

Un GIS per la previsione delle piene a scala regionale

Giuseppe Cervarolo¹, Francesco Colosimo¹ e Giuseppe Mendicino²

¹ *Libero professionista*

² *Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica*

1. Introduzione

Ogni anno, in molte aree del mondo, le piene fluviali prodotte da intensi eventi meteorici comportano un numero cospicuo di vittime associato ad ingenti perdite di beni. Nonostante il crescente interesse verso tematiche che riguardano la previsione e la prevenzione del rischio idrogeologico, si può osservare che l'espansione dell'attività umana e la loro sempre maggiore aggregazione in aree urbanizzate hanno prodotto in molti casi situazioni di estremo pericolo per effetto di una urbanizzazione indiscriminata di zone naturalmente destinate all'espansione dei flussi fluviali non ordinari. Tale situazione di rischio, inoltre, è presente anche in quelle zone protette da argini lungo le quali la sicurezza idraulica tende a ridursi sensibilmente durante prolungati periodi di pioggia (Todini, 1998).

Il problema delle piene fluviali è un problema alla scala globale ed, in particolare, appare destinato a subire un forte aumento nei prossimi anni, sia a causa dei più alti rischi posti in essere dall'espansione dei centri urbani, sia per effetto dei continui cambi climatici che intervengono nella naturale definizione del ciclo idrologico.

La corretta gestione delle condizioni idrologiche non ordinarie diventa quindi necessaria per una riduzione di tale andamento, che specialmente in Europa, risulta essere più intenso. Questa gestione deve essere attuata sia alla scala locale che regionale da centri specializzati in grado di prevedere l'insorgere del rischio, intervenire durante la situazione di crisi e valutare, negli istanti successivi dell'evento, le migliori strategie di assistenza e soccorso. In particolare due sono gli aspetti principali da considerare per una corretta gestione delle piene: quello legato alla valutazione del rischio e quello relativo alla fase di previsione del fenomeno.

Il rischio di piena associato ad un bacino idrografico può essere definito attraverso tre livelli di analisi che riguardano: la stima della portata al colmo di piena critica lungo la rete di drenaggio (Burlando et al., 1994); la stima degli idrogrammi di piena associati alle portate critiche (Mendicino, 1998a); la delimitazione delle aree potenzialmente esondabili (Molinari et al., 1994). Una mappatura delle zone a rischio idrologico ed idraulico è pertanto richiesta per indirizzare il monitoraggio ed il controllo del fenomeno di piena, per la redazione dei piani di intervento, oppure per la valutazione con un certo margine di anticipo delle azioni più idonee per la mitigazione degli effetti prodotti da un evento critico.

Le attività di previsione delle piene si basano, invece, sull'individuazione e sull'evoluzione del rischio durante eventi non ordinari. Tale evoluzione dipende prevalentemente dall'intensità della precipitazione e dalla sua distribuzione spaziale. Queste caratteristiche possono essere ricavate a partire dai dati acquisiti da stazioni idro-meteorologiche in telemisura che registrano in modo continuativo le altezze di pioggia ed i livelli idrici in sezioni di controllo. Questi dati devono essere accoppiati con modelli di simulazione allo scopo di determinare con un sufficiente anticipo la crescita del livello di allarme e di conseguenza se situazioni di emergenza devono essere attivate (Mendicino et al., 1998). Sempre nell'ottica della previsione delle piene può rivelarsi utile la conoscenza "a priori" della pericolosità di un campo di precipitazione atteso o osservato per una sezione fluviale presa in considerazione. Una sintesi di queste conoscenze è rappresentata dalle linee segnalatrici di precipitazione critica cumulata a scala di bacino, le quali definiscono i valori critici di pioggia in grado di innescare fenomeni di esondazione nella sezione di interesse del bacino colpito da un nubifragio.

La valutazione del rischio, così come la previsione degli eventi estremi, non sono aspetti da analizzare sin-

golarmente, essi, infatti, devono coesistere in un unico ambiente di gestione e di analisi in grado di omogeneizzare informazioni spazialmente distribuite sul territorio, il più delle volte disponibili con differenti strutture e formati. L'impiego di un sistema GIS appare pertanto indispensabile per soddisfare tali requisiti, sia attraverso le proprie funzionalità, sia attraverso procedure e modelli realizzati "ad hoc" ed integrati direttamente all'interno dello stesso sistema (Grijssen et al., 1992; ET&P, 1992; Todini, 1998).

La realizzazione di un GIS per la valutazione del rischio idrologico ed idraulico deve essere basata sulla minimizzazione degli impatti e dei danni prodotti dagli eventi non ordinari. Questo obiettivo può essere conseguito attraverso una serie di attività finalizzate ad una migliore conoscenza delle aree ad elevato rischio di piena, sulle quali pianificare correttamente tutte le fasi di intervento. In particolare, tali attività riguardano: la mappatura delle aree storicamente interessate da esondazioni dei corsi d'acqua o da allagamenti per ristagno di acque piovane; l'analisi del territorio da un punto di vista sociale ed economico; la delimitazione di aree con associati livelli di rischio determinati probabilisticamente a partire dagli eventi che si sono verificati nel passato ed infine la programmazione degli interventi da adottare durante l'emergenza.

Nel caso della previsione delle piene, un GIS deve essere strutturato secondo cinque sezioni principali, rispettivamente basate su: controllo in tempo reale delle informazioni idrologiche; attivazioni delle fasi di intervento per effetto del superamento di prefissati livelli di allarme, variabile a seconda della pericolosità dell'evento osservato; localizzazione geografica delle zone interessate dall'evento critico; trasmissione delle informazioni, circa lo stato dell'allarme rilevato, alle autorità locali preposte alla gestione della emergenza nelle zone colpite dall'evento critico; scelta degli interventi da adottare in relazione alle zone da evacuare ed alla gestione ottimale dei flussi della popolazione.

Nel seguente lavoro viene mostrato come un uso combinato di tecnologie GIS integrate con banche dati e modelli di simulazione idraulici/idrologici se opportunamente associati ad un sistema di monitoraggio a scala regionale consente il preannuncio in tempo reale di condizioni meteorologiche estreme attraverso la definizione di soglie pluviometriche di allertamento, personalizzate in relazione alle specifiche risposte idrologiche dei bacini presenti nel territorio della Regione Calabria.

La valutazione delle soglie pluviometriche si è basata sulla ricerca della soluzione inversa della classica trasformazione afflussi meteorici in deflussi di piena e sono state realizzate su circa duecento sezioni fluviali, sparse su tutto il territorio calabrese, che presentano particolari insufficienze/singolarità idrauliche.

Le principali caratteristiche dei modelli impiegati, che prevalentemente usano informazioni estratte automaticamente a partire da modelli digitali del terreno (DTM), sono analizzate nel seguente lavoro. In particolare dopo una breve descrizione sulle fasi operative che hanno condotto alla realizzazione delle soglie pluviometriche, per mezzo del GIS realizzato, sono mostrati i risultati ottenuti su due tratti di corsi d'acqua presi in esame.

