

ANALISI DI SENSIBILITÀ NELLA MODELLAZIONE DELLE INONDAZIONI DI AREE PIANEGGIANTI

SENSITIVITY ANALYSIS IN FLOOD MODELING OF FLAT AREAS

AURELIA SOLE, LUCIANA GIOSA, ANDREA CANTISANI, DINA STATUTO & LUCIA NOLE'

Università degli Studi della Basilicata, Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente, Italy

RIASSUNTO

In generale, l'individuazione di aree sottoposte al pericolo di inondazione richiede la conoscenza dettagliata dell'area di studio (corso d'acqua ed aree di espansione delle piene), l'analisi idrologica e la modellazione idraulica.

La stima del pericolo di inondazione è oggi agevolata da sistemi di rilievo che consentono di creare modelli digitali del terreno di estremo dettaglio (COBBY *et alii*, 2001), da modelli matematici sofisticati e da uno sviluppo hardware e software che garantisce sempre più elaborazioni complesse in tempi accettabili. Tuttavia, la costruzione del modello di simulazione rappresenta sempre un compromesso tra potenzialità degli strumenti utilizzati e grado di dettaglio che si vuole raggiungere, pertanto può essere utile verificare l'entità delle variazioni dei parametri idraulici di output rispetto alla scelta operata sui parametri in input. Questo è ancora più vero quando non si possiedono sufficienti dati osservati di eventi di piena da utilizzare per la taratura dei modelli.

Facendo riferimento ad un'area estremamente pianeggiante, il presente lavoro mira proprio ad analizzare i risultati delle simulazioni idrodinamiche condotte con modelli matematici bidimensionali in funzione del grado di dettaglio raggiunto nella schematizzazione dell'area di studio (espresso attraverso la risoluzione del dominio di calcolo) e della resistenza al moto delle aree interessate da fenomeni di inondazione (*floodplain*).

TERMINI CHIAVE: modellazione idrodinamica, analisi di sensibilità, resistenza al moto

INTRODUZIONE

Un'alluvione è solitamente determinata da precipitazioni estreme che provocano un deflusso in alveo superiore alla capacità di smaltimento del reticolo idrografico.

In molti paesi europei che sono solitamente esposti al rischio di alluvione, la determinazione delle aree inondabili è regolata da specifiche leggi (DIRETTIVA EUROPEA, 2007) che definiscono i criteri generali con cui gli studi e le mappe della pericolosità e del rischio idraulico devono essere intrapresi e preparati.

Negli Stati Uniti la Federal Emergency Management Agency (NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 2009) si interessa di definire criteri ampiamente accettati per la valutazione del rischio di alluvione al fine di garantire la

ABSTRACT

The study of flooded areas is derived from detailed knowledge of the area under consideration (river and floodplain), hydrological analysis and hydraulic modeling.

The estimated risk of flooding is now facilitated by survey systems able to create enable the creation of highly detailed digital terrain models (COBBY *et alii*, 2001), by complex mathematical models and sophisticated hardware and software which permit the achievement of complex elaborations within satisfactory time periods. However, the construction of the simulation model is always a compromise between the capability of the instruments and the detail that you want to achieve. So it can be useful to verify the extent of changes in hydraulic parameters of output compared to the choices made on the input parameters. This is especially true when observed data of flood events are absent.

Considering an extremely flat area, this work aims to analyze the results of hydrodynamic bi-dimensional simulations depending on the detail achieved in the characterization of the study area (expressed through the computational domain resolution) and the floodplain roughness.

KEY WORDS: hydrodynamic modeling, sensitivity analysis, surface roughness

INTRODUCTION

A flood is usually caused by extreme rainfall that determines discharges exceeding the drainage capacity of the river.

In most European countries that are often exposed to the risk of flooding, the study of flooded areas is regulated by special rules (EUROPEAN DIRECTIVE, 2007) which identify the general criteria for the drawing up of studies and maps of hydraulic hazard and risk.

Furthermore, in the United State of America the Federal Emergency Management Agency (NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 2009) has engaged in the definition of widely accepted criteria for the assessment of flood risk in order to achieve an objective determination of the insurance premiums associated with such risk.

determinazione oggettiva dei premi assicurativi associati ad un tale tipo di rischio. Tale agenzia ha predisposto un accurato studio per valutare i fattori che influenzano l'accuratezza delle mappe di inondazione, per stimare i benefici economici di una mappatura delle aree inondabili più precisa e per ricercare le modalità per migliorare la determinazione delle aree inondabili, la comunicazione e la gestione dei dati correlati alle alluvioni.

Il rischio rappresenta il danno correlato all'evento calamitoso e dipende dalla pericolosità (H), dalla vulnerabilità (V) e dall'esposizione (E) al rischio come specificato nell'equazione 1.

Sinteticamente, H rappresenta la probabilità che un dato fenomeno di instabilità si verifichi in un determinato intervallo di tempo ed in una certa area e con una determinata intensità, V_i è il grado di perdita prodotto su un certo elemento e_i o gruppo omogeneo di elementi esposti a rischio ed E, infine, è l'insieme degli elementi a rischio all'interno dell'area esposta.

La vulnerabilità (V) del territorio alle inondazioni, ma più in generale alle catastrofi naturali, è senza dubbio in aumento. Questo a causa dell'uso intensivo del suolo da parte dell'uomo, dell'incremento della densità di popolazione e della massiccia presenza di infrastrutture. Nella stima del rischio, rappresenta un parametro difficile da quantificare. L'esposizione (E) è, invece, associata al numero di persone o al valore monetario degli elementi a rischio.

Le elaborazioni descritte nel presente lavoro si riferiscono esclusivamente al pericolo di inondazione che, definita l'intensità o il tempo di ritorno, risulta essere associata a due variabili: l'estensione geografica dell'area coinvolta e la frequenza.

Oggi le valutazioni della pericolosità di inondazione sono affrontate con modelli di simulazione idrodinamica sia monodimensionali (1D) che bidimensionali (2D) (HORRITT & BATES, 2002). La scelta è determinata dalle caratteristiche morfologiche dell'area di studio. I modelli 1D sono usati quando si può rinvenire un'unica direzione di propagazione della corrente (alvei di montagna o alvei di pianura arginati). Quelli 2D, invece, sono usati quando la componente della velocità della corrente ortogonale alla direzione del fiume non può essere trascurata (alvei di pianura). In alternativa possono essere utilizzati modelli integrati mono e bidimensionali.

Quale che sia il modello scelto, l'area di studio (alveo e aree di inondazione) necessitano di una adeguata rappresentazione. Oggi i moderni sistemi di rilievo del territorio consentono la costruzione di modelli digitali del terreno (DTM) di estremo dettaglio. La qualità del DTM influenza l'accuratezza dei livelli idrici calcolati, l'estensione dell'area allagata e, quindi, la pericolosità di inondazione.

L'accuratezza verticale del DTM è particolarmente importante nella determinazione dell'estensione delle aree inondabili, specie in territori particolarmente pianeggianti, dal momento che ad errate quote del terreno corrisponde un'errata estensione dell'area potenzialmente allagabile.

Nelle aree pianeggianti, in alcuni casi, come ad esempio quella descritta di seguito, si riscontrano piccole differenze di quota anche per diversi chilometri e l'allagamento può interessare vaste porzioni di territorio, per lo più con valori di velocità e tirante

This Agency has prepared a careful study to examine the factors that affect flood map accuracy, assess the economic benefits of more accurate flood maps, and identify ways of improving flood mapping, communication, and management of flood-related data.

