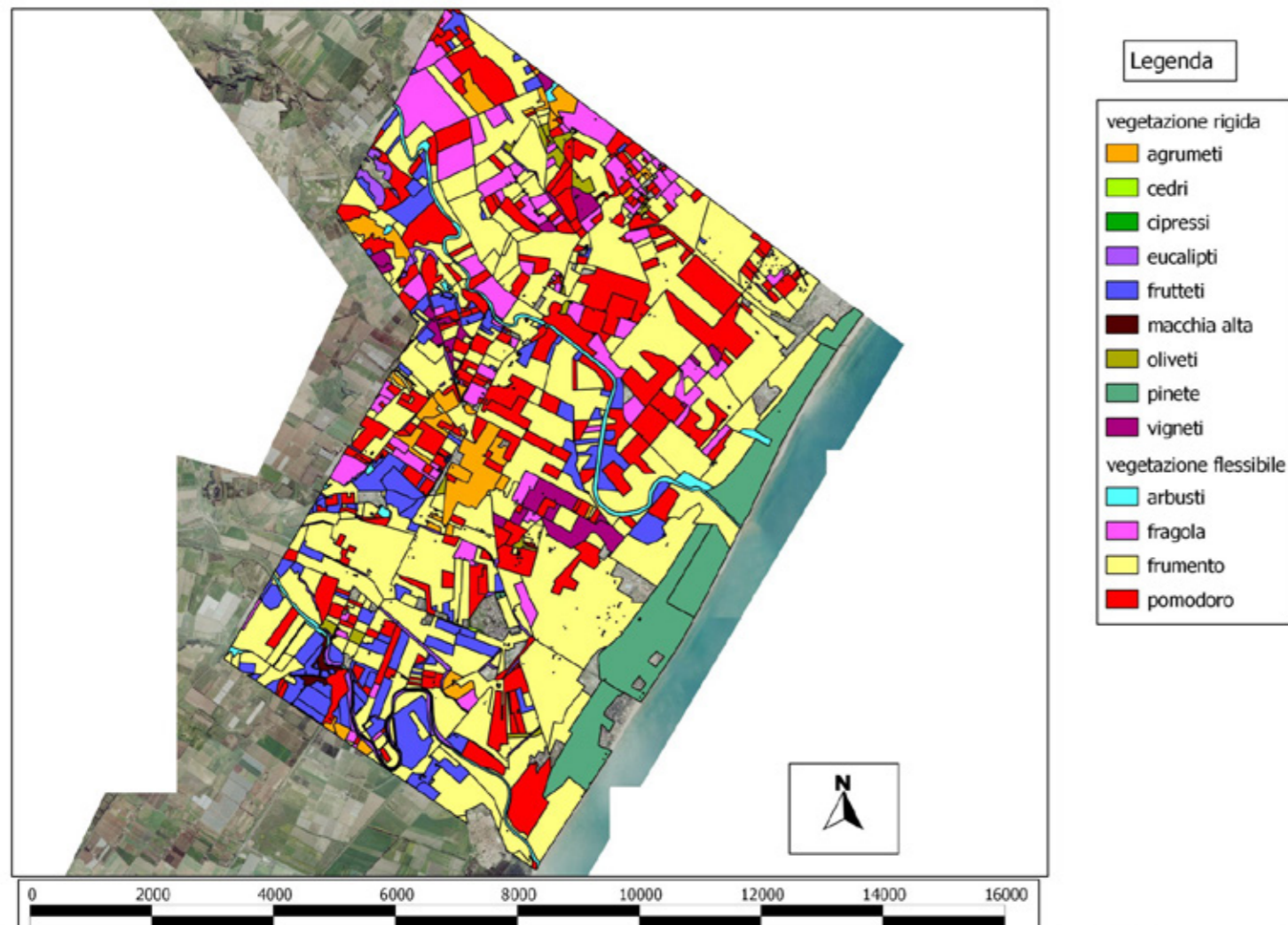


Figura 4.19. Aree con caratteristiche omogenee di vegetazione.

Mentre l'idrogramma in uscita dall'invaso di San Giuliano è stato ricostruito a partire dai dati forniti dal gestore della diga, gli idrogrammi sul T. Gravina e sul T. Fiumicello sono stati ricavati, a partire dai dati di pioggia dell'evento del 1 marzo 2011 forniti dall'Ufficio Protezione Civile della Regione Basilicata, attraverso il modello afflussi-deflussi AD2 di Fiorentino e Manfreda (2004).

Dato che, com'è possibile vedere dalla figura 5.1, le immissioni in alveo avvengono in punti diversi, per sommarli si è dovuto tenere conto della propagazione delle portate attraverso l'utilizzo del metodo di Muskingum.

5.2. Il modello afflussi-deflussi AD2

Il modello afflussi-deflussi AD-2 è stato ideato da Fiorentino e Manfreda nel 2004 e migliorato in seguito in alcune delle sue componenti.

Tale modello è di tipo concettuale a parametri concentrati fisicamente basati che, nella sua concezione originaria, considera esclusivamente le seguenti componenti idrologiche:

- 1) la precipitazione;
- 2) l'infiltrazione negli strati superficiali del suolo;
- 3) il deflusso superficiale;
- 4) il deflusso sub-superficiale;
- 5) la percolazione profonda.

Nel modello AD2, il bacino idrografico viene schematizzato come un bucket rappresentativo del suolo idrologicamente attivo, e descritto mediante grandezze tipiche dell'idrologia dei suoli quali il contenuto d'acqua a saturazione, il contenuto d'acqua alla capacità di campo e il contenuto d'acqua al generico istante di tempo t .

Nella sua ultima versione esso è stato migliorato introducendo il calcolo dell'evapotraspirazione ed apportando delle modifiche alla stima della ricarica di falda (Rosano et al., 2008).

In definitiva, AD2 valuta singolarmente le seguenti componenti del bilancio idrologico alla scala temporale di riferimento: infiltrazione, deflusso superficiale, perdita per ruscellamento sub-superficiale, percolazione profonda, evapotraspirazione (si veda figura 5.2).

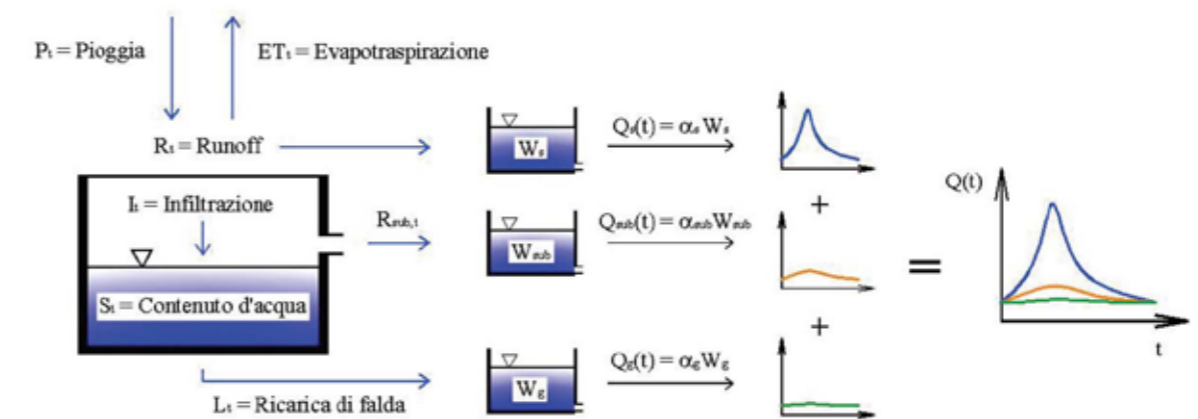


Figura 5.2. Schema concettuale del modello AD2. Tratto da Rosano et al., Sviluppo ed ingegnerizzazione di un modello per la simulazione idrologica a scala di bacino, XXXI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Perugia, 2008.

In ogni intervallo di tempo la quantità d'acqua infiltrata nel suolo è data da:

$$I_t = P_t - R_t \quad (5.1)$$

dove P_t è l'intensità di pioggia al tempo t (mm) e R_t è il deflusso superficiale al tempo t (mm). Quest'ultimo viene valutato attraverso un'espressione definita in funzione della pioggia critica P_c :

$$R_t = \begin{cases} C \left(\frac{S_t}{S_{max}} \right) P_t & \text{se } P_t \leq P_c = \frac{S_{max} - (S_{max} - S_t)}{S_{max} - C S_t} \\ P_t - (S_{max} - S_t) & \text{se } P_t \geq P_c = \frac{S_{max} - (S_{max} - S_t)}{S_{max} - C S_t} \end{cases} \quad (5.2)$$

dove C è un coefficiente di deflusso a saturazione del suolo che dipende dalla pendenza,

dalla tipologia di suolo e dall'uso del suolo.

Per il calcolo del deflusso sub-superficiale si adotta la seguente equazione:

$$R_{sub,t} = \max\{0, c(S_t - S_c)\} \quad (5.3)$$

dove $R_{sub,t}$ è il deflusso sub-superficiale al tempo t (mm) e c rappresenta un coefficiente empirico che è funzione della velocità con cui il flusso sub-superficiale si muove nel terreno.

La stima della componente di percolazione verso la falda L_t [mm] all'istante t è valutata secondo l'espressione (Manfreda et al. , 2005):

$$L_t = S_t - S_{max} \left(\frac{\Delta t \cdot K_S \cdot (\beta - 1)}{S_{max}} + \left(\frac{S_t}{S_{max}} \right)^{(1-\beta)} \right)^{\frac{1}{(1-\beta)}} \quad (5.4)$$

valida quando $S_{t-1} > S_c$, diversamente L_t è posta pari a 0. K_S è la permeabilità idraulica del suolo in condizioni di saturazione mentre β è un esponente adimensionale caratteristico della dimensione e della distribuzione dei pori nel suolo.

L'evapotraspirazione è calcolata nel modello, per ogni istante t , in funzione del rapporto S_t/S_c e dell'evapotraspirazione potenziale ET , tramite l'espressione proposta da Milella (2006):

$$ET_t = \max \left\{ 0, \min \left\{ ETP_t \left(\frac{S_t - S_w}{0,75 S_c - S_w} \right), ETP_t \right\} \right\} \quad (5.5)$$

dove ETP_t è l'evapotraspirazione reale al tempo t e S_w è il contenuto d'acqua minimo per l'innesco del fenomeno evapotraspirativo.