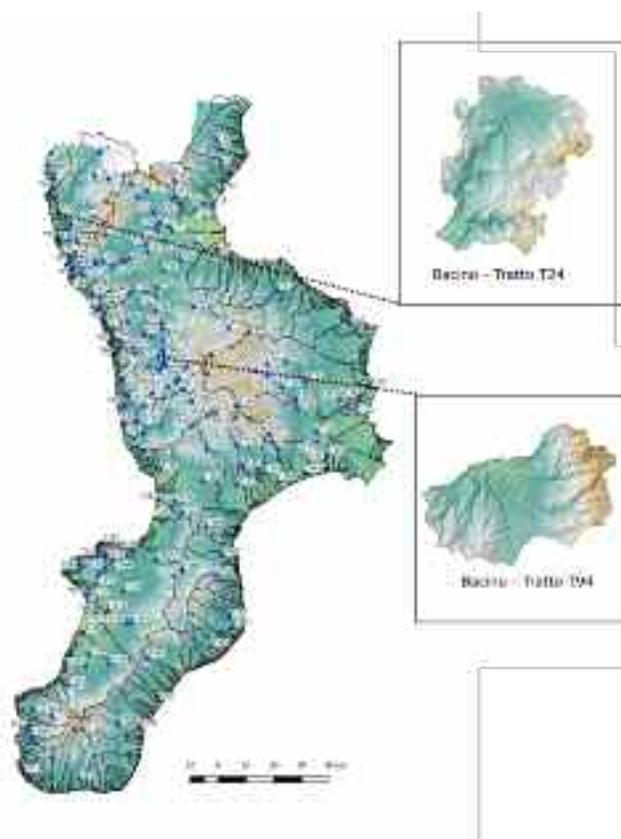


Figura 1. Localizzazione dei tronchi critici sull'intero territorio regionale e bacini idrografici analizzati nel presente lavoro

2. Area di studio

Per l'intero territorio regionale sono stati individuati circa 200 tronchi fluviali (fig. 1) che presentano sezioni con particolari insufficienze idrauliche causa di frequenti esondazioni. I tronchi fluviali individuati sono per lo più quelli ritenuti a rischio di esondazione e quindi critici, sia per esperienza di episodi siffatti (individuati tramite la consultazione del Progetto AVI, Aree Vulnerate Italiane da frane ed inondazioni, o dal PAI, Piano per l'Assetto Idrogeologico), sia in base a considerazioni di geometria idraulica (individuazione di punti singolari).

Per i tronchi individuati si è proceduto ad integrare i dati *lidar* del territorio regionale con specifici rilievi topografici finalizzati ad un più dettagliato rilievo dell'alveo (fig. 2). Il rilievo è stato condotto generalmente per un tratto di lunghezza pari ad almeno dieci volte la larghezza massima della sezione fluviale, si è proceduto inoltre al rilievo di tutte le opere presenti nel corso d'acqua (briglie, attraversamenti, ponti, argini ecc.). Successivamente su tali tronchi sono state individuate tramite modellazione idraulica le portate di guardia ossia quelle che mediamente transitano garantendo un franco di sicurezza di 1 metro.

Il valore di portata per il quale si calcolano le soglie pluviometriche è di fatto un valore di guardia idraulico per l'intero tronco critico in esame essendo l'esondazione di un tronco fluviale spesso non confinabile in una precisa sezione trasversale del corso d'acqua. Al fine di rendere più accurato possibile lo studio, per i bacini idrografici di particolare interesse ed estensione, sono stati individuati ed analizzati più tronchi critici. I bacini idrografici sono stati chiusi in corrispondenza delle sezioni critiche individuate. Tali bacini presentano una superficie che varia da un valore massimo pari a 1300 Km² per il tratto T46 sul fiume Crati ad un valore minimo pari circa 10 Km² per il tratto T11 sul torrente Fiuzzi.

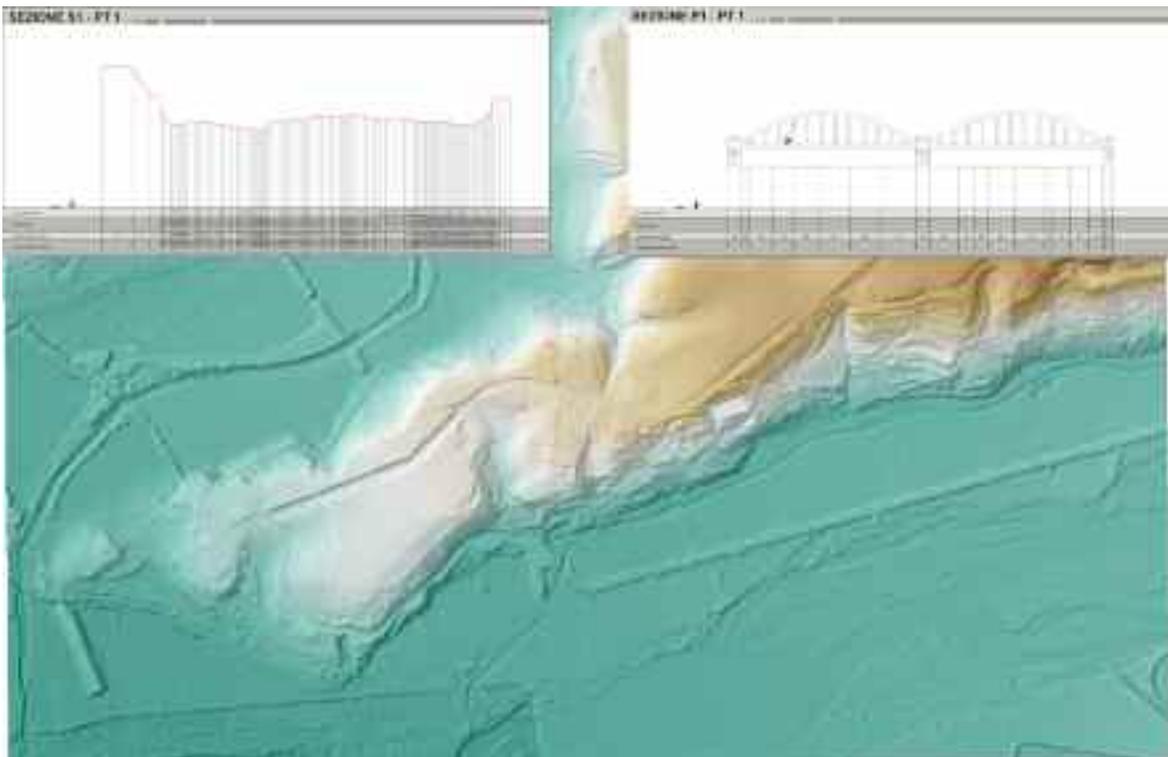


Figura 2. Dati lidar opportunamente integrati da rilievi in campo – particolare tratto T24

3. Metodologia

Le basi metodologiche e le fasi tecniche del lavoro sono orientate a realizzare, per le sezioni fluviali di interesse, delle soglie numeriche di guardia idraulica o di preallarme, basate sulla ricerca della soluzione inversa della classica trasformazione afflussi meteorici in deflussi di piena. La realizzazione di un GIS si è dimostrata fondamentale nella gestione del flusso informativo di dati e quindi per la stima di tutti i parametri di simulazione dei modelli idrologici ed idraulici ma anche per la gestione delle uscite necessarie a fronteggiare la situazione di emergenza.