Risk is the damage related to natural disaster and depends on the hazard (H), the vulnerability (V) and the exposure (E) as specified in the in the equation 1.

$$R_i = H \cdot \sum_{i=1}^n V_i \cdot e_i \quad (1)$$

Briefly, H is the probability that a given instability occurs at a specified time and in a specified area and with a given intensity, V_i is the degree of loss realized on an element e_i , or homogeneous group of elements exposed to risk and, finally, E is the set of elements at risk within the exposed area.

Territorial vulnerability (V) in relation to floods and to natural disasters in general is undoubtedly growing. This is due to intensive land use as well as increased population density and infrastructures. In risk assessments, vulnerability is the most difficult parameter to quantify. Exposure (E), instead, is associated with the number of people or the monetary value of the elements at risk.

The evaluations described in this paper only concern flood hazard. Based on a given intensity or return period, it is related to two variables: the geographical extent of the areas involved and the frequency.

Today, flood hazard is studied with mono (1D) and two-dimensional (2D) hydrodynamic simulation models (HORRITT & BATES, 2002). The choice depends on the morphological characteristics of the study area. 1D models are used when there is only one principal direction of flow velocity (mountain rivers or lowland rivers with levees). 2D models, are used when the velocity component of flow, orthogonal to the channel direction, is not negligible (lowland rivers). Additionally combined mono and bi-dimensional models can also be used.

Whatever the model chosen, the study area (river and floodplain) should be represented. Today, modern land survey systems allow the construction of extremely detailed digital terrain models (DTM). The quality of the DTM influences the accuracy of the calculation of the water depth and the extension of flood area and, thus of the flood hazard.

Particular attention to the vertical accuracy of the DTM is very highly recommended in the floodplain extension calculation, especially in flat areas, as any error in the ground level causes error in the flooded area calculations. In flat areas, such as the area considered in this work, small differences in elevation values may extend over several kilometers.

Sometimes in these flat areas which are described in the following pages, small differences in elevation characterizes the plains for kilometers. Therefore, the extent of flood-prone areas is high. When a flood occurs in these areas, the flood waters affect

relativamente bassi. Inoltre, la presenza di manufatti antropici (argini, canali di drenaggio, ecc.) può modificare sensibilmente le direzioni del flusso e indirizzare i volumi d'acqua esondati verso aree anche significativamente lontane rispetto al corso d'acqua responsabile dell'inondazione.

Nel presente lavoro, l'area di studio è localizzata nel tronco vallivo del Fiume Bradano (Basilicata), compreso tra la foce e l'attraversamento della SS106, per un tratto di circa 8 km.

Generalmente in aree pianeggianti si possono utilizzare modelli di simulazione semplificati che trascurano i termini convettivi (CUNGE, 1980, LEOPARDI *et alii*, 2002, PRESTININZI *et alii*, 2006). Tuttavia, in questo lavoro, si utilizza un modello 2D che risolve le equazioni complete delle acque basse: il MIKE FLOOD. Il MIKE FLOOD combina dinamicamente due strumenti differenti: il MIKE 11 (monodimensionale) e il MIKE 21 (bidimensionale).

LA CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA

L'area di studio è quella in corrispondenza della foce del Fiume Bradano (Fig. 1) ubicata in Basilicata (Italia meridionale) lungo la costa jonica. Il suo bacino idrografico occupa tutto il settore centro-occidentale della Basilicata e copre una superficie di 2765 km². Prima di sfociare nel Mar Jonio, il Bradano è attraversato dalla Strada Statale 106 Jonica e dalla linea ferroviaria Taranto-Reggio Calabria rispettivamente a 6.5 km e 1.5 km dalla foce. Le pianure che si estendono a sinistra e a destra del Fiume Bradano presentano pendenza pressochè nulla e sono generalmente votate all'agricoltura e al turismo balneare.

Il rilievo plano-altimetrico dell'area oggetto di studio è stato realizzato nel 2006, per conto dell'Autorità Interregionale di Bacino di Basilicata. Tale rilievo è stato condotto con tecnologie laser-scan e aerofotogrammetria digitale. Diversi sono i sistemi che utilizzano la tecnica laser scan da velivolo: per l'area di studio l'acquisizione è avvenuta mediante un sistema Topoeye denominato "Topoeye MKII". Questo sistema acquisisce in modalità full waveform e, pertanto, fornisce una migliore descrizione degli elementi posizionati in superficie. Infatti, il "Topoeye MKII" è in grado di registrare non solo la prima e l'ultima riflessione

large portions of land with relatively low velocity and water depth. If man-made works (embankments, drainage channels, etc.) are present in these plains, then the flow directions can be modified and large volumes of water can be channeled into areas away from the river that caused the flood.

A flat area is considered in this work: it is near the downstream reach of River Bradano (Basilicata) of about 8 km between the mouth of the river and a bridge of the state road SS106.

Generally, in these situations, simplified models without convective terms may be used (CUNGE, 1980, LEOPARDI *et alii*, 2002, PRESTININZI *et alii*, 2006). However, in this work, a model solving the complete form of the shallow water equations is applied: MIKE FLOOD. MIKE FLOOD dynamically links two independent package: MIKE 11 (one-dimensional) and MIKE 21 (bi-dimensional).

SITE CHARACTERIZATION

The study area is the Bradano river mouth (Fig. 1) in Basilicata Region (southern Italy) along the Ionian coast. Its river basin is in the central-western sector of Basilicata and covers an area of 2765 km². Before flowing into the Ionian Sea, the Bradano river is crossed by the State Route 106 Jonica and Taranto-Reggio Calabria railway line, respectively 6.5 km and 1.5 km from the mouth. The plains on the left and on the right of the river have very slight slope and are generally devoted to agriculture and beach tourism.

A plano-altimetric survey of the study area was created in 2006 for the Interregional Authority Basin of Basilicata. It was carried out using laser-scan technology and digital aerial photo-grammetry. There are different systems for working with the airborne laser-scanning: acquisition data from the studied area is formulated by a Topoeye system named "Topoeye MKII". This system works in full waveform mode in order to give a better description of all ground elements. The "Topoeye MKII" is able to record multiple echoes as well as the first

Laser Topoeye MKII	
Laser type	Fiber Laser with 2 channel
Scanner type	Palmer Scanner
Scan frequency	50 kHz
Pulse length	4ns
Range	60-1000 m
Minimum measurement density	4 points measurement/m ²
Altimetrical accuracy in open areas	+/- 0.15 m
Altimetrical accuracy in high vegetation areas (vegetation > 70%)	+/- 0.40 m
Planimetric accuracy	+/- 0.30 m
Measurement possibilities	Full waveform (128 sample rate)

Tab. 1 - Caratteristiche del sensore Topoeye MKII
- Sensor characteristics of the Topoeye MKII

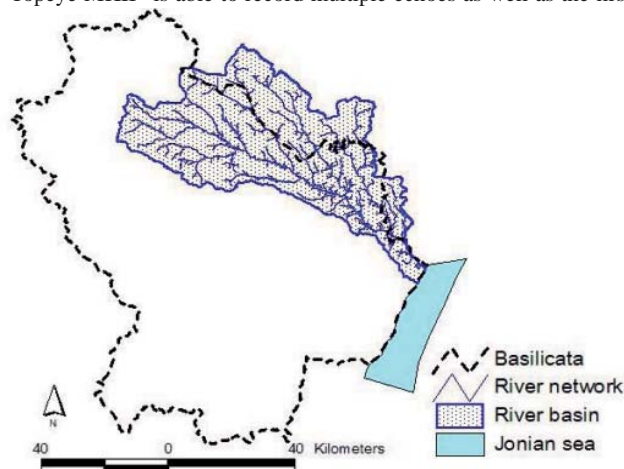


Fig. 1 - Area di studio. Ubicazione del bacino del Fiume Bradano in Basilicata
- Study area. Localization of river basin of Bradano in Basilicata