Il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale ETP_t viene effettuato tramite il metodo di Blaney-Criddle

$$ETP_t = K_c p (0.46 T_m + 8) \quad (5.6)$$

dove K_c è il coefficiente colturale, p è il rapporto percentuale fra le ore di insolazione del giorno considerato e le ore di insolazione totali annue, T_m è la temperatura media giornaliera.

Il contenuto di acqua nel suolo si ottiene attraverso la seguente espressione:

$$S_{t+\Delta t} = \max\{0, S_t + I_t - R_{sub,t} - L_t - ET_t\} \quad (5.7)$$

dove $S_{t+\Delta t}$ è il contenuto di acqua totale al tempo $t+\Delta t$, S_t è il contenuto di acqua totale al tempo t , I_t è l'infiltrazione al tempo t , $R_{sub,t}$ è il deflusso sub-superficiale al tempo t , L_t è la ricarica della falda profonda al tempo t , ET_t è l'evapotraspirazione al tempo t .

La portata totale è valutata come la somma di tre contributi:

$$Q(t) = Q_{sup} + Q_{sub} + Q_g \quad (5.8)$$

dove Q_{sup} è la portata da deflusso superficiale, Q_{sub} è la portata da deflusso sub-superficiale, Q_g è la portata di base.

Nella figura successiva sono riportati, oltre che gli idrogrammi in entrata e in uscita dell'invaso di San Giuliano, gli idrogrammi ottenuti con questo modello per il torrente Gravina e per il torrente Fiumicello.

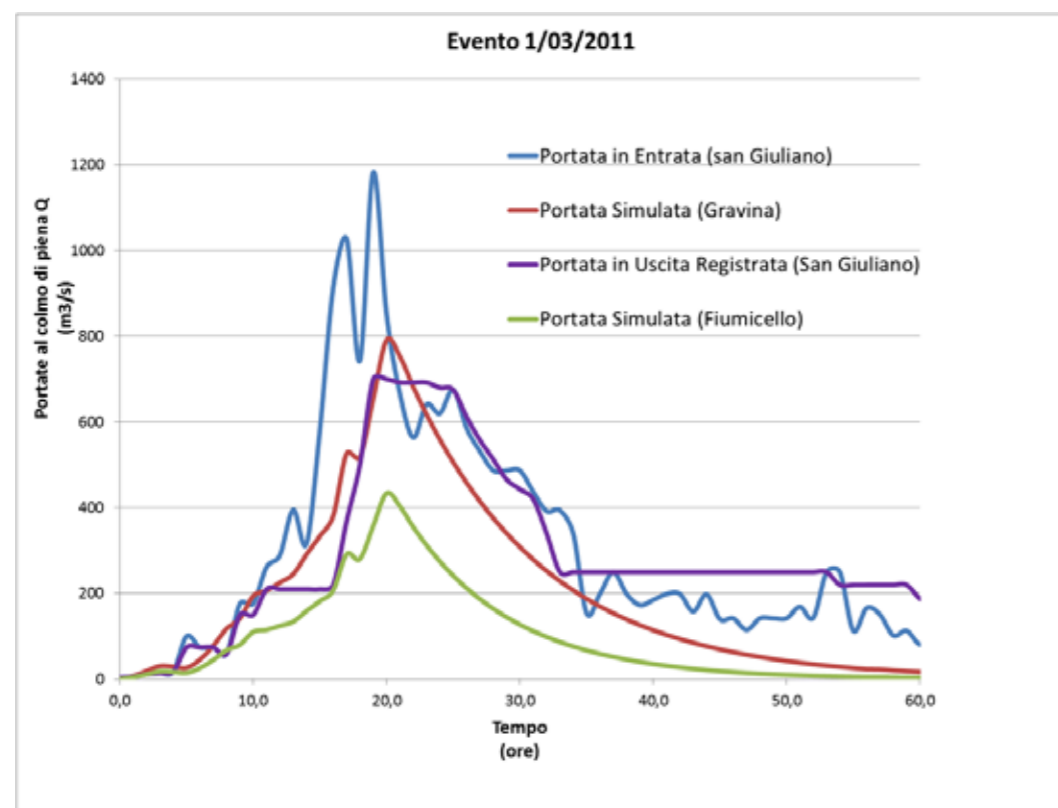


Figura 5.3. Idrogrammi di piena relativi all'evento del 1 marzo 2011.

5.3. Il calcolo della propagazione delle portate attraverso il metodo di Muskingum

Il calcolo della propagazione delle portate è avvenuto attraverso il metodo di Muskingum, che è un modello semplificato con cui è possibile ottenere risultati affidabili scegliendo parametri appropriati e che si è rilevato in questo caso uno strumento molto utile.

Esso valuta la propagazione basata sulla relazione fra portata e volume invasato e tiene in conto di:

- un volume prismatico racchiuso da linee di livello parallele al fondo ed assunto proporzionale alla portata nel punto di valle del sottotratto (Prism Storage);
- un volume incuneato fra il livello idrico ed il volume prismatico sottostante ed assunto proporzionale alla differenza di portata fra monte e valle (Wedge Storage).

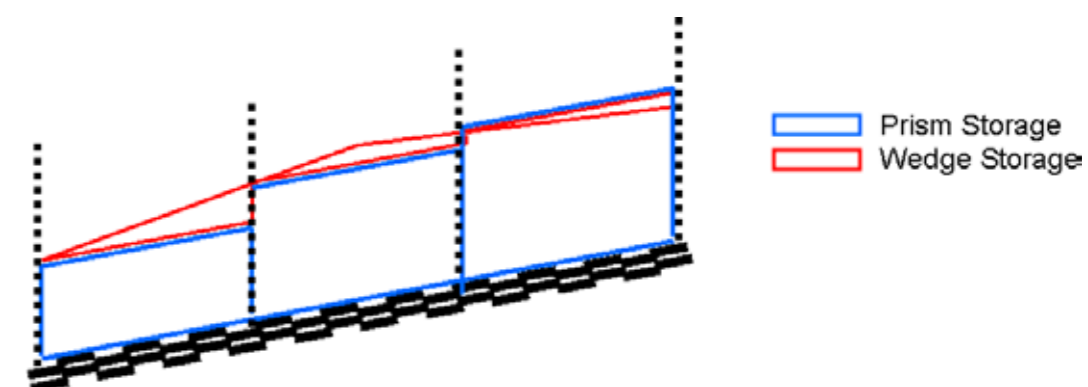


Figura 5.4. Schema dei volumi di controllo del metodo di Muskingum. Tratto da Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual.

Si assume che:

$$S_t = S_{prismatico} + S_{incuneato} = k \cdot O_t + k \cdot x \cdot (I_t - O_t) \quad (5.9)$$

dove

- S_t è il volume (Storage) al tempo t [m^3]
- I_t è la portata in ingresso (Inflow) al tempo t [m^3/s]
- O_t è la portata in uscita (Outflow) al tempo t [m^3/s]
- k è il parametro k di Muskingum proporzionale al tempo di traslazione [s]
- x è il parametro x di Muskingum [-]

Applicando l'equazione di continuità al volume di controllo si ha:

$$\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t-1}}{2} - \frac{O_t + O_{t-1}}{2} \quad (5.10)$$

da cui deriva l'equazione risolutiva:

$$O_t = (c_a - c_b)I_{t-1} + c_b I_t + (1 - c_a)O_{t-1} \quad (5.11)$$

dove:

$$c_a = \frac{2\Delta t}{2k(1-x) + \Delta t}$$

$$c_b = \frac{\Delta t - 2kx}{2k(1-x) + \Delta t}$$

La regione di validità del modello è data dalla seguente relazione:

$$\frac{2}{2(1-x)} \leq \frac{k}{\Delta t} \leq \frac{1}{2x} \quad (5.12)$$

e graficamente:

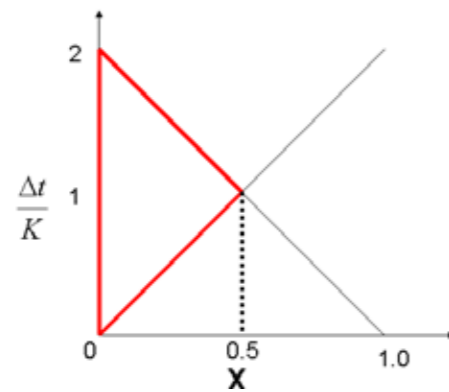


Figura 5.5. Regione di validità dei parametri di Muskingum. Tratto da Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual.

In un dato tratto di corso d'acqua per l'applicazione del metodo occorre assegnare solo due parametri:

- K: costante che coincide pressappoco con il tempo che impiega l'onda a percorrere il tronco di alveo;
- x: fattore di peso che può assumere valori compresi fra 0 e 0.5 e che è tanto maggiore quanto maggiore è l'influenza della portata di monte nella determinazione del volume del tronco di corrente.

Le due costanti K ed x si possono stimare con un procedimento di taratura, se sono a disposizione idrogrammi di ingresso ed uscita di eventi reali. In tale situazione si procede, come indicato in [11] nel seguente modo.

Posto:

$$SP_t = O_t + x(I_t - O_t)$$

dalla equazione dei volumi indicato dal metodo si ha:

$$S_t = k \cdot SP_t \quad (5.13)$$

Tale relazione nel piano (S_t, SP_t) rappresenta una retta uscente dall'origine degli assi di coefficiente angolare $1/k$.

Fissato per tentativo un valore di x, si calcola per ogni coppia di valori contemporanei di I_t ed O_t noti, il corrispondente SP_t ; quindi si valutano i volumi di acqua defluiti attraverso le sezioni estreme del tronco dall'inizio del fenomeno fino all'istante in cui passano tali portate e, per differenza, il volume invasato S_t .

I punti (SP_t, S_t) così ottenuti riportati in diagramma si dispongono su curve che hanno di solito la forma di un cappio più o meno appiattito in dipendenza del valore assunto per x.

L'elaborazione si ripete con diversi valori di x fino a trovare una curva il cui andamento risulti assimilabile quanto più possibile ad una retta (vedi figura seguente).