Le soglie numeriche di guardia definiscono la quantità di precipitazione lorda che per assegnata durata

genera una portata di guardia in una prefissata sezione fluviale. In tal modo è possibile definire se una precipitazione prevista può essere causa di portate superiori a quella di guardia e come tale destare stati di preallerta negli organismi preposti alle funzioni di protezione civile. Queste soglie si basano sulla ricerca della soluzione inversa della classica trasformazione afflussi/deflussi. Infatti, definita una portata di guardia nelle sezioni caratteristiche dei tronchi fluviali analizzati, si determina tramite modellistica numerica la quantità di precipitazione lorda, che per diverse durate, determina la portata di piena assegnata.

Per cui passo fondamentale nelle analisi risulta la definizione della portata di guardia, avvenuta attraverso il codice di calcolo HEC-RAS sviluppato dall'*Hydrologic Engineering Center* del *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) per il calcolo dei profili di rigurgito per reti di canali naturali o artificiali. I parametri in input del modello risultano la geometria generale del corso d'acqua, le sezioni trasversali, i dati di portata in ingresso e le condizioni al contorno, dipendenti dal regime di moto della corrente; il modello consente anche l'inserimento di punti singolari quali ponti, sottopassi, briglie ecc.

Attraverso HEC-RAS è stato possibile determinare i profili idraulici di moto permanente e di conseguenza definire i valori di portata di guardia per i quali si andranno a calcolare le soglie pluviometriche.

Definite le portate di guardia, ad ognuna delle quali corrisponde una sezione critica, la soluzione del problema inverso per la determinazione delle precipitazioni di soglia è stata condotta numericamente tramite il codice di calcolo HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) dell'USACE. Tale software descrive quantitativamente la trasformazione delle piogge in deflussi superficiali sulla superficie di un bacino imbrifero mediante la definizione degli elementi concettuali che lo rappresentano e dei processi fisici che avvengono in esso. Tale codice supporta diverse tipologie di modelli di formazione dei deflussi di piena e permette quindi di combinare tra di loro più sotto modelli per formare modelli composti.

Per eseguire una simulazione idrologica il software richiede la specificazione di tre insiemi di dati:

- *Basin Model*: rappresentazione fisica delle caratteristiche del bacino idrografico;
- *Meteorologic Model*: dati meteorologici relativi alle precipitazioni e all'evapotraspirazione;
- *Control Specifications, Time-Series Data, Paired Data*: informazioni temporali necessarie per la simulazione.

Ci si rende conto che risulta necessario assegnare al modello idrologico il dato meteorologico, per cui, al fine di definire gli andamenti temporali della precipitazione, è necessario considerare gli andamenti tipici degli eventi di pioggia che si verificano nei climi temperati, rappresentati sotto forma di ietotipi standard (fig. 3), con intensità:

- costante, ossia pioggia uniforme nel tempo (ieto 1),
- linearmente crescente, tipico dei fenomeni ciclonici di forte intensità (ieto 2),
- linearmente decrescente, tipico dei fenomeni convettivi di forte intensità (ieto 3).

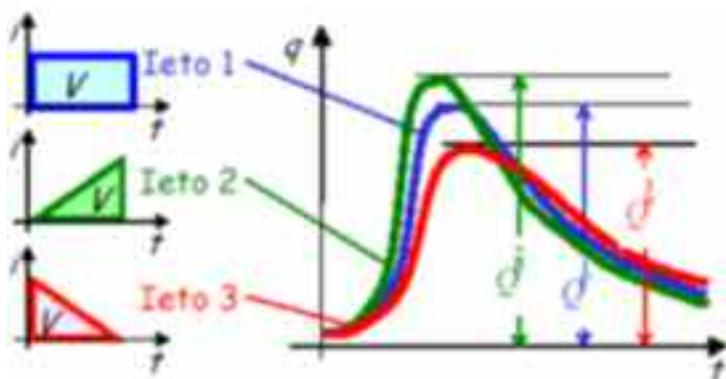


Figura 3. Ietotipi analizzati con effetti sull'idrogramma di piena

Un ulteriore fattore di variabilità riguarda lo stato iniziale del sistema rappresentato dalle condizioni di imbibimento dei terreni del bacino idrografico. In via approssimata, tale condizione è espressa in modo sintetico con un indice di imbibimento, quale l'indice AMC (*Antecedent Moisture Condition*) del *Soil Conservation Service* (SCS, 1968) secondo la procedura detta del *Curve Number* (CN). Tale indice, sulla base della sola precipitazione antecedente l'evento meteorico preso in esame, rappresenta lo stato di imbibimento in tre classi: stato o tipo I, per bacini complessivamente asciutti; tipo II per bacini mediamente umidi e tipo III

per bacini fortemente umidi. Ci si deve quindi attendere che differenti stati AMC diano origine a differenti soglie pluviometriche. La simulazione della trasformazione afflussi-deflussi in definitiva è quindi condotta a partire da una prefissata condizione iniziale di imbibimento, secondo i tre tipi AMC I, II e III. Per via iterativa viene ricercata l'altezza di pioggia cumulata, ragguagliata sul bacino in esame, in grado di provocare il superamento della prefissata portata di guardia nella sezione critica individuata attraverso simulazione idraulica. Questo procedimento va ripetuto per durate progressivamente crescenti a partire dall'origine dell'asse temporale, identificando in tal modo la curva sul piano (P, d) dove "P" indica l'altezza di pioggia cumulata a scala di bacino e "d" la durata progressiva del nubifragio stesso. Il procedimento viene iterato indipendentemente per i tre tipi AMC, determinando così le tre curve associate a stato iniziale asciutto, mediamente e fortemente umido, e per i tre ietotipi presi in esame (fig. 9).

In definitiva, quindi, la soglia pluviometrica ha una forma condizionata del tipo Plim (d,AMC,ieto) in dipendenza dei due principali fattori di controllo: l'imbibimento iniziale e la forma dello ietogramma.

Dopo aver determinato per le sezioni in esame le soglie pluviometriche, riferite a diversi ietotipi e diverse condizioni di umidità del suolo, al fine di realizzare un sistema di allertamento in tempo reale è necessario confrontare la pioggia registrata dal pluviometro o dai pluviometri di riferimento con le soglie realizzate. Quando i dati di pioggia registrati dalle stazioni eccedono i valori soglia, il sistema comunicherà l'insorgere della situazione di pericolo, la cui area di interesse risulta localizzata geograficamente. Per la stessa area i livelli idrometrici dovranno essere tenuti sotto controllo al fine di verificare se le condizioni di pericolo permangono e specifiche procedure di allarme devono essere intraprese secondo quanto previsto dai piani di intervento.