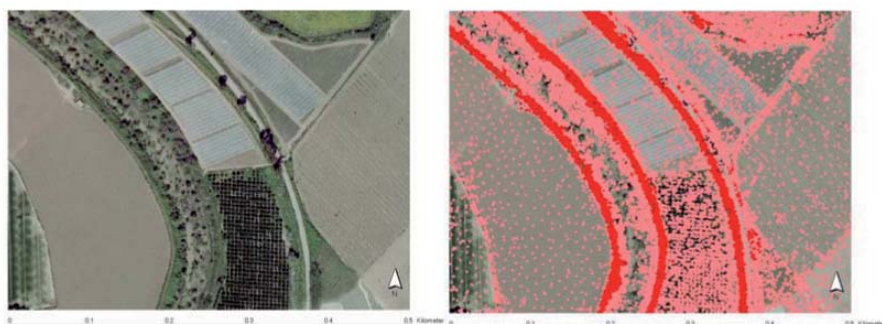


Fig. 2 - Stralcio dell'ortofoto (a sinistra) e del MKP con la distribuzione dei punti chiave (a destra)
 - Sketch of orthophoto (on the left) and of MKP with key point's density distribution (on the right)

ma, l'intera onda di riflessione (CASELLA 1999, CASAS *et alii*, 2006). Le caratteristiche del sistema sono sintetizzate nella Tabella 1.

Il ricorso ai dati laser-scan nella generazione di DTM per la modellazione di alluvione trova ragionevoli giustificazioni nel fatto che l'accuratezza del DTM generato da dati laser scanning può essere, in media, di 15 cm di altezza in spazi aperti.

Dalle informazioni raccolte durante il rilievo è stato generato un particolare modello digitale del terreno denominato Model Key Points (MKP). Si tratta di un modello digitale del terreno caratterizzato dai soli "punti chiave" e cioè quei punti posizionati in corrispondenza di cambi di pendenza significativi (Fig. 2). Il MKP risulta, pertanto, particolarmente leggero e gestibile e non necessita di hardware particolarmente potenti.

LA MODELLAZIONE DELLE INONDAZIONI

La simulazione dei processi di inondazione in corrispondenza del tratto vallivo del Fiume Bradano, pari a circa 80 km² lungo gli ultimi 7 km dell'asta fluviale, è stata realizzata con il MIKE FLOOD, il codice di calcolo del DHI Water Environment Health che consente di utilizzare in modo integrato i modelli idrodinamici MIKE 11 (monodimensionale) e MIKE 21 (bidimensionale).

Il ricorso alla modellistica numerica bidimensionale deriva dalle caratteristiche morfologiche della pianura costiera considerata (SOLE *et alii*, 2008). La natura estremamente pianeggiante dei luoghi e la presenza di argini a rischio di sormonto, infatti, impone l'utilizzo di uno strumento capace di descrivere compiutamente la propagazione dei volumi d'acqua esondati sul floodplain qualora gli argini risultassero insufficienti.

Il modulo monodimensionale MIKE 11 del MIKE FLOOD è stato utilizzato per simulare la propagazione dell'onda di piena all'interno dell'area di pertinenza fluviale compresa tra gli argini di destra e sinistra del Fiume Bradano. Tale modulo è stato implementato mediante 66 sezioni trasversali in parte rilevate in situ e in parte estrapolate dal modello digitale in formato TIN costruito a partire dal MKP (CASTELLARIN *et alii*, 2009). Il modulo bidimensionale MIKE 21 del MIKE FLOOD è stato utilizzato, invece, per simulare la propagazione dei volumi di piena che, dopo aver sormontato gli argini del Bradano, si distribuisce sulle pianure limitrofe. Tali pianure sono state schematizzate mediante griglie a maglia quadrata di risoluzione variabile ottenute a partire dal MKP.

Nell'area in esame le modeste differenze di quota portano a sup-

and the last pulse (CASELLA 1999, CASAS *et alii*, 2006). The system characteristics are reported in Table 1.

Since the accuracy of the DTM generated by laser-scanning data can be, on average, 15 cm in elevation values in open areas, the use of laser scanning to generate DTM for flood modeling is recommended.

A particular DTM is extracted by laser scanning data: the Model Key Point (MKP). MKP is characterized by only the significant points of ground surface, that are the "key points", showing many points in discontinuous areas and few points in homogeneous areas (Fig. 2). Thus it is light and manageable and it doesn't need powerful hardware.

FLOOD MODELLING

Inundation modeling concerns an area of about 80 km² along the last 7 km of the Bradano river. It was carried out using MIKE FLOOD, the software of the DHI Water Environment Health, that integrates two of the most widely used hydrodynamic models namely MIKE 11 (monodimensional model) and MIKE 21 (bidimensional model).

The choice of two-dimensional numerical modeling arises from the morphology of the coastal plain considered (Sole *et alii*, 2008). The extremely flat nature of places and the presence of levees at risk of overtop, requires the use of a tool capable of fully describing the propagation of the volumes of water flooding on the floodplain when the levees are overflowed.

The one-dimensional model of MIKE FLOOD, MIKE 11, was used to simulate flood wave propagation between the left and right banks of the River Bradano. It was implemented with 66 cross sections, partly ground surveyed in situ and partly extrapolated from the TIN digital terrain model built from MKP (CASTELLARIN *et alii*, 2009). The bi-dimensional model of MIKE FLOOD, MIKE21, instead, was used to simulate the propagation of flood volume on the plains adjacent to Bradano, having topped its banks. These plains were schematized by square mesh grids with variable resolution obtained from MKP.

In the study area, the small differences in the elevation could suggest that a satisfactory morphological characterization could

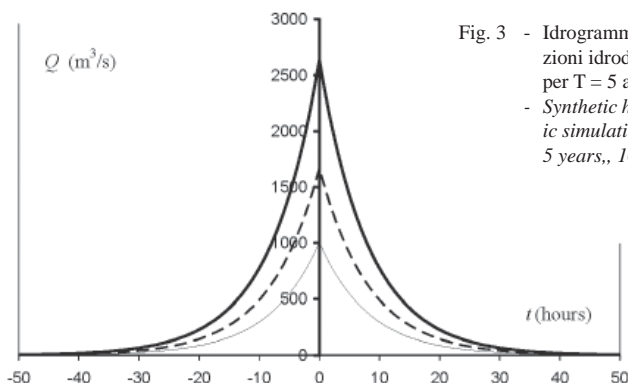


Fig. 3 - Idrogrammi sintetici usati come condizione al contorno di monte nelle simulazioni idrodinamiche con il MIKEFLOOD. Le portate di picco sono 1001 m³/s per T = 5 anni, 1670 m³/s per T = 10 anni e 2635 m³/s per T = 30 anni
 - Synthetic hydrographs used as upstream boundary conditions in hydrodynamic simulations with MIKEFLOOD. The peak discharges are 1001 m³/s for T = 5 years, 1670 m³/s for T = 10 years and 2635 m³/s for T = 30 years

Return period T (years)	5	10	30
5 m cell resolution	5700	13440	
10 m cell resolution	394	1514	6660
50 m cell resolution	4	9	22

Tab. 2 - Tempi di computazione in minuti al variare dei tempi di ritorno
 - Computation times in min for a selection of return periods

porre che una soddisfacente caratterizzazione morfologica possa essere raggiunta anche costruendo griglie a bassa risoluzione. Per verificare quanto appena detto, sono state costruite griglie a differente risoluzione, ciascuna delle quali opportunamente corretta al fine di rappresentare adeguatamente le caratteristiche plano-altimetriche di tutti gli elementi antropici capaci di influenzare la propagazione delle piene (argini, rilevati stradali, canali).