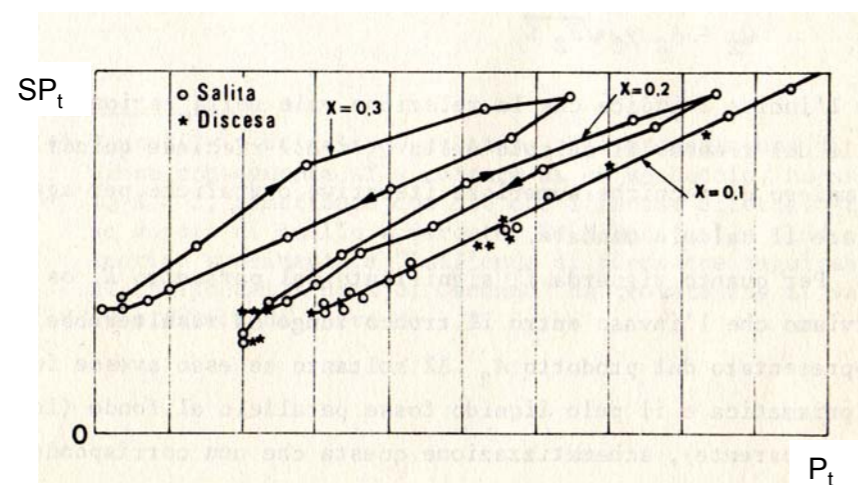


Figura 5.6. Diagramma P-SP. Tratto da Ugo Maione "Appunti di Idrologia".

Quanto al parametro k, è stato controllato sperimentalmente che esso coincide pressappoco con il tempo che impiega l'onda a percorrere il tronco di alveo.

In alternativa alla procedura sopra citata, conoscendo la geometria del tratto di alveo gli stessi parametri si possono determinare con le formule di Cunge (1969):

$$x = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{B\omega S_0 \Delta x} \right) \tag{5.14}$$

$$k = \frac{\Delta x}{\omega} \tag{5.15}$$

dove:

B è larghezza del pelo libero (m);

$\omega = \frac{dQ}{dA}$ rappresenta la celerità della corrente (m/s);

S_0 è la pendenza di fondo (-);

Δx è la lunghezza del tratto (m);

Q è la portata (m³/s);

A è l'area della sezione idrica (m²).

La celerità della corrente si può ricavare dalla scala di deflusso in una sezione eseguendo, come indicato nella formula, la derivata della portata rispetto all'area.

In mancanza di altri dati, si fa presente che la costante K è proporzionale alla lunghezza del tratto mentre il valore di x dipende dalla tipologia di corso d'acqua. Nel caso estremo di un fiume che si comportasse come un lago, in cui il livello è orizzontale ed è funzione della valore assunto nel punto di uscita, allora x assume il valore nullo.

Nella tabella seguente sono riportati come esempio dei valori tipici del parametro x.

Descrizione del tipo di alveo	Range di "x" di Muskingum
Corsi d'acqua di zone particolarmente pianeggianti	0.0 - 0.15
Alvei naturali	0.2 - 0.3
Torrenti o canali senza capacità d'invaso	0.4 - 0.5

Tabella 5.1. Valori tipici del parametro "x" di Muskingum.

Il valore massimo 0.5 indica una situazione di traslazione dell'onda senza una sua attenuazione.

Inoltre è consigliato di suddividere la lunghezza del ramo in un numero di tratti tali che il tempo di traslazione in ciascuno sia prossimo all'intervallo di calcolo Δt . Essendo la velocità di traslazione pari a L/K dove L è lunghezza totale del tratto, ne deriva che il numero di tratti (*steps*) deve essere approssimativamente:

$$steps = \frac{K}{\Delta t}$$

In presenza di tratti molto corti con tempi di traslazione significativamente inferiori al tempo di calcolo è consigliato di traslare semplicemente l'idrogramma senza calcolo di propagazione.

In conclusione l'utilizzo del metodo di Muskingum rappresenta un vantaggio nel caso in cui si abbiano a disposizione delle registrazioni di piena con cui calibrare i due parametri e si evita l'onere di dover eseguire costosi rilievi topografici dell'alveo.

Si fa presente che K ed x in realtà non sono delle costanti al variare della portata di piena, al contrario, maggiore è la portata di piena e maggiore è la sua velocità di propagazione: nella formulazione di Cunge sopra citata, compare difatti esplicitamente il valore della portata.

Per l'uso pratico occorre, allora, che i due parametri siano tarati per un valore di piena mediamente atteso.

Si sottolinea che il metodo non è applicabile per idrogrammi di piena che abbiano un ramo crescente molto ripido, ad esempio nel caso di piena dovuta al crollo di una diga.

Infine il metodo non tiene conto di effetti di rigurgito verso monte dovuto a rallentamenti della corrente, quindi non può, ad esempio, tener conto della variazione della velocità di propagazione dovuta a variazioni del livello di immissione di un corso d'acqua in mare o in un lago.

L'applicazione del metodo di Muskingum, che nel nostro caso è risultato adatto alle caratteristiche sia del tronco di corso d'acqua che degli idrogrammi in analisi, ha permesso quindi di sommare gli idrogrammi ricavati precedentemente tenendo conto della propagazione delle portate. L'idrogramma definitivo che è stato ottenuto e che è stato utilizzato come input nel modello FLORA-2D ha una durata di 70 ore e un picco di circa 1500 mc/s (figura 5.7).

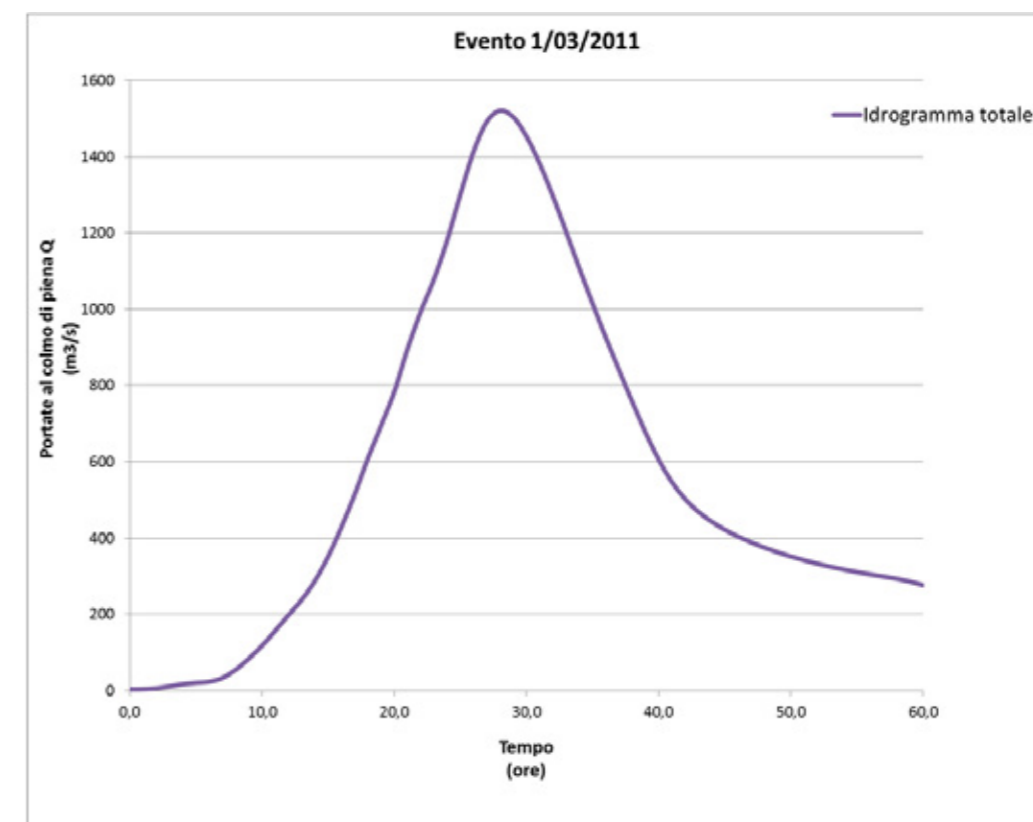


Figura 5.7. Idrogramma utilizzato come condizione al contorno di monte nel modello FLORA-2D.

6. L'applicazione e la validazione del modello

6.1. Introduzione

Il verificarsi dell'evento del 1 marzo 2011 e il buon numero di dati a disposizione per tale evento quali le misure di pioggia, le immagini satellitari e le foto aree fornite dall'Ufficio Protezione Civile della Regione Basilicata, i report dei sopralluoghi effettuati dai tecnici dell'Autorità Interregionale di Bacino della Basilicata ed i sopralluoghi effettuati in prima persona all'indomani dell'evento alluvionale (figura 6-1), hanno permesso una prima validazione del modello FLORA-2D.

I dati di pioggia, come descritto nel precedente capitolo, hanno permesso la ricostruzione dell'evento dal punto di vista idrologico e la definizione dell'idrogramma da utilizzare come condizione al contorno di monte del modello.

Le immagini satellitari, le foto aree e quelle scattate durante i sopralluoghi sono servite innanzitutto ad individuare le rotture arginali da tenere in conto in fase di costruzione del dominio di calcolo e poi a perimetrare le aree realmente allagate da confrontare con quelle calcolate dal modello.



Figura 6.1. Evento del 1 marzo 2011: immagine satellitare (in alto a sinistra), foto scattata durante i sopralluoghi (in alto a destra), foto aerea (in basso a sinistra) e scheda di report AdB Basilicata (in basso a destra).

6.2. Dominio di calcolo

Il dominio di calcolo è stato schematizzato, partendo dal già citato rilievo laser-scan, mediante una griglia a maglie quadrate di risoluzione pari a 10 m.

La perdita del dettaglio altimetrico che accompagna la trasformazione del DTM in grid dipende fortemente dalla dimensione della cella della griglia.

Poiché all'aumentare della risoluzione aumentano anche i tempi di simulazione, si è ritenuto opportuno garantire un elevato dettaglio altimetrico degli elementi che possono influenzare il deflusso delle acque (rilevati arginali o stradali,..) mediante operazioni di manipolazione dei dati altimetrici piuttosto che con un'eccessiva riduzione

della dimensione della cella di calcolo. Questo per garantire tempi di simulazione ragionevoli (Giosa 2007, Sole et al., 2008).

Le correzioni sono state articolate secondo le seguenti fasi:

- individuazione del dominio di calcolo grezzo caratteristico dell'area di studio;
- individuazione degli elementi del floodplain di maggiore influenza sul processo di propagazione della piena e loro caratterizzazione altimetrica;
- costruzione del dominio di calcolo modificato sulla scorta delle informazioni ottenute al punto precedente.

Preliminarmente si è provveduto alla costruzione di una griglia di risoluzione pari a 10 m relativa all'area di studio ottenuta dal MKP senza operare alcuna manipolazione e, pertanto, definita grezza.

Successivamente sono stati scelti come elementi significativi il rilevato ferroviario della linea Taranto - Reggio Calabria, il rilevato stradale della S.S. 106 Jonica, gli argini, le strade arginali ed, infine, gli edifici.