Un sistema si fatto presenta la necessità di una fase in cui venga analizzata l'affidabilità del sistema stesso. Per verificare l'affidabilità sono necessari dati pluviometrici sul bacino e dati idrometrici relativi alla sezione d'interesse che consentono di classificare gli eventi di pioggia in base alle seguenti condizioni:

- portata alla sezione maggiore o minore della portata critica,
- pioggia cumulata ragguagliata superiore o inferiore alla soglia pluviometrica di preallerta.

Si ottengono così le tipologie di allarmi di seguito elencate:

NESSUN ALLARME: indica la situazione in cui la portata di guardia non viene superata ed il sistema di preallerta non segnala allarmi;

GIUSTO ALLARME: indica la situazione in cui la portata di guardia viene superata e preannunciata correttamente da una segnalazione di allarme del sistema;

FALSO ALLARME: indica quella situazione in cui il sistema preannuncia un allarme che non trova riscontro nell'osservazione della portata di piena;

MANCATO ALLARME: si riferisce ad una situazione in cui, a fronte del superamento della portata di guardia, il sistema non preannuncia l'allarme;

ALLARME TARDIVO: si riferisce alla situazione in cui il sistema segnala un allarme effettivamente verificatosi, ma con un certo ritardo.

L'insieme dei GIUSTI ALLARMI e dei NESSUN ALLARME costituisce il grado di buon funzionamento del sistema di preallerta, i FALSI ALLARMI danno una misura di quanto le soglie pluviometriche di preallerta siano cautelative (fattore di sicurezza) e il complesso dei MANCATI ALLARMI e ALLARMI TARDIVI costituisce il mal funzionamento del sistema.

L'analisi di affidabilità può essere condotta come già detto con l'analisi dei dati idro-meteorologici storici raccolti dalla rete di monitoraggio, ma i risultati così ottenuti risultano però basati su un campione di eventi non sufficientemente numeroso a garantire la robustezza delle statistiche, per cui in taluni casi si adottano dei modelli stocastici di generazione di dati di pioggia sintetici con il quale si possono produrre delle serie pluviometriche a scansione oraria per un numero di anni elevatissimo attraverso le quali effettuare analisi di affidabilità più robuste.

4. Applicazione del metodo

Il software utilizzato per la gestione di tutte le fasi procedurali e per l'estrazione dei parametri in input nei modelli idraulici ed idrologici sopra menzionati è QGIS (www.qgis.org), un Sistema di Informazione Geo-

grafica Libero e Open Source ampiamente utilizzato per scopi professionali e nella ricerca scientifica. Esso rappresenta in ambito lavorativo una valida alternativa alle applicazioni GIS commerciali per flessibilità, performance e facilità d'uso. Inoltre QGIS consente attraverso apposite funzioni di richiamare al suo interno geolgoritmi di altri software quali ad esempio SAGA, GRASS, TauDEM, R, indispensabili per le analisi successive.

Il lavoro che ha portato alla realizzazione del GIS è caratterizzato dalle seguenti fasi operative:

- Fase I: Acquisizione ed implementazione dati;
- Fase II: Modellazione idraulica e determinazione delle portate di guardia;
- Fase III: Modellazione idrologica e definizione delle soglie pluviometriche;
- Fase IV: Validazione delle soglie e acquisizione in tempo reale delle informazioni idro- meteorologiche su ciascun bacino di riferimento.

Per quanto riguarda la fase I, inerente l'acquisizione e l'implementazione dei dati, il GIS realizzato consente di gestire, elaborare ed archiviare informazioni sia vettoriali che raster per cui i dati implementati al suo interno risultano: modello digitale del terreno (DTM); dati lidar; ortofoto; limiti amministrativi; limiti di bacino e reticolo idrografico; isoipse; serbatoi naturali ed artificiali; centri urbani; viabilità; aree vulnerabili; copertura del suolo; dati geologici ed altro. Tali informazioni ricoprono un ruolo fondamentale sia per il pre-processamento dei dati in input (idrologici, morfologici e litologici) nei modelli di simulazione ma anche in fase di attivazione delle procedure di allarme e di gestione delle emergenze (fig. 4).

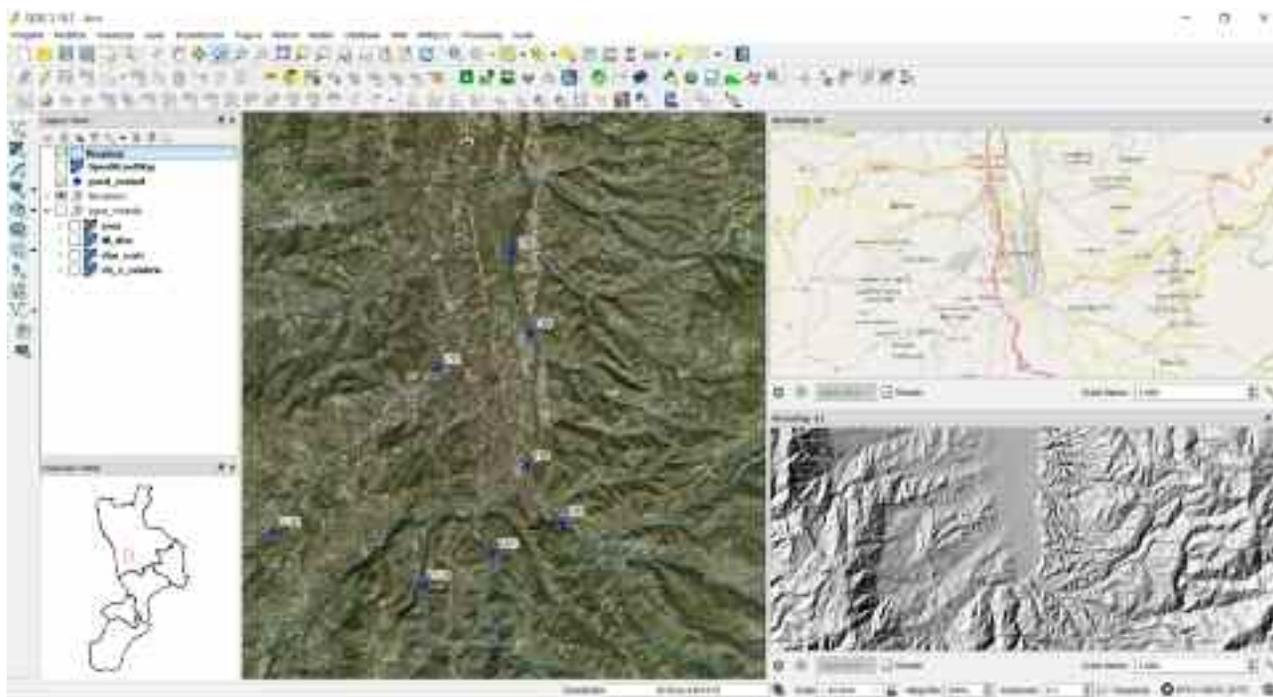


Figura 4. Differenti livelli di informazione presenti nel GIS sviluppato

L'estrazione dei parametri in *input* da assegnare nei modelli risulta la fase più impegnativa dal punto di vista computazionale, per cui le procedure di preparazione ed estrazione di tali parametri sono state automatizzate attraverso l'utilizzo di appositi *plugin* e tramite modelli realizzati "ad hoc" che consentono di ampliare le funzionalità già presenti nel GIS.