Le simulazioni idrodinamiche sono state effettuate facendo riferimento agli idrogrammi sintetici dedotti dalle curve di riduzione dei colmi di piena (NERC, 1975) ed aventi come picco le portate con i tempi di ritorno pari a 5, 10 e 30 anni (Fig. 3).

SENSIBILITÀ ALLA RISOLUZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO

La risoluzione dei dati topografici influenza le simulazioni idrodinamiche (HORRITT *et alii* 2001, BATES *et alii*, 2003, FRANK *et alii*, 2007, NÉELZ *et alii*, 2009). In generale buoni modelli digitali del terreno devono contenere un'accurata descrizione della micro topografia (per esempio argini, strade, costruzioni) per garantire la costruzione di un dominio di calcolo in cui tutti gli elementi che favoriscono o ostacolano le dinamiche della corrente e la propagazione delle piene siano inclusi.

D'altro canto la risoluzione del dominio di calcolo è di solito limitata dalle risorse computazionali di cui si dispone. A titolo di esempio si riportano, nella Tabella 2, i tempi di simulazione del MIKE FLOOD al variare della risoluzione della griglia di calcolo.

Si è fatto riferimento a griglie di calcolo con risoluzione pari a 5, 10 e 50 m e a tre differenti idrogrammi di piena. Questi ultimi presentano uguale forma ma, portate al picco distinte e pari a quelle con periodo di ritorno di 5, 10 e 30 anni. Naturalmente i tempi di simulazione aumentano passando dalla risoluzione pari a 50 m a quella pari a 5 m. La simulazione relativa alla portata trentennale e alla griglia con risoluzione pari a 5 m non è stata realizzata a causa dell'elevato tempo di simulazione richiesto: già la simulazione con portata decennale sulla stessa griglia dura più di 9 giorni!

also be achieved by building low-resolution grids. To verify this, grids were built at different resolutions: each of them appropriately adjusted in order to adequately represent the characteristics of all the plano-altimetric elements that influence the flood propagation (river banks, roads, canals).

The hydrodynamic simulations were carried out by reference to synthetic hydrographs deduced from the curves of reduction of peak discharge (NERC, 1975) where peak discharges referred to return times of 5, 10 and 30 years (Fig. 3).

SENSITIVITY TO GRID RESOLUTION

The topographic data resolution affects flow routing (HORRITT *et alii* 2001, BATES *et alii*, 2003, FRANK *et alii*, 2007, NÉELZ *et alii*, 2009). Generally, good digital terrain models must contain an accurate description of micro-topography (e.g. levees, roads, buildings) to create a mesh in which all the elements, that support or oppose flow and flood propagation, are included.

However, mesh size is typically limited by the computational resources available. As an example the simulation time of MIKE FLOOD, varying the resolution of the grid, is reported in the Table 2.

Three grids of 5 m, 10 m and 50 m and three different hydrographs were used. The hydrographs have similar shapes, but are characterized by different values of the peak discharge, corresponding to 5, 10 and 30 yrs. of return time. Naturally, the computational time increases, shifting from 50 m to 5 m of cell resolution. The simulation corresponding to 30 years of return time with a cell of 5 m, was not carried out because of its high simulation time: the simulation with 10 years return period, on the same model, already lasts longer than nine days!

SENSIBILITÀ ALLA SCABREZZA DEL FLOODPLAIN

Nelle simulazioni idrodinamiche come quelle descritte nel presente lavoro, la resistenza al moto dell'alveo e del floodplain viene determinata a patto che sia specificato, in input, il coefficiente di scabrezza caratteristico dell'area di studio. Tale coefficiente viene generalmente esplicitato facendo riferimento alle diverse proposte di letteratura e, quindi, attraverso il coefficiente n di Manning, quello K_s di Gauckler-Strickler, o γ_B di Bazin e così via (MARCHI *et alii*, 1981, CHOW, 1959) che forniscono i valori di scabrezza in funzione della natura delle pareti dell'alveo e del raggio idraulico. Si può anche attingere ad esperienze di laboratorio finalizzate alla determinazione della scabrezza al variare delle caratteristiche del fondo alveo e alla eventuale presenza di elementi sul letto del canale (DI CRISTO *et alii*, 2002) o esperimenti che stimano il coefficiente di scabrezza in funzione delle tipologie vegetali distribuite sul fondo (MEDINA *et alii*, 2002, FREEMAN *et alii*, 2002).

L'analisi di sensibilità alla resistenza al moto è stata affrontata da diversi autori (ARONICA *et alii*, 1998 e 2002, HALL *et alii*, 2005, HORRITT, 2006). HORRIT & BATES (2002) hanno rilevato come l'influenza del coefficiente di scabrezza sull'estensione delle aree inondabili non sia particolarmente significativo.

Per valutare quanto incide il valore del coefficiente di scabrezza n del floodplain sui risultati ottenuti dalle simulazioni idrodinamiche, si è fatto riferimento alle elaborazioni bidimensionali eseguite con il MIKE FLOOD, su griglie di calcolo a risoluzione costante ma, caratterizzate da valori del coefficiente di scabrezza n variabili sul floodplain.

Nello specifico, si è fatto riferimento a griglie con risoluzione pari a 50 m e 10 m e a valori di scabrezza, espressi attraverso il coefficiente n di Manning, di 0.04, 0.08 e $0.2 \text{ m}^{-1/3}$. Il primo valore di n ripropone lo stesso coefficiente di scabrezza adottato per il floodplain nelle valutazioni idrauliche a supporto degli studi di delimitazione delle aree inondabili del Fiume Bradano del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) di Basilicata (PAI Basilicata, 2009). Il terzo coefficiente utilizzato rappresenta il limite superiore tra i valori più diffusi proposti per il floodplain nell'Hydraulic References Manual (2008) dell'HEC-RAS 4.0. Infine, l' n di Manning pari a $0.08 \text{ m}^{-1/3}$ definisce un valore arbitrario compreso tra il minore e il maggiore descritti sopra.

L'analisi è stata realizzata confrontando i risultati delle simulazioni idrodinamiche per i tre periodi di ritorno T di 5, 10 e 30 anni, in termini di massima altezza idrica e massima velocità della corrente sul floodplain. I confronti sono state realizzati sottraendo ai risultati ottenuti con n pari a 0.2 e $0.08 \text{ m}^{-1/3}$ quelli riferiti, invece, ad n pari a $0.04 \text{ m}^{-1/3}$.