La caratterizzazione altimetrica degli elementi significativi è stata realizzata in ambiente GIS costruendo una specifica griglia degli elementi significativi di risoluzione pari a quella della griglia grezza (10 m). Tale griglia, nello specifico, è il risultato di una operazione di merge tra quella degli elementi lineari significativi (rilevati ferroviario, stradale e arginale) e quella degli elementi poligonali significativi (edifici singoli e/o nuclei insediativi). Nella griglia degli elementi lineari significativi il valore altimetrico delle celle ubicate lungo gli assi di tali elementi è stato opportunamente "corretto" grazie alle informazioni altimetriche desunte dal MKP.

La griglia degli elementi poligonali significativi è stata costruita individuando e digitalizzando su ortofoto la posizione di edifici isolati e di nuclei insediativi. Le celle posizionate in corrispondenza di questi elementi poligonali sono state opportunamente escluse dal calcolo idrodinamico.

Depurando la griglia grezza dalle informazioni altimetriche in corrispondenza delle sole celle degli elementi significativi, si è ottenuta una griglia del terreno, sempre di uguale risoluzione, ed infine, attraverso operazioni di map algebra, combinando le griglie degli elementi significativi e del terreno, si è pervenuti alla griglia definitiva che schematizza l'area di studio. Nella figura 6.2 sono illustrate, con riferimento ad un particolare dell'area di studio, le fasi principali del processo appena descritto.

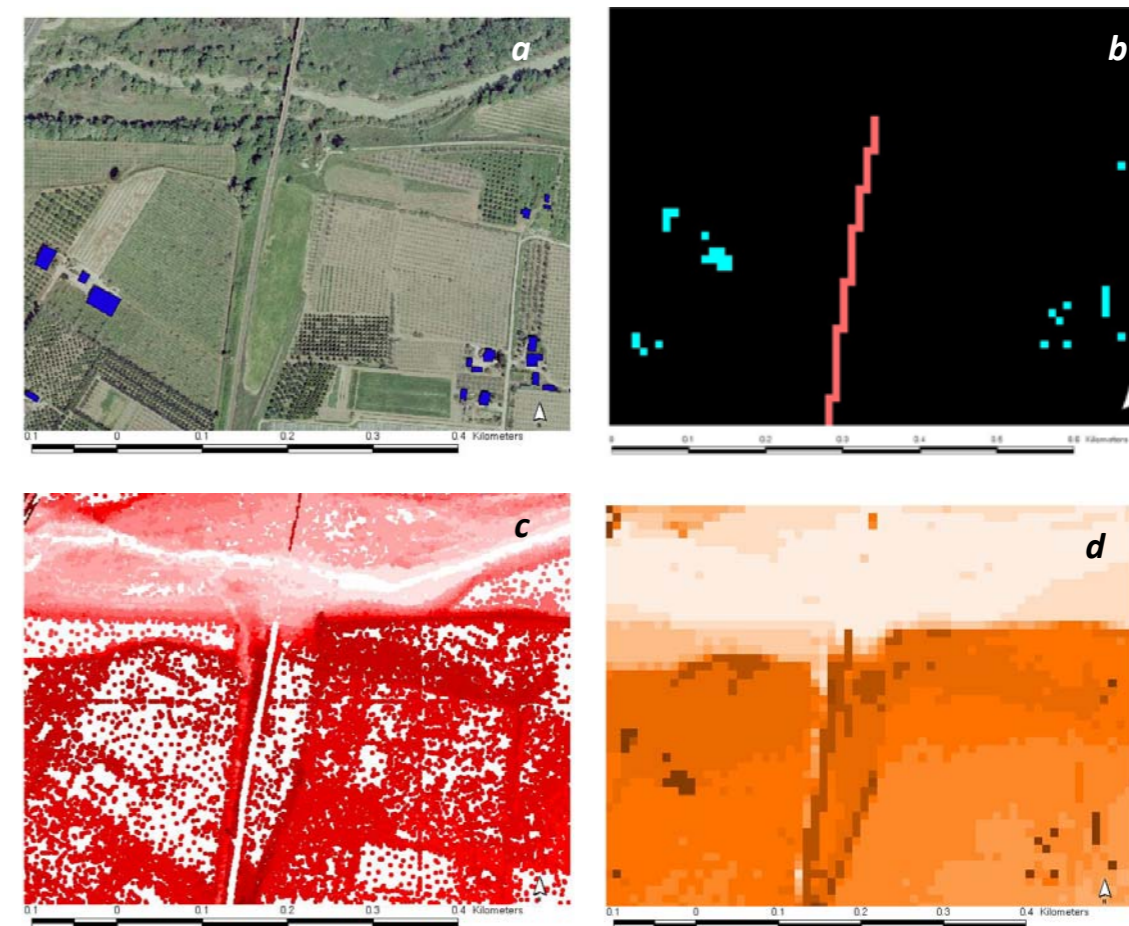


Figura 6.2. Particolare dell'area di studio: (a) poligoni rappresentativi di edifici e nuclei insediativi su ortofoto, (b) griglia degli elementi significativi, (c) MKP depurato dai punti caratterizzanti la sommità degli elementi significativi lineari, (d) griglia definitiva.

La presenza nella griglia di brusche variazioni altimetriche (veri e propri gradoni) in corrispondenza dei rilevati non pregiudica il buon funzionamento del modello, come visto nel paragrafo 2.5.

Inoltre, per ricostruire l'evento del 1 marzo 2011 si è tenuto conto in fase di creazione del modello digitale del terreno delle rotture arginali segnalate durante i sopralluoghi effettuati. In particolare si sono considerate le tre rotture avvenute circa 2 km a monte dell'attraversamento della SS106 sul Fiume Bradano, le cui lunghezze variavano dai 50 ai 100 metri, e la rottura arginale di circa 30 m di lunghezza riscontrata immediatamente a monte di tale attraversamento.



Figura 6.3. Rotture arginali lungo il fiume Bradano durante la piena del 1 marzo 2011 rilevate nei sopralluoghi (a sinistra) e rappresentate nel modello digitale del terreno (a destra).

Per garantire una corretta schematizzazione del fondo alveo, si è resa necessaria un'ulteriore correzione al dominio di calcolo dal momento che il telemetro laser utilizzato durante il rilievo della costa jonica non è in grado di stimare la quota dei punti al di sotto degli specchi d'acqua. Da un confronto effettuato tra le quote di fondo alveo lette sul grid ricavato a partire dal rilievo laser scan e quelle delle sezioni trasversali

rilevate situ per conto dell'Autorità Interregionale di Bacino della Basilicata, si è visto, infatti, che le differenze altimetriche sono dell'ordine di 1,5 m (figura 6.4). Pertanto a tutte le celle ricadenti in alveo è stata imposto un abbassamento di quota pari a 1,5 m.

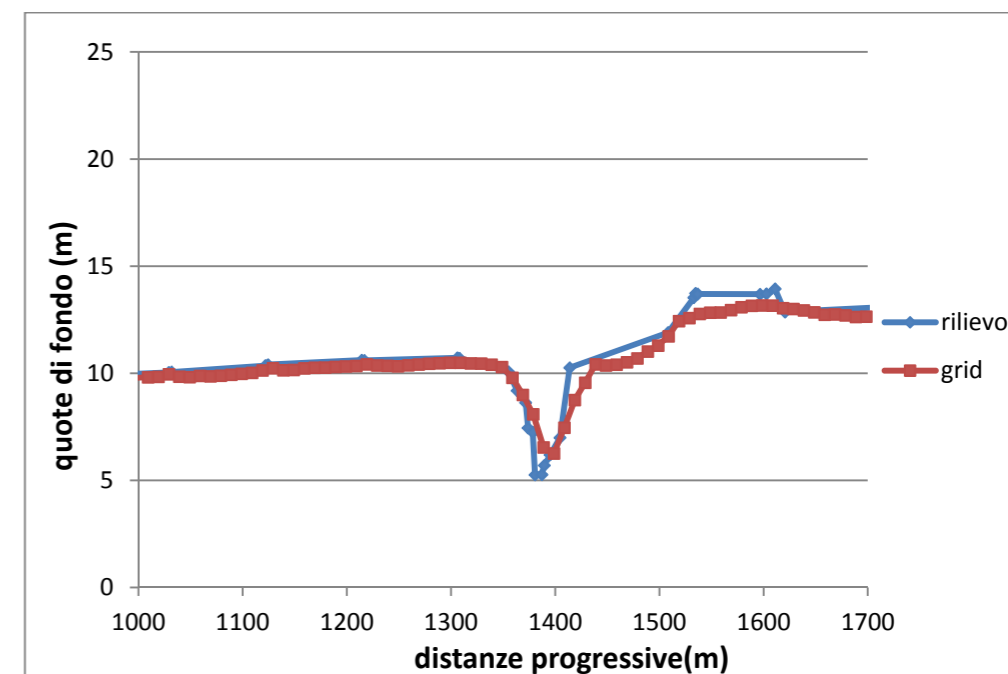


Figura 6.4. Confronto tra una sezione trasversale d'alveo in sito e quella ricavata nella stessa posizione dal grid ottenuto dal rilievo laser scan.

La modellazione non ha riguardato né i corsi d'acqua minori né i canali di bonifica presenti nell'area di studio.

Nella figura 6.5 è riportata la griglia di calcolo definitiva con le relative quote del terreno.

6.3. Risultati della simulazione e confronto con il caso reale

La simulazione idraulica è stata effettuata considerando come condizione al contorno di monte l'idrogramma relativo all'evento del 1 marzo 2011 visto nel precedente capitolo e ipotizzando, come condizione al contorno di valle, un livello idrico alla foce costante corrispondente a 0,5 m s.l.m. in accordo con lo studio realizzato dall'Autorità di Bacino della Basilicata per la delimitazione delle aree inondabili lungo la costa jonica lucana. Si è utilizzato un passo temporale di calcolo pari a 2 secondi.

In figura 6.6 è riportato il risultato della simulazione dell'evento di marzo 2011 in termini di massima area inondabile ed involucro dei massimi tiranti raggiunti.