La fase II del lavoro, inerente la definizione delle portate di guardia, è stata agevolata attraverso l'utilizzo del *plugin RiverGIS*. Tale *plugin* opera come preprocessore di HEC-RAS, infatti, basta digitalizzare le sezioni ed il corso d'acqua, a partire dai dati *lidar* opportunamente aggiornati, al fine di creare ed importare, in modo del tutto automatico, la geometria in HEC-RAS, poter eseguire le simulazioni e quindi definire iterativamente le portate di guardia.

Individuate le portate di guardia si è proceduto alla costruzione del modello idrologico dei bacini ed alla definizione delle soglie pluviometriche (fase III). Il bacino idrografico è, in linea di principio, un sistema a parametri distribuiti. Lo stato fisico del bacino è infatti diverso da punto a punto. Tuttavia, al fine di

considerare, seppur parzialmente, la variabilità spaziale dei parametri si è proceduto ad una modellazione semi-distribuita scomponendo il bacino in esame in sottobacini tributari per ognuno dei quali si sono considerati i parametri come concentrati, assegnando a ciascun parametro un solo valore assunto mediamente valido per tutto il sottobacino.

In un bacino, con HEC-HMS, i processi idrologici vengono modellati distinguendo tre fasi:

- le perdite iniziali;
- la trasformazione afflussi meteorici in deflussi superficiali;
- i processi del deflusso sub-superficiale o deflussi di base.

Per ognuno di tali processi vanno specificati i metodi di calcolo tra i diversi proposti dal software. Una volta stabilito il metodo per le tre componenti di calcolo è possibile selezionare diverse opzioni associate ai metodi prescelti, ciascuna delle quali consente di visualizzare i diversi parametri fisici e idrologici da specificare. Per quanto riguarda il calcolo delle perdite del bacino si è fatto riferimento al metodo del SCS Curve Number; tale metodo anche se non è considerato un metodo dalle robuste basi fisiche, quando è usato alla scala locale fornisce buone stime della quantità di pioggia infiltrata nel suolo, (Colosimo e Mendicino, 1991). Inoltre il metodo SCS *Curve Number* è il più accessibile data la semplice reperibilità delle informazioni che occorrono alla determinazione del parametro CN. Tale metodo tiene conto delle condizioni di umidità del suolo antecedente all'inizio dell'evento (AMC) per cui è possibile definire attraverso delle formule correttive a partire dal CN riferito alla condizione AMCII i valori di CN riferiti alla condizione asciutta AMCI o alla condizione umida AMCIII.

Relativamente ai metodi di calcolo della trasformazione afflussi-deflussi, che a partire dalla quota parte di precipitazione che effettivamente contribuisce al deflusso superficiale (precipitazione efficace), determinano il conseguente idrogramma, HEC-HMS consente di applicare diversi metodi, tra questi vi sono: il metodo cinematico, i metodi basati sulla teoria dell'idrogramma unitario (di Clark, di Snyder, del *Soil Conservation Service* o definiti manualmente dall'utente) e i metodi che fanno riferimento a deflussi superficiali di tipo quasi-distribuito (metodo di Clark modificato). Nel caso in esame si è fatto riferimento al metodo del *Soil Conservation Service*. Non si è ritenuto necessario fare ricorso alla simulazione dei deflussi di base. I dati in ingresso al modello idrologico, inerenti le caratteristiche fisiche del sistema, sono stati estratti attraverso il GIS, per mezzo di un algoritmo appositamente realizzato adoperando il *Model Builder* di QGIS. Il *Model Builder* è particolarmente utile per la creazione di flussi di lavoro dando la possibilità di automatizzare delle operazioni attraverso la combinazione in successione di diversi algoritmi e layer di input (fig. 5a), creando un vero e proprio *tool* che può essere avviato ogni qual volta lo si desidera. La maggior parte delle informazioni da assegnare al modello idrologico sono estratte dal modello digitale del terreno, nel caso in esame si è utilizzato un DTM con risoluzione pari a 20 m riferito all'intero territorio regionale.

Il *tool* realizzato (fig. 5b) richiede in input: le coordinate x ed y della sezione di interesse (sezione critica o sezioni di chiusura dei sottobacini tributari), un modello digitale del terreno DTM, ripulito dalle depressioni, ed il *raster* della distribuzione spaziale del parametro di assorbimento CN derivato a partire dagli usi del suolo e dalle caratteristiche geo-litologiche della Calabria.

L'algoritmo realizzato richiama al suo interno diversi geoalgoritmi (alcuni "nativi" interni di QGIS ed altri derivanti dalla connessione con gli algoritmi SAGA e GRASS) creando un flusso di operazioni che possono essere ripetute più volte. I geoalgoritmi richiamati all'interno del modello sono per lo più di tipo idrologico e statistico. Quelli idrologici consentono, specificata una cella di destinazione (*target*) che nel nostro caso è data dalla sezione di interesse, di determinare a partire dal *raster* delle direzioni di drenaggio (che definisce come l'acqua si muove sulla superficie del terreno) le celle che contribuiscono alla formazione del deflusso sulla cella *target* così da poter individuare il reticolo idrografico e delimitare il bacino (fig. 6). Definito il bacino idrografico chiuso in corrispondenza della sezione di interesse, attraverso gli algoritmi di tipo statistico, sono calcolati i valori massimi, minimi e medi delle grandezze morfometriche e dei parametri che lo caratterizzano.

Per cui, in definitiva, assegnati gli *input*, l'algoritmo avvierà in sequenza le operazioni definite restituendo in *output*: lo *shapefile* del bacino idrografico chiuso nel punto di coordinate note (fig. 5c) con informazioni all'interno della tabella degli attributi della superficie (Kmq), del perimetro dello spartiacque (Km) e della