CONFRONTO SULLA GRIGLIA DI RISOLUZIONE PARI A 50 m

Il confronto ha riguardato la costruzione delle griglie "differenza" del tirante massimo (in m) e della velocità massima (in m/s) della corrente relativamente al floodplain per i tre eventi di piena considerati ($T = 5, 10$ e 30 anni) calcolati sulla griglia con risoluzione pari a 50 m e facendo riferimento ai coefficienti di scabrezza n di Manning di 0.04 e $0.2 \text{ m}^{-1/3}$. Le differenze di tirante massimo (Δh) e velocità massima (Δv) sono state organizzate in 10 classi di ampiezza variabile secondo

SENSITIVITY TO FLOODPLAIN ROUGHNESS

In hydrodynamic simulations such as those described in this paper, the flow resistance in the river and on the floodplain is determined when the roughness coefficient of the study area is specified as input in the model. This coefficient is usually suggested in literature through the Manning's n , the Gauckler-Strickler's K_s , the Bazin's γ_B and so on (MARCHI *et alii*, 1981, CHOW, 1959) that provide the values of roughness depending on the nature of the riverbed and of the hydraulic radius. It's possible to refer to laboratory experiments, aimed at determining the roughness characteristics, for changes of riverbed and types of elements on the bottom (DI CRISTO *et alii*, 2002), or to experiments that estimate the roughness coefficient depending on the types of plants distributed on the bed of the river or on the floodplain (MEDINA *et alii*, 2002, FREEMAN *et alii*, 2002).

Many authors studied the sensitivity to roughness coefficient (ARONICA *et alii*, 1998 e 2002, HALL *et alii*, 2005, HORRITT, 2006). HORRIT & BATES (2002) have been verified that the roughness coefficient is not significant in flooded area extension.

To assess the impact of the n roughness coefficient on the results obtained from hydrodynamic simulations, the MIKE FLOOD's bidimensional calculations were considered. In this case the grids-resolution was constant but the n roughness coefficients on the floodplain was variable.

In particular, the grid resolutions used were 50 m and 10 m and n values were 0.04, 0.08 e $0.2 \text{ m}^{-1/3}$. The first value is the same roughness coefficient, adopted for the floodplain, in the hydraulic studies along Bradano River, in the Hydrogeological Plan of Basilicata (PAI of Basilicata, 2009). The third one is the upper limit of the values proposed for the floodplain, in the Hydraulic References Manual (2008) of the HEC-RAS 4.0. Finally, the $0.08 \text{ m}^{-1/3}$ n coefficient defines an arbitrary value between the lowest and the highest described above.

The sensitivity analysis was made by comparing the results of hydrodynamic simulations, for the three return period T : 5, 10 and 30 years, in terms of maximum water depth and maximum velocity of flow on the floodplain. Comparisons were carried out by subtracting the results obtained with n equal to 0.2 and $0.08 \text{ m}^{-1/3}$ and those reported, instead, for n equal to $0.04 \text{ m}^{-1/3}$.

COMPARISON FOR 50 m GRID RESOLUTION

The comparison was carried out using the grids created from the differences of the maximum water depth (in m) and the maximum velocity (in m/s) of flow on the floodplain. The three return period T considered were: 5, 10 and 30 years. The grid resolution was 50 m and the Manning's n values were di 0.04 e $0.2 \text{ m}^{-1/3}$. The differences of the maximum water depth (Δh) and the maximum velocity (Δv) were organized in ten classes of variable extent as shown on x-axis

Fig. 4 - Confronto tra le simulazioni con n di Manning di 0.04 e $0.2\text{ m}^{-1/3}$ su griglia a 50 m e per l'evento di piena con tempo di ritorno di 5 anni. Percentuali di appartenenza delle differenze di massimo tirante (Δh) e massima velocità (Δv) alle 10 classi considerate

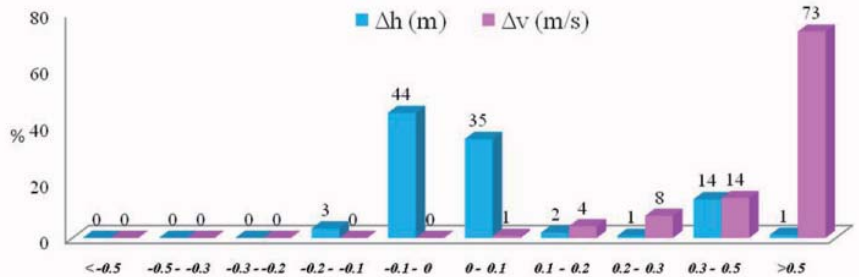


Fig. 5 - Confronto tra le simulazioni con coefficienti di scabrezza n di Manning di 0.04 e $0.2\text{ m}^{-1/3}$ su griglia a 50 m per l'evento di piena con tempo di ritorno di 10 anni. Percentuali di appartenenza delle differenze di massimo tirante (Δh) e massima velocità (Δv) alle 10 classi considerate

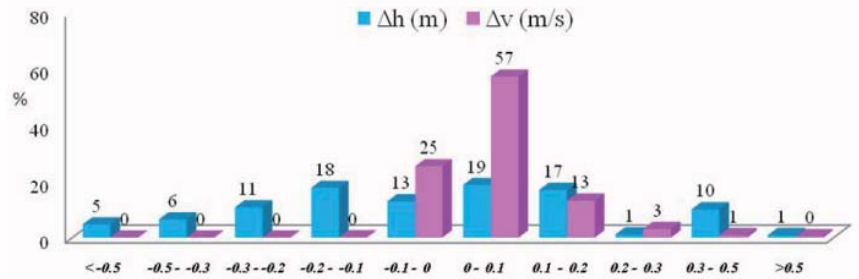


Fig. 6 - Confronto tra le simulazioni con coefficienti di scabrezza n di Manning di 0.04 e $0.2\text{ m}^{-1/3}$ su griglia a 50 m per l'evento di piena con tempo di ritorno di 30 anni. Percentuali di appartenenza delle differenze di massimo tirante (Δh) e massima velocità (Δv) alle 10 classi considerate

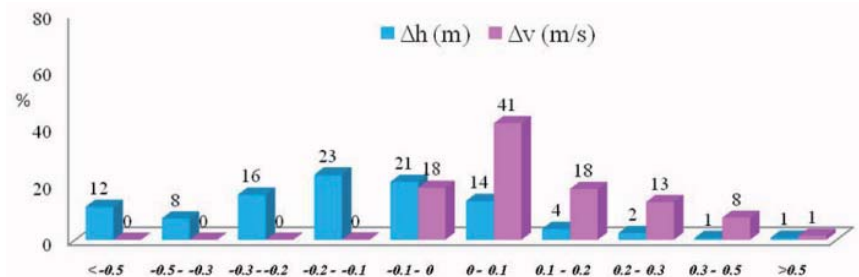
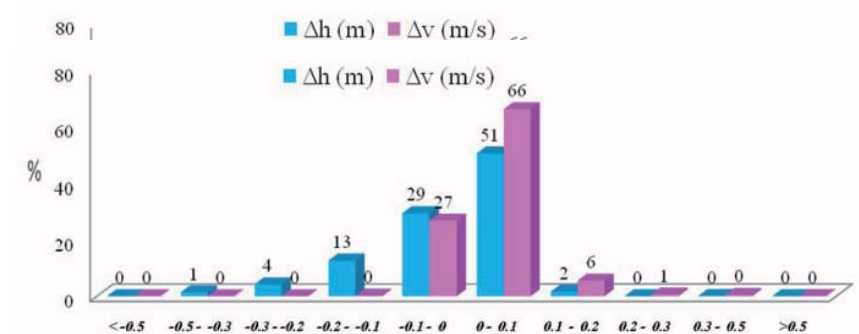


Fig. 7 - Confronto tra le simulazioni con coefficienti di scabrezza n di Manning di 0.04 e $0.08\text{ m}^{-1/3}$ su griglia a 50 m per l'evento di piena con tempo di ritorno di 10 anni. Percentuali di appartenenza delle differenze di massimo tirante (Δh) e massima velocità (Δv) sul floodplain alle 10 classi considerate



quanto riportato sull'asse delle ascisse delle Figg. 4, 5 e 6 individuando la percentuale di appartenenza, a ciascuna di esse, delle celle delle due griglie "differenza" sul totale delle celle bagnate. In generale sia le differenze di tirante che quelle di velocità si attestano nell'intervallo

in the Figg. 4, 5 and 6. The percentage of cells belonging to the two grids considered in each range was calculated on all wet cells.