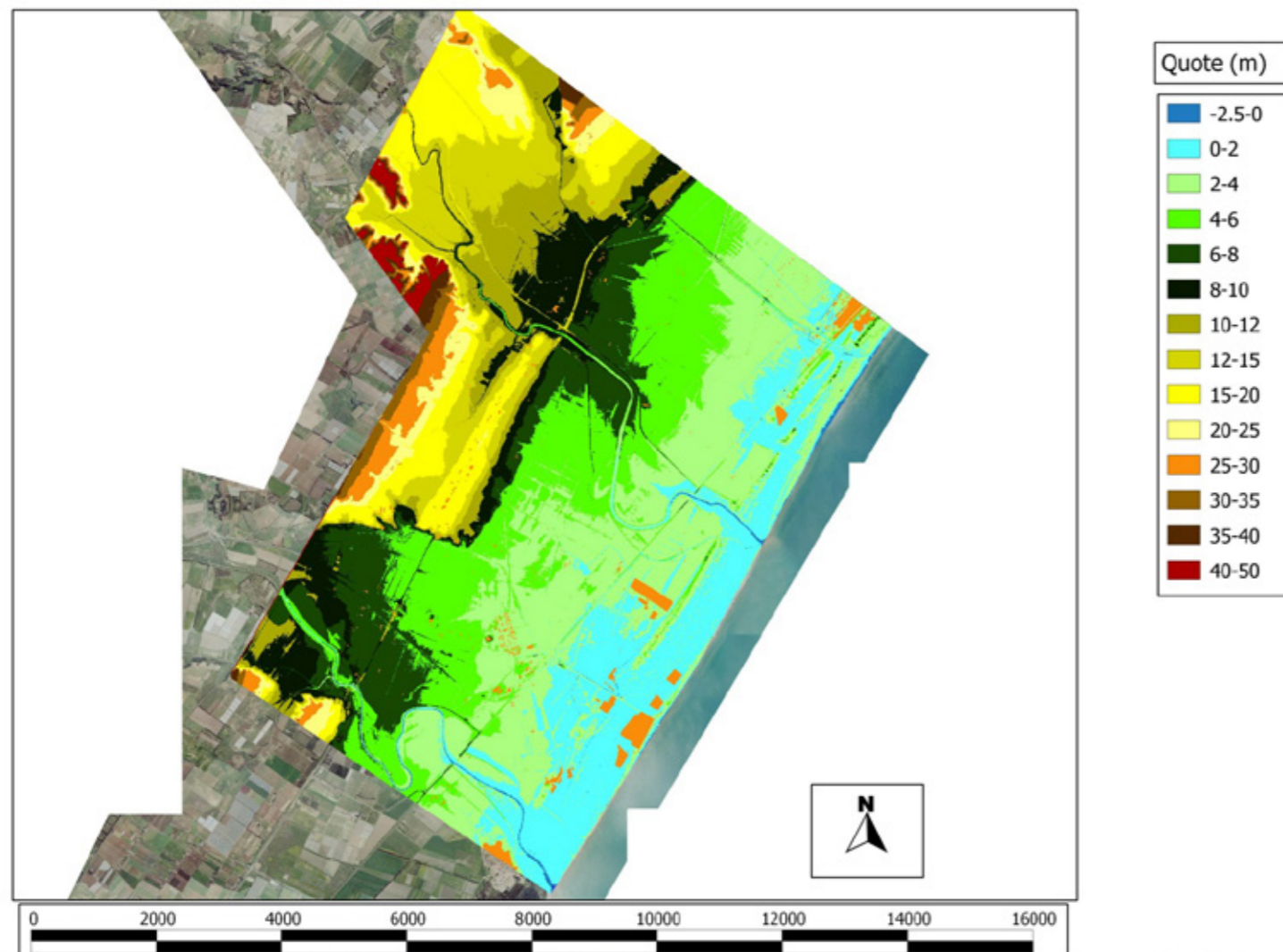


Figura 6.5. Griglia di calcolo definitiva utilizzata nel modello FLORA-2D.

L'estensione dell'area inondabile calcolata è stata confrontata con le immagini satellitari COSMO-SkyMed (figura 6.7) fornite dall'Ufficio Protezione Civile della Regione Basilicata. Tali immagini sono state acquisite in un arco temporale che va dal pomeriggio del 2 marzo 2011 alla mattina del 3.

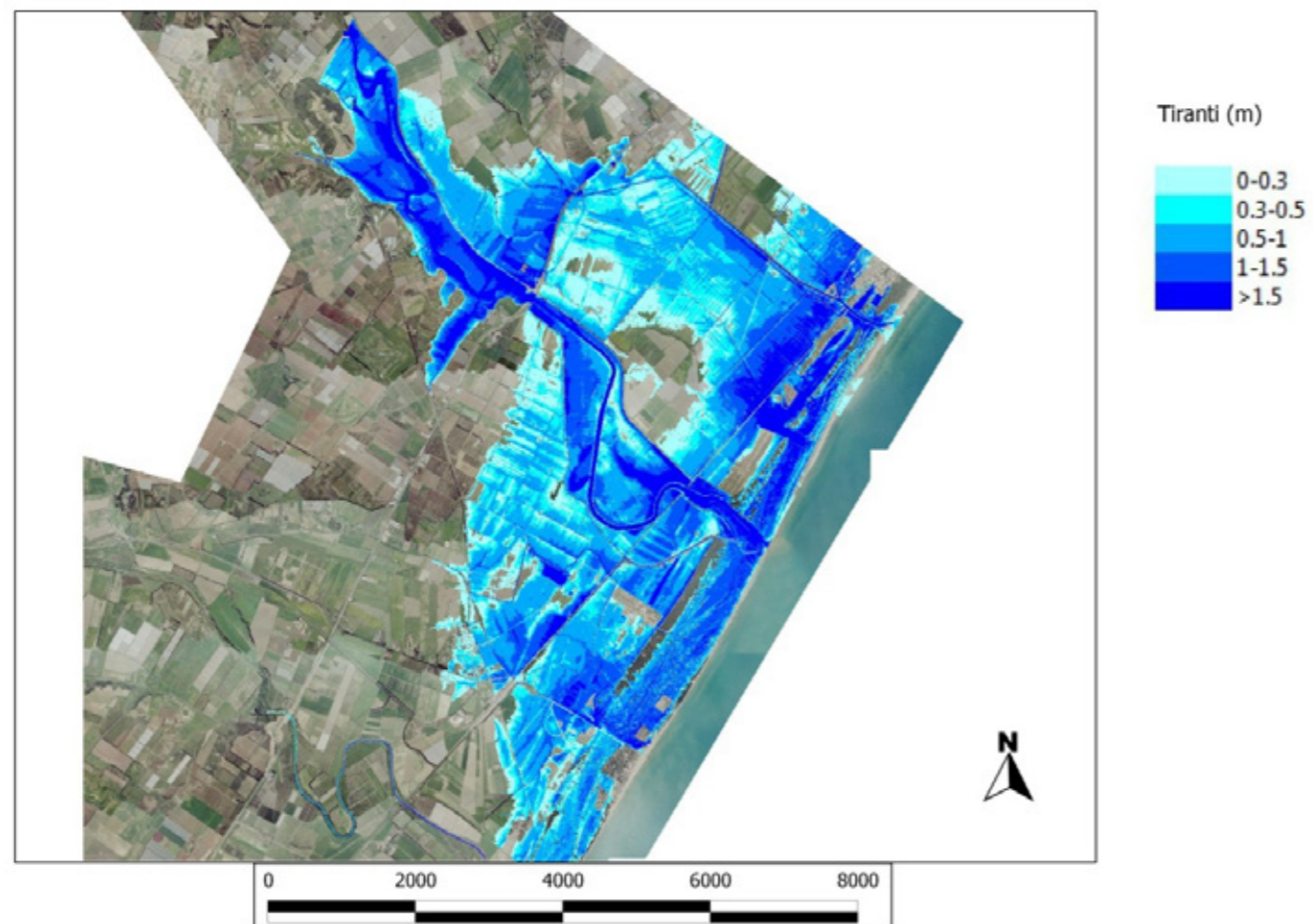


Figura 6.6. Risultati della simulazione dell'evento del 1 marzo 2011 in termini di massima area inondabile e inviluppo dei massimi tiranti raggiunti.

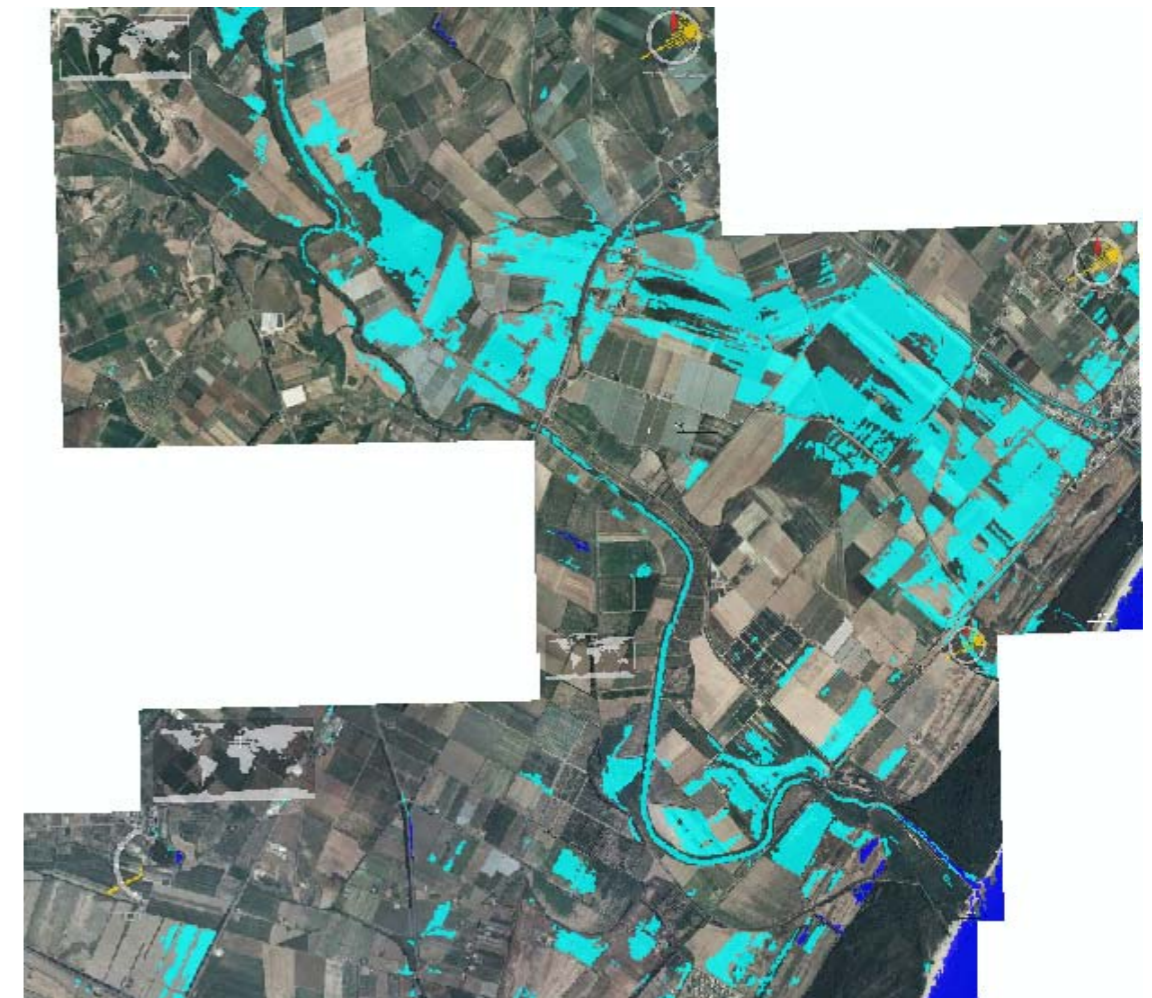


Figura 6.7. Evento alluvionale del 1 marzo 2011 – Immagine satellitare COSMO-SkyMed.