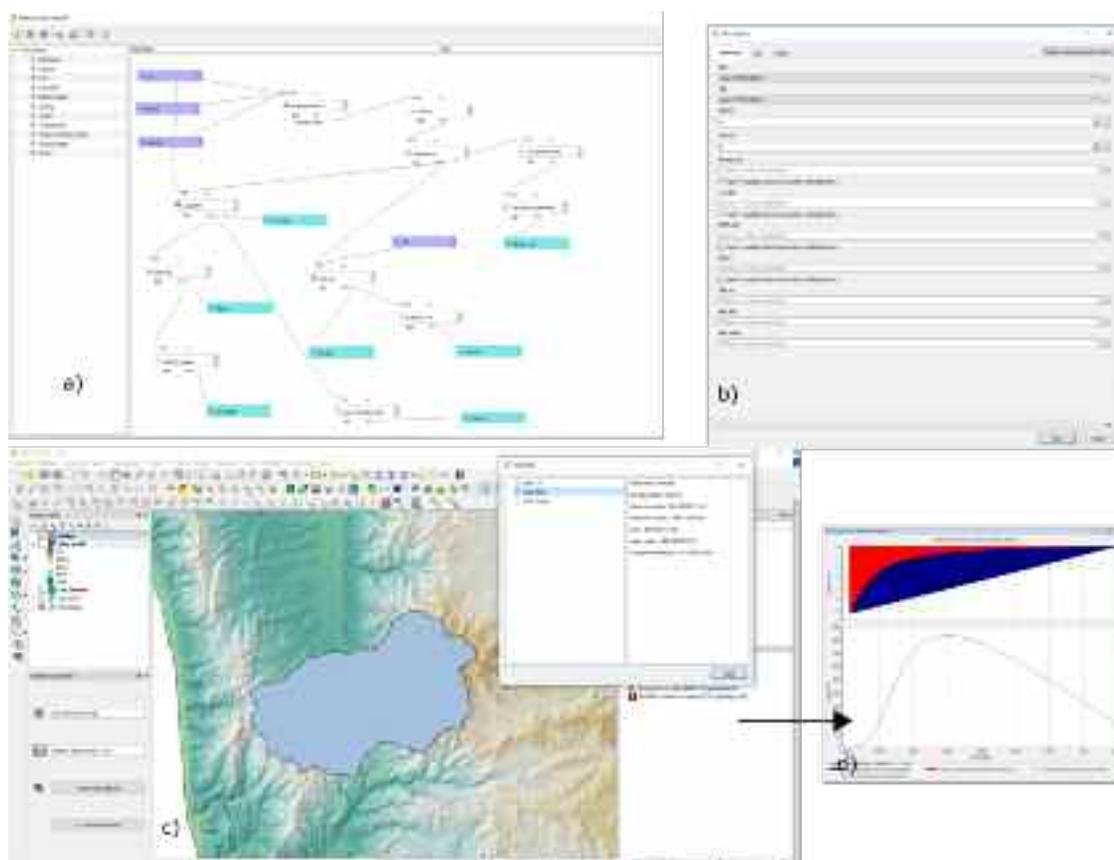


Figura 5. Modellatore grafico con flussi di lavoro a) Interfaccia tool per l'inserimento degli input b) bacino idrografico e parametri morfometrici c) Piogge ed idrogramma del modello idrologico d)

lunghezza dell'asta principale (km). Inoltre nella finestra dei risultati, accessibile dal *processing*, sarà possibile conoscere:

- la quota massima, minima, media del bacino,
- il valore medio del CN per la condizione AMCII,
- il valore della pendenza massima, minima e media dei versanti.

Le informazioni derivate, a partire da pochi dati in ingresso, consentono di determinare le perdite iniziali del bacino (funzione del massimo invaso del suolo) ed il tempo di ritardo (*tlag*). Si hanno a questo punto tutti i parametri, che caratterizzano dal punto di vista fisico il bacino idrografico, da poter assegnare al modello idrologico.

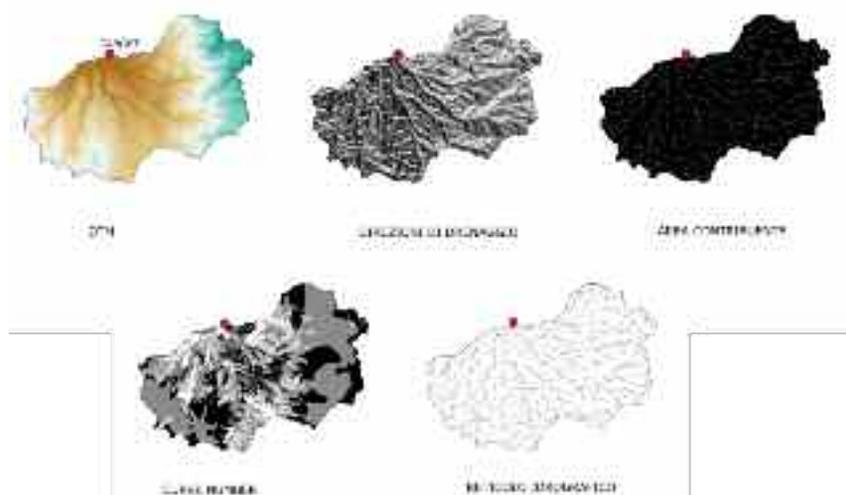


Figura 6. Pre-processingo dati in input al modello idrologico

A questo punto non rimane che definire gli aspetti meteorologici per cui è necessario fissare la forma dello ietogramma, la durata "d" della pioggia e lo stato di umidità iniziale del terreno in base all'indice

AMC, con i quali si caratterizza l'episodio idrologico per il quale si intende stimare il valore della soglia. Va quindi ricercato il valore di altezza cumulata della pioggia ragguagliata in grado di provocare il superamento della portata critica di riferimento nella sezione critica presa in esame.

A tal fine, le simulazioni sono condotte in modo indipendente tra loro per tutte le combinazioni dei tre ietotipi sopra considerati, dei tre tipi di AMC e per cinque orizzonti di durata, pari a 1, 3, 6, 12 e 24 ore. La ricerca del valore di soglia è stato ottenuto per iterazioni successive del modello di simulazione idrologica, fino ad ottenere quel valore di pioggia cumulata che provoca nella sezione di chiusura del bacino (sezione critica) un valore di portata al picco Q_p (fig. 5d) pari alla portata massima smaltibile (portata critica di riferimento, Q_{crif}).

Per la soluzione del problema di calcolo numerico si è implementato un semplice algoritmo di ottimizzazione automatica monodimensionale, che costruisce piogge con diversi valori di altezza cumulata H_d , per il quale la durata e la forma dello ietogramma sono fissabili a priori. L'algoritmo fa variare H_d fino a minimizzare (ovvero rendere nullo) lo scarto quadratico tra il valore di portata al picco Q_p , simulata nella sezione critica, e la portata critica di riferimento, Q_{crif} . Tale procedura è stata automatizzata realizzando uno *script* in *Visual Basic*. La procedura di seguito descritta ha consentito la definizione delle soglie pluviometriche per tutte le sezioni critiche individuate dimostrandosi di semplice utilizzo operativo e garantendo un ottimo controllo dei processi.

Per quanto riguarda la quarta ed ultima fase, essendo il GIS realizzato ancora in uno stadio prototipale, ci si propone nel breve termine di validare le soglie realizzate attraverso l'integrazione dello stesso a sistemi di monitoraggio in tempo reale delle grandezze idro-meteorologiche sui bacini di riferimento. Al momento grazie ai modelli idraulici realizzati è possibile conoscere le scale di deflusso delle sezioni critiche (fig. 7 e 8). La realizzazione delle scale di deflusso consente di ottenere una stima attendibile dei deflussi reali in uscita dai bacini idrografici di interesse, funzione del solo valore del livello idrico. Pertanto al fine della realizzazione di un sistema di allertamento è necessario che le sezioni in cui vengono determinate tali scale siano dotate di appositi idrometri che consentano in tempo reale la misura della variazione dei livelli idrici e quindi delle portate che fluiscono nella sezione che ad oggi sul territorio calabrese risultano carenti a differenza della crescente disponibilità di informazione meteorologica.