Generally the differences in the maximum depth and velocity are in the range -0.5 and 0.5 m and -0.5 and 0.5 m/s respectively.

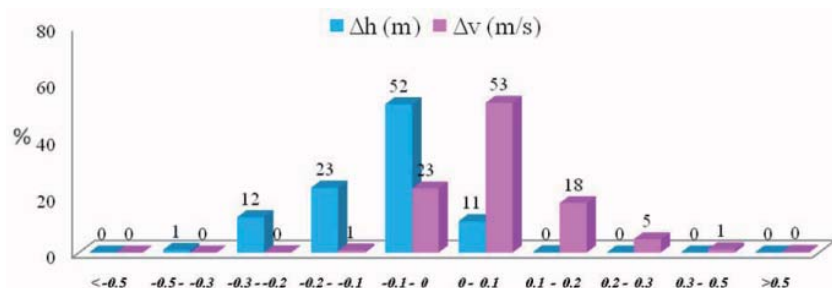


Fig. 8 - Confronto tra le simulazioni con coefficienti di scabrezza n di Manning di 0.04 e 0.08 $m^{-1/3}s$ su griglia a 50 m floodplain per l'evento di piena con tempo di ritorno di 30 anni. Percentuali di appartenenza di massimo tirante (Δh) e massima velocità (Δv) sul floodplain alle 10 classi considerate

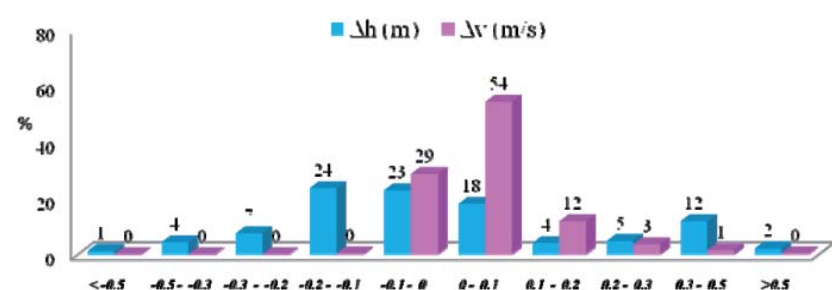


Fig. 9 - Confronto tra le simulazioni con coefficienti di scabrezza n di Manning di 0.04 e 0.2 $m^{-1/3}s$ su griglia a 10 m per l'evento di piena con tempo di ritorno di 10 anni. Percentuali di appartenenza delle differenze di massimo tirante (Δh) e massima velocità (Δv) sul floodplain alle 10 classi considerate

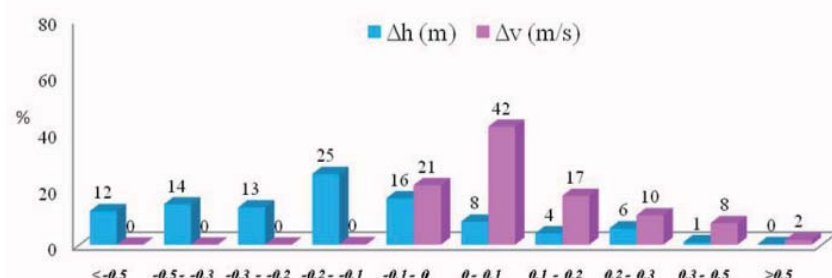


Fig. 10 - Confronto tra le simulazioni con coefficienti di scabrezza n di Manning di 0.04 e 0.2 $m^{-1/3}s$ su griglia a 10 m per l'evento di piena con tempo di ritorno di 30 anni. Percentuali di appartenenza delle differenze di massimo tirante (Δh) e massima velocità (Δv) sul floodplain alle 10 classi considerate

compreso tra -0.5 e 0.5 m e -0.5 e 0.5 m/s rispettivamente.

Le distribuzioni delle differenze di tirante (Δh) e velocità (Δv) presentano significative analogie solo per gli eventi di piena con periodi di ritorno T di 10 e 30 anni (Figg. 5 e 6). Per l'evento di piena quinquennale (Fig. 4), invece, la distribuzione di Δh e Δv è completamente diversa: in questo caso le celle bagnate sono solo 268 contro valori di 1675 (per $T = 10$ anni) e 8063 (per $T = 30$ anni). Il numero di celle bagnate del floodplain è decisamente più basso rispetto a quello degli altri due eventi di piena e, ragionevolmente, non sembra sufficiente per estrapolazioni finalizzate alla classificazione qui presentata. Per tale motivo, si ritiene opportuno trascurare i risultati ottenuti dalla simulazione con periodo di ritorno T di 5 anni.

Generalmente, per n pari a 0.04 $m^{-1/3}s$ i tiranti h sono più elevati mentre le velocità v più basse.

Utilizzando la stessa metodologia descritta sopra, nelle Figg. 7 e 8 sono sintetizzate le percentuali di differenza di Δh e Δv per i due eventi di piena ($T = 10$ e 30 anni) sulla griglia a 50 m ma, per valori di scabrezza n di Manning di 0.04 e 0.08 $m^{-1/3}s$. In questo caso le

The distributions of differences in the maximum depth (Δh) and maximum velocity (Δv) on the floodplain have significant similarities only for the flood events with return periods T of 10 and 30 years (Figg. 5 e 6). For discharge with 5 year return period (Fig. 4), however, the distribution is completely different: in this case the wet cells are 268 versus values of 1675 (for $T = 10$ years) and 8063 (for $T = 30$ years). The number of wet cells of the floodplain is much lower than that of the two other flood events and, therefore, it is not sufficient to extrapolate a classification such as that presented here. Thus the results obtained from the simulation of $T = 5$ years have not been considered.

Generally, when n is 0.04 $m^{-1/3}s$, the depths are higher and the velocities are lower.

Using the method specified above, Figg. 7 and 8 show the distribution of Δh and Δv in relation to the two flood events ($T = 10$ and 30 years) on a 50 m grid resolution but for Manning's n roughness coefficients of 0.04 and 0.08 $m^{-1/3}s$. In this case, the differences in the

Fig. 11 - Confronto tra le simulazioni con coefficienti di scabrezza n di Manning di 0.04 e 0.08 $m^{-1/3}$ su griglia a 10 m per l'evento di piena con tempo di ritorno di 10 anni. Percentuale di appartenenza delle differenze di massimo tirante (Δh) e massima velocità (Δv) sul floodplain alle 10 classi considerate
 - Comparison between events with n roughness coefficients of 0.04 e 0.08 $m^{-1/3}$ on 10 m grid resolution for 10 years return period flow. Percentage of differences in the maximum depth (Δh) and maximum velocity (Δv) on the floodplain belonging to the 10 classes