Il confronto è riportato nella figura 6.8.

Dalla sovrapposizione tra aree inondate simulate ed osservate è possibile notare come in sinistra idraulica del fiume Bradano il risultato ottenuto dal modello sia in buon accordo con le osservazioni da satellite.

Una sovrastima del modello sembrerebbe esserci per quel che riguarda le aree in destra idraulica. Bisogna tuttavia considerare che l'immagine satellitare probabilmente non riesce a rilevare le zone d'acqua che sono coperte da vegetazione arborea ad alta densità. L'area occupata dalla pineta, per esempio, sebbene allagata nella realtà (figura 6.9) e ben simulata con il modello FLORA-2D, risulta completamente asciutta sull'immagine.

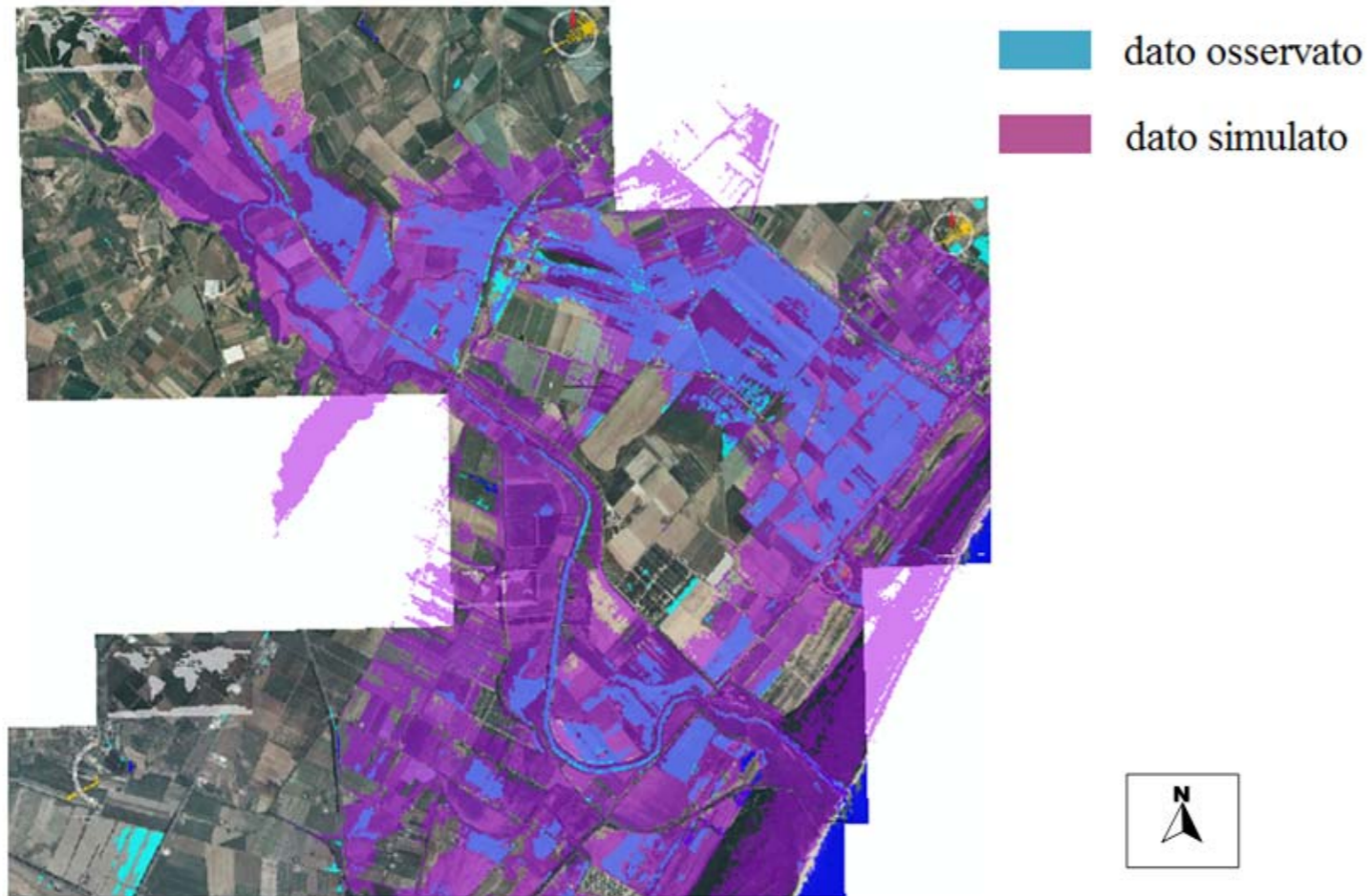


Figura 6.8. Evento alluvionale del 1 marzo 2011 – confronto tra massima area simulata e osservata.



Figura 6.9. Allagamento della pineta in seguito all'evento del 1 marzo 2011.

Inoltre, dato che le immagini satellitari sono state acquisite diverse ore dopo l'evento di piena, alcune zone potrebbero risultare non più allagate.

6.4. Considerazioni sulla variazione temporale della scabrezza

Dato che l'elemento più innovativo di quest'attività di ricerca è consistito nell'implementare un modello idraulico capace di computare la variazione temporale, oltre che spaziale, del coefficiente di resistenza al moto offerto dalla vegetazione, si è ritenuto opportuno concentrare l'attenzione sui risultati del modello FLORA-2D in termini di coefficiente di scabrezza relativi a due diverse celle allagate: una ricadente in un'area ricoperta da vegetazione rigida ed un'altra ricadente in un'area ricoperta da vegetazione flessibile.

Nel diagramma di figura 6.10 è riportata la variazione temporale del coefficiente di scabrezza n di Manning in una cella ricadente in un frutteto. Per comprendere meglio quello che accade, nello stesso diagramma è stata altresì riportata anche la variazione temporale del tirante.

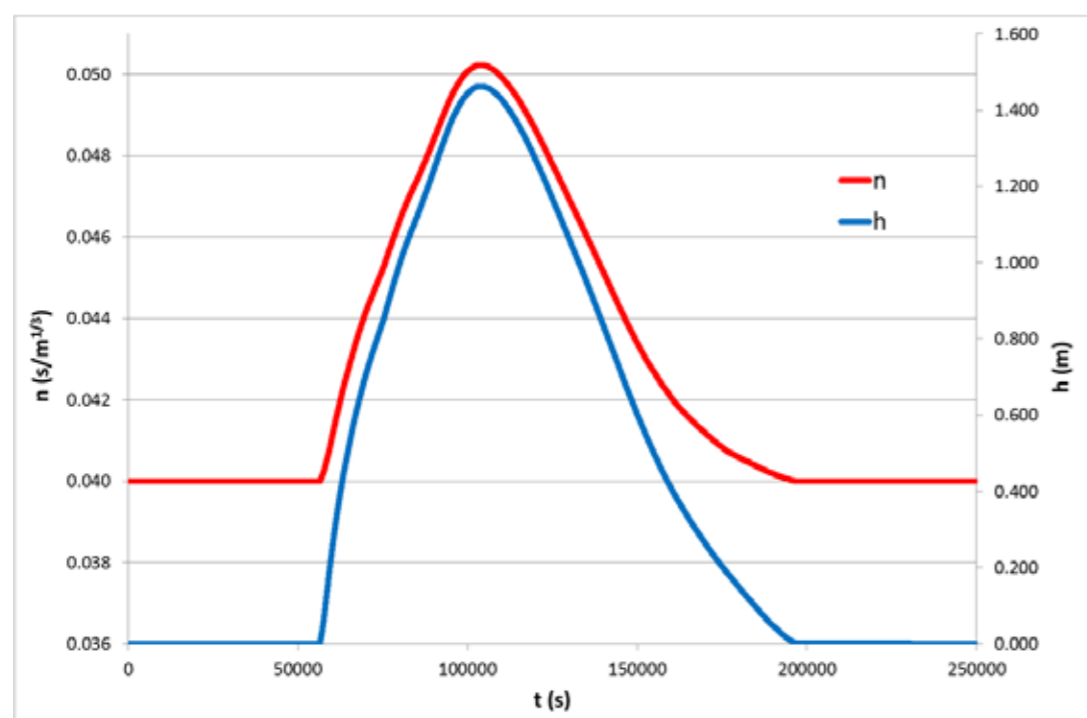


Figura 6.10. Variazione temporale del coefficiente di Manning e del tirante in una cella ricoperta da vegetazione arborea.

Si nota che, in accordo con la formula di Petryk e Bosmajian (1.4) utilizzata nel modello, l'andamento nel tempo del coefficiente di scabrezza in presenza di vegetazione arborea è analogo a quello del tirante.

Come anticipato nel paragrafo dedicato agli aspetti teorici della proposta di Freeman et al., molto più complessa è la stima della scabrezza in presenza di vegetazione flessibile in quanto le variabili che entrano in gioco sono più numerose del caso di vegetazione arborea. Nel diagramma di figura 6.11 è riportato l'andamento temporale del coefficiente di scabrezza in una cella ricadente in un'area ricoperta da arbusti. In questo caso si è ritenuto opportuno visualizzare oltre che la variazione temporale del tirante, anche quella della velocità, visto che essa rientra tra le grandezze che influenzano il coefficiente di scabrezza.