5. Risultati

Nella sezione seguente vengono mostrati i risultati ottenuti attraverso l'applicazione del metodo sopra descritto su due dei tronchi analizzati.

Il primo tronco identificato come T94 interessa il fiume Crati, la sezione critica è situata nella parte vecchia di Cosenza, sottende un'area di 274 Km² e risulta caratterizzata da una portata critica pari a 830 m³/s.

Mentre il secondo tronco, T24, interessa il fiume Lao, la sezione critica è situata 600 m a monte dell'aviosuperficie di Scalea e sottende un bacino idrografico di 574 Km² con una portata critica pari a 300 m³/s.

Di seguito vengono mostrate le sezioni critiche individuate (fig. 7 e 8) e la tabella (tab. 1) che riporta le principali caratteristiche riscontrate.

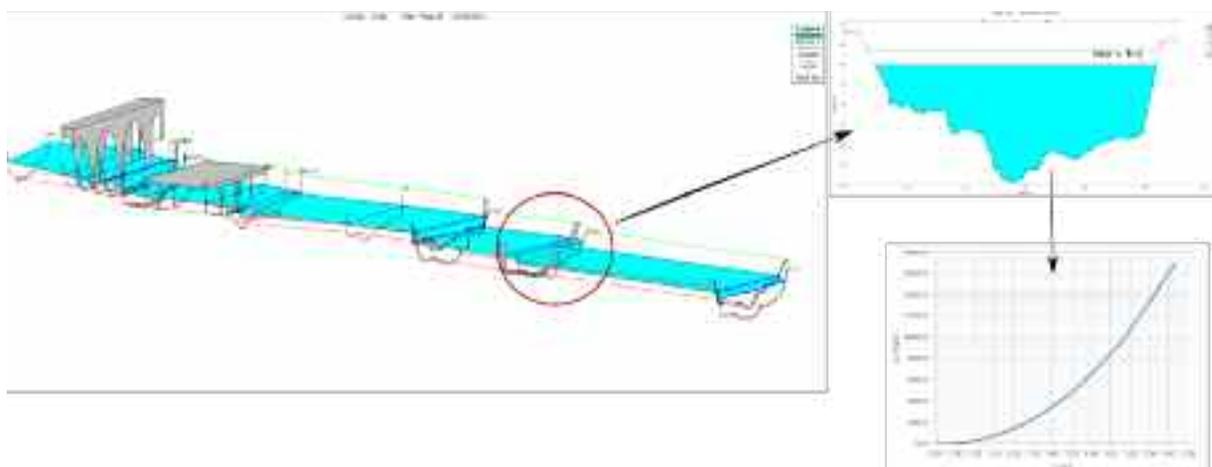


Figura 7. Ubicazione sezione critica tratto T94 con scala di deflusso

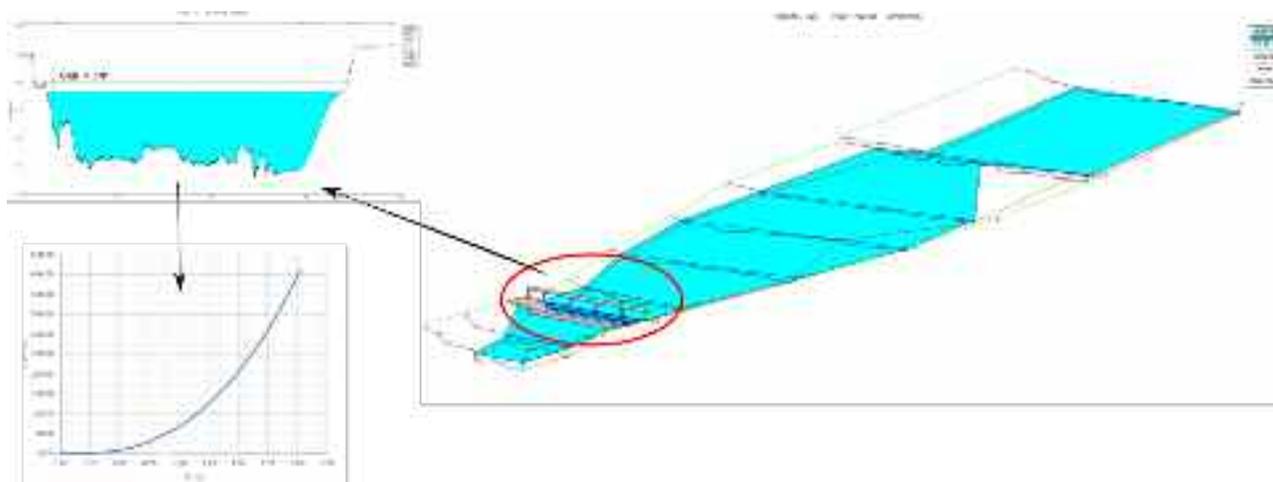


Figura 8. Ubicazione sezione critica tratto T24 con scala di deflusso

Sezione	Area (Km ²)	Qc (m ³ /h)	Tc (ore)
T94	274	830	5,73
T24	574	300	7,33

Tabella 1. Dati inerenti le sezioni critiche analizzate

Il tratto T94 è prevalentemente regolare e ben arginato, per cui, nonostante sia caratterizzato da un bacino idrografico di superficie minore, è in grado di smaltire un portata ben superiore rispetto al tratto T24 che nonostante la maggiore superficie del bacino presenta una portata di guardia minore dovuta ad un notevole restringimento delle sezioni a monte dell’attraversamento.

Nella figura 9 sono diagrammati i valori soglia, calcolati per le sezioni critiche considerate in funzione delle tre diverse condizioni di umidità del suolo e dei tre diversi tipi di ietogrammi. L’impiego dei tre gradi di umidità del suolo associati ai tre ietogrammi comportano una riduzione nell’incertezza associata alla non linearità della trasformazione afflussi-deflussi.