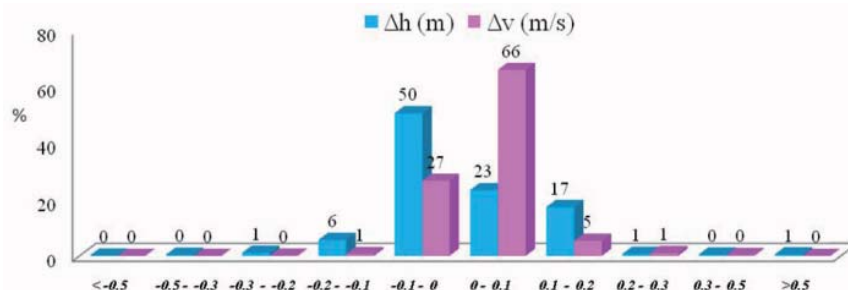
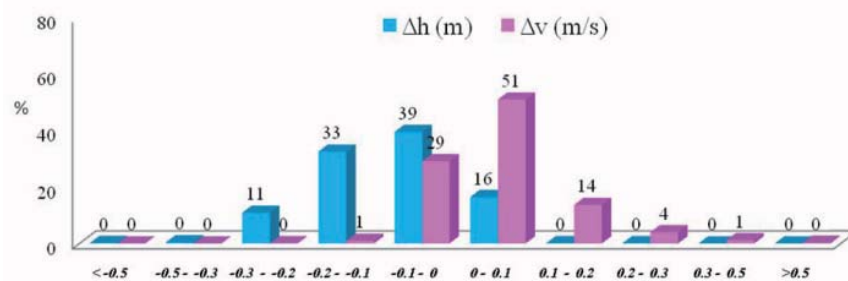


Fig. 12 - Confronto tra le simulazioni con coefficienti di scabrezza n di Manning di 0.04 e 0.08 $m^{-1/3}$ su griglia a 10 m per l'evento di piena con tempo di ritorno di 30 anni. Percentuale di appartenenza delle differenze di massimo tirante (Δh) e massima velocità (Δv) sul floodplain alle 10 classi considerate
 - Comparison between events with n roughness coefficients of 0.04 e 0.08 $m^{-1/3}$ on 10 m grid resolution for 30 years return period flow. Percentage of differences in the maximum depth (Δh) and maximum velocity (Δv) on the floodplain belonging to the 10 classes



differenze di tirante (Δh) si attestano nell'intervallo [-0.3, 0.1] mentre quelle di velocità (Δv) nell'intervallo [-0.1, 0.3].

maximum depth and velocity are in the range [-0.3, 0.1] and that of the velocities in the range [-0.1, 0.3].

CONFRONTO SULLA GRIGLIA DI RISOLUZIONE PARI A 10 M

COMPARISON FOR 10 M GRID RESOLUTION

Gli stessi confronti realizzati sulla griglia a 50 m sono stati estesi a quella a 10 m. Nelle Figg. 9 e 10, infatti, sono mostrate le differenze di tirante massimo e velocità massima della corrente sul floodplain per i due eventi di piena di 10 e 30 anni calcolati facendo riferimento ai coefficienti di scabrezza n di Manning di 0.04 e 0.2 $m^{-1/3}$. Anche in questo caso sia le differenze di tirante che quelle di velocità si attestano nell'intervallo compreso tra -0.5 e 0.5 m e -0.5 e 0.5 m/s rispettivamente. Tuttavia, per $T = 10$ anni, è l'intervallo [-0.2, 0.2] a presentare la maggiore percentuale di differenze: circa il 65% per i tiranti e 69% per le velocità. Per $T = 30$ anni, invece, per n pari a 0.04 $m^{-1/3}$ i tiranti sono più elevati mentre le velocità più basse.

The same comparisons carried out on 50 m grid resolution were extended to 10 m grid resolution. In Fig. 9 and 10, the differences in the maximum depth and maximum velocity on the floodplain are summarized in relation to the 10 and 30 years flood events and with a 10 m grid resolution. The Manning's n roughness coefficients are 0.04 and 0.2 $m^{-1/3}$. Also in this case, the differences in the maximum depth and velocity are in the range -0.5 and 0.5 m and -0.5 and 0.5 m/s respectively. However, $T = 10$ years, [-0.2, 0.2] is the range with the highest percentage of differences: about 65% for depth and about 69% for velocity. For $T = 30$ years, instead, in the case of $n = 0.04 m^{-1/3}$ the depths are much higher and the velocities are much lower than that of $n = 0.08 m^{-1/3}$.

Le Figure 11 e 12 mostrano le distribuzioni di Δh e Δv per i due eventi di piena ($T = 10$ e 30 anni) sulla griglia a 10 m ma, per valori di scabrezza n di Manning di 0.04 e 0.08 $m^{-1/3}$. In generale sia le differenze di tirante (Δh) che quelle di velocità (Δv) si attestano nell'intervallo compreso tra -0.3 e 0.3 m e -0.1 e 0.2 m/s rispettivamente.

Figures 11 and 12 show the distribution of Δh and Δv for the 10 and 30 years flood events with a 10 m grid resolution but, with the Manning's n roughness coefficients of 0.04 and 0.08 $m^{-1/3}$. Generally the differences in the maximum depth (Δh) and velocity (Δv) are in the range -0.3 and 0.3 m and -0.1 and 0.2 m/s respectively.

Le differenze di tirante interessano l'intervallo [-0.2, 0.2] per circa il 96% per l'evento $T = 10$ anni e quello [-0.3, 0.1] per $T = 30$ anni. Come per i tiranti, anche le differenze di velocità si concentrano nell'intervallo [-0.2, 0.2] per l'evento $T = 10$ anni, mentre interessano l'intervallo [-0.1, 0.3] per l'evento $T = 30$ anni.

The differences in the maximum depth are in the range [-0.2, 0.2] for about 96% in the case of $T = 10$ years and in the range [-0.3, 0.1] for $T = 30$ years. As for the depths, the differences of velocities are in the range [-0.2, 0.2] in the case of $T = 10$ years and in the range [-0.1, 0.3] for $T = 30$ years.

Le differenze di tirante sono più contenute rispetto al confronto fatto per $n = 0.2 m^{-1/3}$ sempre per la griglia di 10 metri.

The differences of depths are more lower than that of $n = 0.2 m^{-1/3}$ but always in relation to 10 m grid resolution.

Sintetizzando i risultati sopra discussi si può concludere che:

- a parità di grid resolution (50 e 10 m), i valori di h e v per $n = 0.2 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ si discostano più da quelli ottenuti con $n = 0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ che da quelli relativi ad $n = 0.08 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$;
- per entrambe le griglie considerate i tiranti ottenuti per n pari a $0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ sono più elevati di quelli relativi a $n = 0.2$ e $0.08 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Per le velocità si verifica l'esatto contrario dal momento che risultano essere più basse per $n = 0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ rispetto a quelle relative a $n = 0.2$ e $0.08 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$;
- le simulazioni sulla griglia a 50 m risultano meno sensibili alle differenze di scabrezza rispetto a quelle sulla griglia a 10 m e questo accade prevalentemente per l'evento con $T = 10$ anni;
- le differenze di h e v si riducono in maggior misura variando la scabrezza e lasciando inalterata la risoluzione della griglia di calcolo piuttosto che riducendo la risoluzione della griglia e modificando la scabrezza.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro riguarda l'analisi di sensibilità dei modelli matematici a supporto dello studio della pericolosità idraulica dell'area della costa jonica in corrispondenza della foce del Bradano. Tale valutazione è stata effettuata analizzando i risultati delle simulazioni idrodinamiche realizzate con il software MIKEFLOOD rispetto alla risoluzione della griglia di calcolo e alla scabrezza del floodplain ipotizzando degli eventi di piena con periodo di ritorno T pari a 5, 10 e 30 anni.