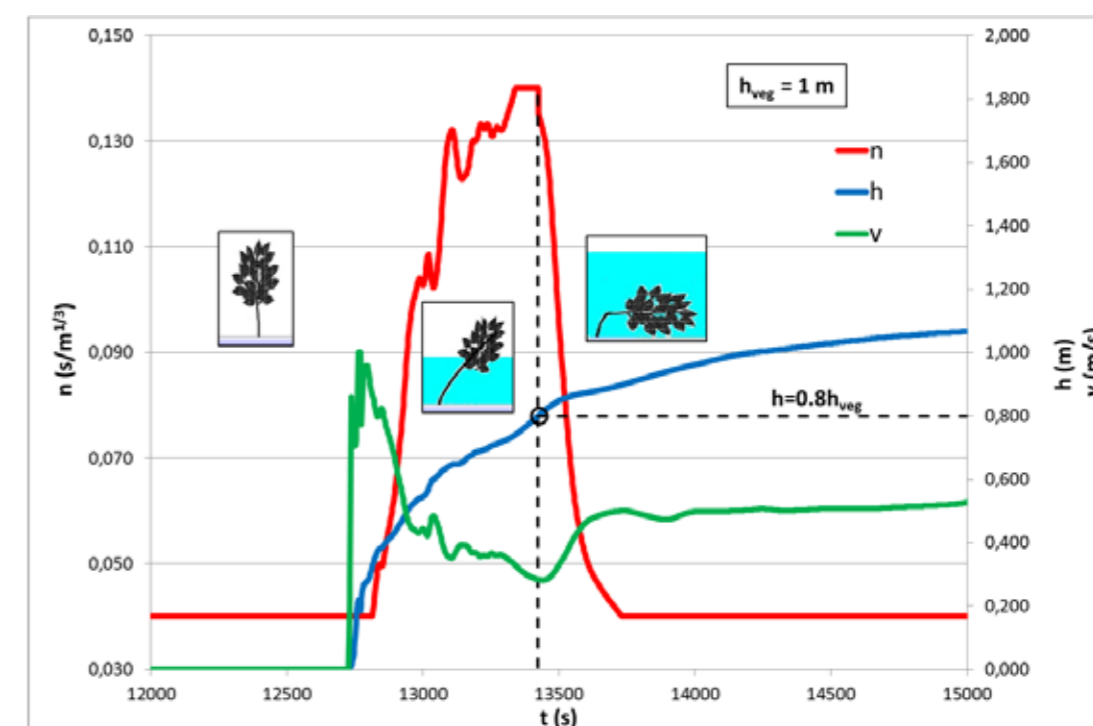


Figura 6.11. Variazione temporale del coefficiente di Manning, del tirante e della velocità in una cella ricoperta da vegetazione flessibile.

Anche in questo caso il modello sembra ben interpretare la teoria utilizzata per la sua implementazione. Si nota quindi che, in accordo con quanto proposto da Freeman et al. (formule 1.7 e 1.8), all'aumentare del tirante il coefficiente di scabrezza aumenta in condizioni di sommersione parziale ($h < 0,8$ hveg) e diminuisce in condizioni di sommersione totale ($h > 0,8$ hveg) come conseguenza del piegamento delle chiome. Analogamente la velocità, dopo un picco iniziale in corrispondenza dell'impatto del fronte sulla cella dovuto al fatto di aver trascurato i termini convettivi nelle equazioni del moto, diminuisce in condizioni di sommersione parziale a causa dell'aumentare della resistenza offerta dalla vegetazione e aumenta in condizioni di sommersione totale col piegarsi della pianta e quindi col diminuire della sua resistenza al moto.

Nell'implementazione del modello si è tenuto conto, attraverso l'inserimento di opportuni controlli, di tutti i limiti di validità della teoria di Freeman et al. visti in precedenza.

Sulla stessa area di studio considerata in questo lavoro sono stati effettuati, da parte del Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente dell'Università degli Studi della Basilicata, diversi studi con l'utilizzo di diversi modelli di simulazione idraulica commerciali, tra cui il modello Mike Flood del Danish Hydraulic Institute.

Non si è ritenuto opportuno confrontare i risultati ottenuti in termini di tirante e di estensione delle aree inondabili, con quelli del Mike Flood, in quanto nel modello FLORA-2D non è ancora stato inserito un modulo che simuli la propagazione della piena in presenza di singolarità. Inoltre il Mike Flood, diversamente dal FLORA-2D, è un modello che accoppia una modellazione monodimensionale in alveo ad una modellazione bidimensionale fuori alveo. È risultato comunque interessante confrontare i tempi di simulazione dei due modelli, relativamente ad applicazioni effettuate

utilizzando lo stesso dominio di calcolo e considerando le stesse condizioni al contorno (tabella 6.1).

Da tale confronto si evince che i tempi di simulazione del modello FLORA-2D sono molto inferiori. Ciò è dovuto sia alle semplificazioni assunte nelle equazioni del moto, sia alla maggiore stabilità del modello FLORA-2D che consente l'utilizzo di time step più alti.

TEMPI DI SIMULAZIONE		
	FLORA-2D	MIKE FLOOD
T=30 anni	15 h	1g 10h
T=200 anni	21 h	4g 19h
T=500 anni	23 h	5g 6h

Tabella 6.1. Confronto tra i tempi di simulazione del modello FLORA-2D e del modello Mike Flood.

Conclusioni e sviluppi futuri

La parte più innovativa e anche più laboriosa della presente tesi di dottorato riguarda l'implementazione del modello numerico bidimensionale di simulazione idraulica denominato FLORA-2D (FLOOD and Roughness Analysis) realizzata nell'ambito della collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente (DIFA) dell'Università degli Studi della Basilicata e la società di ricerca RSE (Ricerca sul Sistema Energetico).

Partendo dalla metodologia proposta nel 1994 da Molinaro et al. riguardante un modello bidimensionale per lo studio degli allagamenti in alvei a topografia complessa e in presenza di singolarità artificiali e naturali, si è implementato un modello idraulico capace di computare la variazione sia spaziale che temporale del coefficiente di resistenza al moto offerto dalla vegetazione.

FLORA-2D consente di calcolare il coefficiente di scabrezza n di Manning distinguendo tra vegetazione rigida e flessibile, risolvendo l'equazione di Petryk e Bosmajian nel primo caso e quella di Freeman et al., invece, nel secondo. Per la vegetazione flessibile è altresì possibile distinguere la condizione di totale sommersione da quella di parziale sommersione.

FLORA-2D, pertanto, supera l'incertezza nella valutazione del coefficiente di scabrezza che si presenta utilizzando altri modelli simili, per i quali bisogna ricorrere a metodi fotografici e descrittivi. Le stesse tabelle di letteratura, che contengono range

molto ampi, funzione non solo del tipo di vegetazione, ma anche del rapporto fra l'altezza d'acqua e le dimensioni della vegetazione stessa, necessitano di una conoscenza a priori dei valori delle altezze d'acqua.

Il codice, scritto in Fortran, richiede per l'inserimento dei dati di input la creazione di quattro differenti file, ciascuno relativo ad una tipologia di informazione in ingresso: uno relativo al terreno, uno che riguarda il dominio, uno relativo alle condizioni iniziali ed alle condizioni al contorno ed infine, in aggiunta a quanto proposto da Molinaro et al., un ulteriore file nel caso si voglia tenere conto della variabilità nel tempo del coefficiente di scabrezza.

Il codice fornisce in output tutta una serie di informazioni quali la definizione del dominio allagato, l'identificazione delle celle allagate, l'altezza d'acqua in ogni cella, la portata sui lati di ogni cella, il numero di Froude, l'involuppo dei massimi dell'altezza d'acqua e della portata fino all'istante di tempo considerato, le evoluzioni temporali dell'altezza d'acqua, della velocità e del coefficiente di scabrezza nelle celle del dominio scelte in fase di input, le informazioni su come la soluzione è riuscita a giungere a convergenza ad ogni passo temporale, il bilancio dei volumi entranti, uscenti ed accumulati per ogni passo temporale.

Dalle analisi sulle variazioni temporali del coefficiente di scabrezza effettuate sulle singole celle del dominio di calcolo, si evince che il modello interpreta bene sia quanto proposto da Petryk e Bosmajian riguardo la scabrezza in presenza di vegetazione rigida, sia l'approccio empirico di Freeman et al. per la valutazione della scabrezza prodotta dalla vegetazione flessibile. Nel primo caso si nota come la variazione del coefficiente di scabrezza sia direttamente legata alla variazione dell'altezza d'acqua nella cella, mentre nel secondo caso il coefficiente di scabrezza tende ad aumentare fin

quando ci si trova in condizioni di sommersione parziale ed a decrescere in condizioni di sommersione totale, come normale conseguenza del piegamento delle piante.

Tuttavia si ritiene che la teoria di Petryk e Bosmajan sia di più facile implementazione in un modello idraulico rispetto a quella di Freeman et al., in quanto quest'ultima è legata alla non semplice determinazione di diversi parametri e, inoltre, presenta dei limiti di validità sia per quel che riguarda le caratteristiche della corrente che della vegetazione.

Una prima validazione del modello è stata effettuata sulla base dei dati a disposizione per l'evento di piena verificatosi il 1 marzo 2011. Il modello afflussi-deflussi AD2 di Fiorentino e Manfreda è stato utilizzato per il calcolo degli idrogrammi delle aste fluviali a monte dell'area di studio a partire dai dati di pioggia, e il metodo di Muskingum è stato utilizzato per il calcolo della propagazione delle portate.

L'estensione dell'area inondabile calcolata è stata confrontata con le immagini satellitari COSMO-SkyMed fornite dall'Ufficio Protezione Civile della Regione Basilicata. Tali immagini sono state acquisite in un arco temporale che va dal pomeriggio del 2 marzo 2011 alla mattina del 3.

Dalla sovrapposizione tra aree inondate simulate col modello FLORA-2D ed osservate da satellite, si è visto come il risultato ottenuto dal modello sia sostanzialmente in accordo con le immagini COSMO-SkyMed. Le differenze sono dovute soprattutto al fatto che l'immagine satellitare probabilmente non riesce a rilevare le zone d'acqua che sono coperte da alta densità di vegetazione arborea, come del resto confermato dai sopralluoghi effettuati all'indomani dell'evento. Bisogna altresì considerare che le immagini satellitari sono state acquisite diverse ore dopo l'evento di piena e che quindi alcune zone potrebbero risultare non più allagate. Inoltre nel modello

non sono state introdotte le singolarità presenti (attraversamento della SS106 ed attraversamento ferroviario).