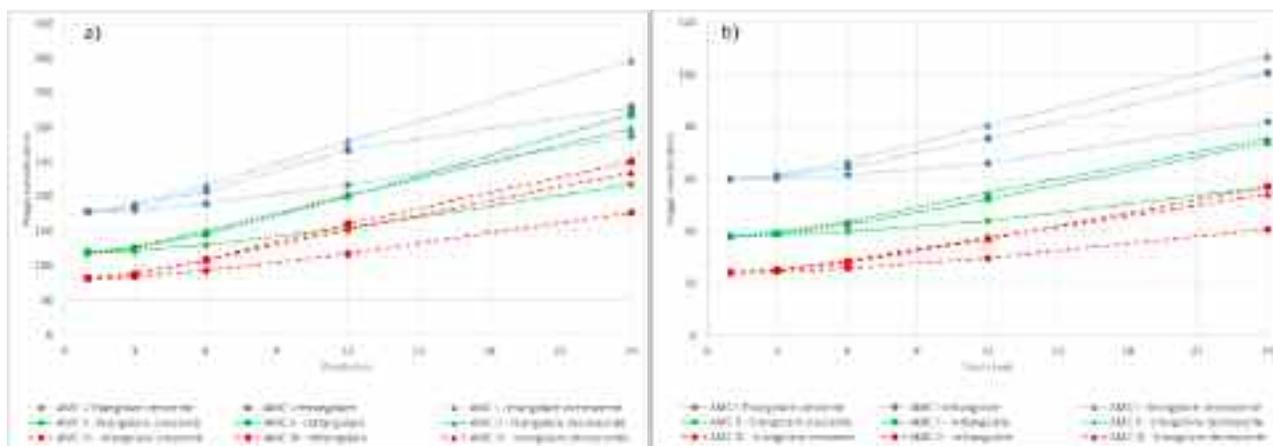


Figura 9. Soglie pluviometriche per la sezione critica del tratto T94 a) e per la sezione critica del tratto T24 b)

Definite le soglie pluviometriche per ciascuna sezione critica individuata basta confrontare le piogge registrate dai pluviometri di riferimento con i valori soglia, l’eventuale superamento comporterà l’attivazione di un livello di allerta. Tutte le informazioni caricate nel GIS consentono, inoltre, la gestione degli interventi da adottare in relazione alle zone da evacuare ed alla gestione ottimale dei flussi della popolazione grazie alla mappatura di tutti gli edifici strategici memorizzati in un apposito archivio del sistema ed alla presenza delle mappe di vulnerabilità.

6. Conclusioni

La crescente disponibilità di informazioni idro-meteorologiche associata alla maggiore attenzione verso problematiche inerenti la valutazione del rischio e la gestione delle emergenze in situazioni critiche ha comportato la realizzazione per l'intero territorio regionale di un sofisticato sistema di previsione delle piene. Questo sistema, ancora in una fase prototipale, è strutturato combinando le funzionalità offerte da un GIS *Open Source* quale QGIS con le funzionalità dei codici di calcolo di tipo idraulico (HEC-RAS) ed idrologico (HEC-HMS). Il sistema presentato ha consentito la realizzazione in modo del tutto automatico delle soglie pluviometriche per le sezioni critiche individuate, sfruttando principalmente informazioni derivate da modelli digitali del terreno opportunamente aggiornati.

Le soglie pluviometriche definite consentono di attivare situazioni di allerta qualora le precipitazioni in telemisura superano i valori critici. Tale sistema di preallerta ha il pregio di sintetizzare in un valore di altezza di pioggia critica tutta la complessità dei fenomeni alla base della formazione delle piene fluviali. Inoltre le soglie pluviometriche realizzate costituiscono un importante anello di una catena previsionale che può essere più articolata e complessa, consentendo di condurre preliminari valutazioni di massima sulla pericolosità ed il rischio associati al verificarsi di un evento meteorico sulla base del solo assetto meteorologico.

Sviluppi futuri saranno rivolti alla validazione delle soglie determinate, all'integrazione del GIS con sistemi di monitoraggio idro-meteorologici in telemisura e l'impiego di modelli meteorologici di previsione delle piogge ad area limitata (LAM). Nello specifico, l'utilizzo di modelli meteorologici consentirà di estendere l'orizzonte temporale del preannuncio di piena ed ottenere scenari idrologici di piena con congrui anticipi. La conoscenza a priori di un campo di precipitazione atteso infatti aumenta l'orizzonte temporale del preannuncio di piena aumentando così i benefici derivanti da un sì fatto sistema.

Bibliografia

- Amadio, P., Mancini, M., Menduni, G., e Ravazzani, G., 2004, «Analisi di Affidabilità del Sistema di Preallerta di Piena in Tempo Reale MIMI per il Bacino del Fiume Arno» in *29° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, pp. 901-908, Trento, Italy.
- Arpa Piemonte, 2004, «Convenzione tra il Dipartimento per la Protezione Civile e l'Arpa Piemonte per l'Assistenza alla Gestione delle Situazioni di Rischio Idro-Meteorologico sul Territorio Nazionale» in *Progetto di un Sistema Informativo Meteo-Idrologico che Integra le Risorse Osservative e Modellistiche a Supporto della Gestione del Rischio per la Protezione Civile Nazionale*.
- Autorità di Bacino Regionale (Regione Calabria), 2001, *Piano di Assetto Idrogeologico (PAI)*.
- Burlando, P., Mancini, M., e Rosso, R., 1994, «FLORA : A Distributed Flood Risk Analyser» in *Computer Support for Environmental Impact Assessment*, pp. 91-102, North-Holland, Amsterdam.
- Colosimo, C., e Mendicino, G., 1991, «L'Uso dei GIS per la Stima dei Parametri di Assorbimento in un Bacino Idrografico» in *Ingegneria Sanitaria*, n°6, pp. 861-876.
- ET&P, 1992, «The Fuchun River Project- A Computer Based Real-Time System» in *Final Report Research Contract*, CI13-0004-I.
- Grijse, J.C., Snoeker, X. C., Vermeulen, C.J.M., Mohamed ElAmin Moh. Nur e Yasir Abbas Mohamed., 1992, «An Information System for flood Early Warning» in *Floods and Flood Management*, pp. 263-289 Kluwer.
- Mendicino, G., 1998a, «A GIS-Based Program for the Analysis Subjected to Hydrological Risk» in *GIS Technologies and their Environmental Applications, Computational Mechanics Publications*, pp.121-130, Southampton.
- Mendicino, G., Iritano, G., e Versace, P., 1998, «Il Preannuncio delle Piene nei Piccoli Bacini. Il Caso dell'Esaro di Crotona» in *Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Vol. II, pp. 121-130, Catania, Italy.
- Mendicino G. et al., 2012, «Procedure di valutazione dell'indice tecnico nei Piani di Classifica dei Consorzi di Bonifica per il calcolo dei contributi consortili. Il caso dei Consorzi del Cosentino» in *L'Acqua – Rivista bimestrale dell'Associazione Idrotecnica Italiana*, n°03, pp. 9-20, Roma.
- Mendicino G., 2015, «Sistemi Informativi Geografici per il preannuncio dei rischi ambientali» in *Gis Day Calabria 2015*, pp. 3-35, Map Design Project, Cosenza.

Molinaro, P., Di Filippo, A., e Ferrari, F., 1994, «Modelling of Flood Wave Propagation Over Flat Dry Areas of Complex Topography in Presence of Different Infrastructures» in *Modelling of Flood Propagation over Initially Dry Areas, Proc. Of the Specialty Conf. ENEL-DSR-CRIS*, pp. 209-228, Milan, Italy.

Soil Conservation Service, 1968, «Hydrology» in *National Engineering Handbook*, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.

Todini, E., 1998, «Real-Time Flood Forecasting: Problems, Possibilities and Proposed Solutions» in *International IDNDR-Conference on Early Warning Systems for the Reduction of Natural Disasters*, Potsdam, Germany.