I risultati delle simulazioni sono stati confrontati prendendo a riferimento il massimo tirante e la massima velocità della corrente sul floodplain. Dei tre eventi di piena, quello con $T = 5$ anni è parso poco significativo per i confronti proposti nel presente lavoro a causa del numero limitato di celle bagnate del floodplain. Per gli altri due eventi di piena ($T = 10$ e 30 anni) è stato possibile apprezzare le differenze di tirante e velocità al variare della risoluzione della griglia di calcolo (considerando la scabrezza costante) e al variare della scabrezza (mantenendo la risoluzione costante).

I risultati ottenuti consentono di verificare l'entità delle differenze di h e v connesse alla scelta operata sulla dimensione della cella del dominio di calcolo e sul coefficiente di scabrezza. Essi, pertanto, risultano particolarmente utili in fase di implementazione di modelli matematici bidimensionali per la simulazione degli scenari di allagamento per effetto dell'erosione di un fiume in aree caratterizzate da pendenza pressoché nulla, come quelle costiere. Esperienze come quella qui proposta possono altresì sopperire alla carenza di dati osservati in occasione di eventi di piena.

Per l'area di studio, le differenze di h e v risultano più sensibili alle variazioni di scabrezza che a quelle di risoluzione della griglia di calcolo. E, probabilmente, in aree particolarmente pianeggianti come quella in esame, la caratterizzazione morfologica non subisce lo stesso apprezzabile miglioramento all'aumentare della risoluzione della griglia di calcolo rispetto a quello che subirebbero le aree che presentano variazioni di pendenza più marcate ed una morfologia più eterogenea.

A summary of all the results discussed above is:

- the h and v values for $n = 0.2 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ differ more from those obtained when $n = 0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ than from those obtained for $n = 0.08 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. This occurs with the same grid resolution;
- for both grids considered, the depth obtained with $n = 0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ are higher than those with $n = 0.2$ and $0.08 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. The opposite occurs for the velocities because they are lower for $n = 0.04 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ than for $n = 0.2$ and $0.08 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$;
- simulations on the 50 m grids are less sensitive to differences in roughness than on the 10 m grids. This happens mainly for the $T = 10$ years event;
- the differences are reduced more by varying the roughness coefficient with constant grid resolution rather than reducing the grid resolution and changing the roughness coefficient.

CONCLUSIONS

This work analyzes the sensitivity of mathematical models in the study of hydraulic hazard on the Ionian coast at the mouth of Bradano River. This evaluation was performed by analyzing the results of hydrodynamic simulations, with the software MIKEFLOOD, in relation to the grid resolution and the roughness coefficient of the floodplain. The evaluation was performed assuming flood events with return period T of 5, 10 and 30 years.

The simulation results have been compared by examining the maximum water depth and maximum velocity on the floodplain. The flood event with 5 years return period, has been omitted because of the limited number of floodplain wet cells. For the other two flood events ($T = 10$ and 30 years) it is possible to appreciate the differences in depth and velocity by varying the grid resolution (with constant roughness coefficient) and the variation of roughness coefficient (with constant grid resolution).

The results obtained are used to verify the h and v differences related to the cell size of computational domain and to the roughness coefficient. Therefore they are useful in the implementation of two-dimensional mathematical models to simulate flooding scenarios due to the flooding of a river in areas of almost zero slope, such as many coastal areas. Experiences like the one proposed here may also offset the lack of observed data during flood events.

For the study area, h and v differences are more sensitive to changes in roughness than to the grid resolution. And, probably, in lowland areas such as this, the morphological characterization doesn't suffer the same appreciable improvement with increasing grid resolution than would be the case in areas with more pronounced changes in slope and a more heterogeneous morphology.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'Autorità Interregionale di Bacino della Basilicata per i dati resi disponibili.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would also like to thank Interregional Basin Authority of Basilicata for the available data.

OPERE CITATE/REFERENCES

- ARONICA G., HANKIN B.G. & BEVEN K.J. (1998) - *Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data*. *Advances in Water Resources*, **22** (4): 349-365.
- BATES P. D., MARKS K. J. & HORRITT M. S. (2003) - *Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models*. *Hydrological Processes*, **17**: 537-557
- 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: 249-254.
- CASAS A., BENITO G., THORNDYCRRAFT 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.
- CASTELLARIN A., DI BALDASSARRE G., BATES P.D. & BRATH A. (2009) - *Optimal cross-section spacing in Preissmann scheme 1D hydrodynamic models*, *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, **135** (2): 96-105.
- CHOW V.T. (1959) - *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- COBBY D.M., MASON D.C. & DAVENPORT I.J. (2001) - *Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modeling*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **56** (2): 121-138.
- CUNGE J.A., HOLLY F.M. & VERWEY A. (1980) - *Practical aspects of computational river hydraulics*. London: Pitman Publishing, 420 pp.
- COUNCIL OF EUROPEAN COMMUNITIES (2007) - *Directive on the assessment and management of flood risk* (2007/06/EC, ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/key_docs.html.
- DI CRISTO C. & LEOPARDI A. (2002) - *Modellazione idrodinamica di un canale con cambio di scabrezza al fondo*. 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Potenz, a 16-19 settembre 2002.
- FRANK E., MONTOYA M. & FATTORELLI S. (2007) - *Effect of topographic data resolution and spacial model resolution on a bi-dimensional hydro-morphological model*. River Basin Management IV, BREBBIA C.A. & KATSIFARAKIS K.L., WIT Press Southampton UK, 325-334.
- FREEMAN G.E. & RAHMEYER W. (2002) - *Development and application of methodology for determination of hydraulic roughness for vegetated floodplains*. Proceedings of "Hydraulic Measurements & Experimental Methods" Congress. ASCE. Colorado (USA) Julio 28-Agosto 1..
- HALL J.W., TARANTOLA S., BATES P.D. & HORRITT M.S. (2005) - *Distributed Sensitivity Analysis of Flood Inundation Model Calibration*. *Journal of Hydraulic Engineering*, **131** (2): 117-126.
- HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) (2008) - *References Manual. Version 4.0*. U.S. Army Corps of Engineers.
- HORRITT M.S. & BATES P.D. (2001) - *Effect of special resolution on a raster based model of flood flow*. *Hydrological Processes*, **253**: 239-249.
- HORRITT M.S. & BATES P.D. (2002) - *Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation*. *Journal of Hydrology*, **268**: 87-99.
- HORRITT M.S. (2006) - *A methodology for the validation of uncertain flood inundation models*. *Journal of Hydrology*, **326**: 153-165.
- INTERREGIONAL BASIN AUTHORITY OF BASILICATA (2009) - *Piano stralcio per la Difesa del Rischio Idrogeologico*.
- LEOPARDI A., OLIVIERI E. & GRECO M. (2002) - *Two dimensional modelling of floods to map risk-prone areas*. *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- MARCHI E. & RUBATTA A. (1981) - *Meccanica dei fluidi*. 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 solve*. *River Flow*.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (2009) - *Improving Flood Map Accuracy*, USA ISBN: 0-309-13058-1.
- NATIONAL ENVIRONMENTAL RESEARCH COUNCIL (NERC) (1975) - *Flood Studies Report*. Vol. **I**, London.
- NÉELZ S., PENDER G. (2009) - *Grid resolution dependency in inundation modelling: A case study*. In: SAMUELS *et alii* (EDS) (2009) - *Flood Risk Management: Research and Practice* - Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48507-4.
- PRESTININZI P., FIORI A. & MANCINI C.P. (2006) - *Un modello numerico bidimensionale parabolico per la simulazione di inondazioni: l'utilizzo di storage cells costruite su TIN e un'applicazione al Fiume Arrone*. XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Roma, Italy.
- 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: 27- 36.

Received January 2010 - Accepted May 2011