Per quanto riguarda i tempi di simulazione, le semplificazioni assunte nelle equazioni del moto consentono al modello di essere molto veloce con tempi molto inferiori di quelli di modelli commerciali simili applicati sulla stessa area utilizzando gli stessi idrogrammi e la stessa risoluzione. Si è rivelato anche un modello molto stabile, permettendo l'utilizzo di time step non eccessivamente bassi.

Per la gestione dei dati spaziali, sia in fase di input per la creazione della geometria di calcolo, sia in fase di output per la realizzazione delle mappe, è stato utilizzato uno strumento GIS Open Source, il Quantum GIS, molto simile nell'interfaccia utente e nelle funzioni ai pacchetti GIS commerciali.

La scelta del GIS da utilizzare è stata indirizzata verso l'Open Source in coerenza con l'idea di rendere di libero utilizzo lo stesso modello FLORA-2D.

Approfondimenti futuri della ricerca potrebbero essere indirizzati al miglioramento dell'interfaccia e allo sviluppo di procedure di calcolo che consentano:

- di inserire nel modello le singolarità;
- di realizzare un modello integrato mono e bidimensionale per consentire una più corretta rappresentazione della propagazione (monodimensionale) delle piene dell'alveo e dei fenomeni di allagamento (bidimensionali) fuori alveo.

Inoltre, sarebbe auspicabile una integrazione della validazione dei risultati del modello qui presentata.

Infine sarebbe interessante istituire un confronto sistematico tra l'impostazione presentata e quella più tradizionale che, pur prevedendo una differenziazione spaziale

della scabrezza, considera la stessa costante nel tempo nell'arco di evoluzione temporale del fenomeno.

Bibliografia

Ackermann, F. (1999). *Airborne laser scanning - present status and future expectations*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54: 64-67.

Aldridge, B.N. and Garrett, J.M. (1973). *Roughness coefficients for stream channels in Arizona*. U.S. Geological Survey Open-File Report, 87 p.

Andersen, H. E., McGaughey, R. J., Reutebuch, S. E. (2005). *Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data*. Remote Sensing Environmental, vol. 94, no. 4, pp. 441–449.

Arcement, G. J., Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. United States Geological Survey Water-supply Paper 2339.

Armanini, A. (1999). *Principi di idraulica fluviale*. Ed. BIOS, Cosenza.

Autorità di Bacino della Basilicata. (2011). *Piano Stralcio per la Difesa dal Rischio Idrogeologico*.

Casagrande, L., Cavallini, P., Frigeri, A., Furieri, A., Marchesini, I., Neteler, M. (2012). *GIS Open Source*. Dario Flaccovio Editore.

- Casas, A., Benito, G., Thorndycraft, V.R., Rico, M. (2006). *The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modeling*. Earth Surface Processes and Landforms 31, 444-456.
- Casella, V. (1999). *Introduction to airborne laser scanning, a GPS-INS based technique*. Reports on Geodesy n. 3 (44), Warsaw University of Technology, ISBN 83-85287-43-4, 249-2541999.
- Chiaradia, E.A., Bischetti, G.B., Gandolfi, C., Savi, F. (2006). *Stima dei coefficienti di resistenza al moto in un canale con vegetazione sul fondo*. Atti del XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Roma.
- Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Colson, B.E., Arcement, G.J., and Ming, C.O. (1979). *Backwater at bridges and densely wooded flood plains, Coldwater River near Red Banks*. Mississippi: U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-593.
- Cowan, W.L. (1956). *Estimating hydraulic roughness coefficients*. Agricultural Engineering, v. 37, no. 7, p. 473-475.
- Cunge, J.A. (1969). *On the subject of a flood propagation computation method*. J. of Hydraulic Research, vol. 7, n. 2, pp. 205-230.
- Di Cristo, C., Leopardi, A. (2002). *Modellazione idrodinamica di un canale con cambio di scabrezza al fondo*. XXVIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza.

- D'Ippolito, A., Veltri, M. (2008). *Influenza della vegetazione sulle portate al colmo in un tratto di un piccolo bacino*. Atti del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura per il miglioramento e la conservazione dei boschi italiani.
- European Environment Agency (2006). *Corine Land Cover raster data - version 15*.
- Fathi-Moghadam, M. & Kouwen, N., Nonrigid. (1997). *Nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 123(1), 51-57.
- Fiorentino, M., Margiotta, M.R. (1998). *La valutazione dei volumi di piena e il calcolo semplificato dell'effetto di laminazione dei grandi invasi*. Tecniche per la difesa dall'inquinamento, G. Frega, BIOS 203-222.
- Flood, M. (2001). *Lidar activities and research priorities in the commercial sector*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(3/W4): 3-7.
- Freeman, G.E., 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.
- Giosa, L. (2007). *Tecnologia laser-scan e modelli idraulici per la valutazione del rischio di inondazione nelle pianure costiere*. Tesi di dottorato in Ingegneria Idraulica per l'Ambiente e il Territorio - XX Ciclo.
- Grippa, A. (2011). *Caratterizzazione della resistenza al moto in aree vegetate e sua influenza nella valutazione del rischio di inondazione*. Tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi della Basilicata.
- Istituto Nazionale di Economia Agraria (2006). *Carta forestale della Basilicata*.

- Kouwen, N., Fathi-Moghadam, M. (2000). *Friction factors for coniferous trees along rivers*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 126(10), 732-740.
- Järvelä, J. (2002). *Determination of flow resistance of vegetated channel banks and floodplains*. River Flow, Lisse, Swets Zeitlinger, 311-318.
- Maione, U. (1995). *Appunti di Idrologia Vol.3*. Ed. La Goliardica Pavese, Rozzano (MI).
- Marchi, E., Rubatta, A. (1981). *Meccanica dei fluidi*. Ed. UTET, Torino.
- Medina, V. C. I., Bateman, A. P., Velasco, M. D. (2002). *A new approach to solving boundary conditions in shallow water equations using a Riemann solver*. River Flow.
- Molinaro P., Di Filippo A., Ferrari F. (1994). *Modelling of Flood Wave Propagation Over Flat Dry Areas of Complex Topography in Presence of Different Infrastructures*. Proceedings of the Conference on Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Area.
- Mumtaz, S. A., Mooney, K. (2008). *Fusion of High Resolution Lidar and Aerial Images for Object Extraction*. ICAST, vol. 2, p. 137-142 ISBN 978-1-4244-3300-1.
- National Environmental Research Council (NERC). (1975). *Flood Studies Report*, Vol. I, London.
- Pfeifer, N. and Briese, C. (2007). *Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(3/W52): 311-319.
- Petryk, S. and Bosmajian, G. (1975). *Analysis of flow through vegetation*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE 101 (7), 871-884.

- Ree, W.O. and Crow, F.R. (1977). *Friction factors for vegetated waterways of small slope*. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, ARS-S-151, 56 p.
- Regione Lombardia (2008). *La riqualificazione dei canali agricoli - Linee guida per la Lombardia*, a cura di Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Conti, M., Di Fidio, M., Morlotti, E., Cremascoli F., Quaderni della ricerca n.92.
- Righetti, M. (2004). *La resistenza idrodinamica delle piante*. Appunti del Corso di aggiornamento: Vegetazione in alveo e ingegneria naturalistica, aspetti applicativi e progettuali, Trento.
- Rosano, R., Manfreda, S., Fiorentino, M., Sole, A. (2008). *Sviluppo ed ingegnerizzazione di un modello per la simulazione idrologica a scala di bacino*. XXXI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Perugia.
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S. and Kubik, K. (2007). *Building detection by fusion of airborne laser scanner data and multi-spectral images: Performance evaluation and sensitivity analysis*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 62(2): 135-149.
- Schneider, V.R., Board, J.W., Colson, B.E., Lee, F.N., and Druffel, L. (1977). *Computation of backwater and discharge at width constrictions of heavily vegetated flood plains*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 76-129, 64 p.
- Sithole, G. and Vosselman, G. (2004). *Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 59(1-2): 85-101.

Sole, A., Giosa, L., Nolè, L., Medina, V., Bateman A. (2008). *Flood risk modelling with LiDAR technology*. International Conference Flood Recovery Innovation and Response FRIAR 2008, 27- 36.

Sole, A., Giosa, L., Cantisani, A. (2010) *Sensitivity Analysis to roughness for the assessment of flood hazard in lowland areas*. XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Palermo.

Sole, A., Mancusi, L., Giosa, L., Cantisani, A., Grippa, A., Albano, R., Varasano, A. (20120). *Effetti della vegetazione nella valutazione delle aree a rischio di inondazione*. XXXIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Brescia.

Suárez, J.C., Ontiveros, C., Smith, S. and Snape, S. (2005). *Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry*. Computers & Geosciences, 31(2): 253-262.

US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*.

Varasano, A. (2009). *Tecniche di classificazione della vegetazione mediante dati LiDAR e immagini multi spettrali*. Tesi di laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni, Università degli Studi della Basilicata.

Vischer, V.D., O'Platka, M. (1998). *Der strömungswiderstand eines flexiblen ufer und vorlandbewuchses*. Wasserwirtschaft, 88, 1-5.

Woodexplorer (2008) : www.thewoodexplorer.com.

Ringraziamenti

Durante questi tre anni ho avuto il piacere di collaborare con diverse persone che hanno contribuito alla mia crescita umana e professionale, nonché alla realizzazione di questo lavoro. Vorrei quindi esprimere a loro tutta la mia gratitudine.

Un ringraziamento particolare va alla Prof.ssa Aurelia Sole per la sua grande umanità e disponibilità. La sua guida e i suoi preziosi consigli mi hanno permesso di portare a termine questo lavoro con la massima serenità.

Altrettanto vivamente ringrazio l'Ing. Leonardo Mancusi della società di ricerca RSE per il fondamentale supporto scientifico offerto alla mia attività di ricerca.

Un sincero ringraziamento va inoltre all'Ing. Luciana Giosa, che con competenza, amicizia e generosità, è sempre stata pronta ad aiutarmi con quotidiani confronti e suggerimenti.

Ringrazio altresì l'Ing. Salvatore Manfreda per l'importante contributo fornito nell'interpretazione dei dati idrologici.

Un doveroso ringraziamento va all'Autorità Interregionale di Bacino della Basilicata e all'Ufficio Protezione Civile della Regione Basilicata per aver messo a disposizione un gran numero di dati, senza i quali tale lavoro non sarebbe stato possibile.

Ringrazio, infine, tutti i colleghi con cui ho condiviso gli anni del Dottorato con le fatiche e le soddisfazioni che li hanno caratterizzati.

