

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica  
LaMPIT - Laboratorio di Modellistica numerica per la Protezione Idraulica del Territorio

**Dottorato di Ricerca in**

Scienze e Ingegneria per l'Ambiente, le Costruzioni e l'Energia

**XXXI CICLO**

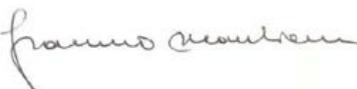
**La rappresentazione virtuale delle simulazioni 2-D delle piene in aree urbane per il  
miglioramento della comunicazione del rischio idraulico**

**Settore Scientifico Disciplinare ICAR/02**

**Coordinatore:** Ch.mo Prof. Salvatore Critelli

Firma 

**Supervisor/Tutor:** Ch.mo Prof. Francesco Macchione

Firma 

Ch.mo Prof. Pietro Salvatore Pantano

Firma 

**Co-supervisore/Co-tutor:** Ing. Pierfranco Costabile

Firma 

**Dottoranda:** Dott. ssa Ing. Rosa De Santis

Firma 

## Sommario

Abstract .....	7
Pubblicazioni .....	11
Capitolo 1 - Metodi per la valutazione quantitativa del rischio idraulico .....	12
1. Introduzione .....	12
2. Formulazione delle equazioni di <i>De Saint Venant</i> per la simulazione delle piene .....	13
3. Breve rassegna dei metodi numerici e dei principali codici di calcolo utilizzati per l'integrazione delle <i>Shallow Water Equations</i> .....	15
4. La simulazione delle alluvioni: il metodo ai volumi finiti applicato alle <i>Shallow Water Equations</i> .....	17
4.1. La rappresentazione topografica del terreno e dei manufatti .....	20
4.2. Le condizioni iniziali .....	24
4.3. Le condizioni al contorno .....	24
4.4. La stima della scabrezza .....	25
5. Conclusioni .....	29
Capitolo 2 - Metodi tecnici usuali per la mappatura della pericolosità idraulica .....	30
1. Introduzione .....	30
2. I criteri di mappatura in Europa .....	30
2.1. Mappe di pericolosità .....	37
2.2. Mappe di rischio .....	41
3. Il modello statunitense di trattamento del rischio alluvionale .....	42
4. Limiti della mappatura classica nella comunicazione della pericolosità .....	45
Capitolo 3 – Descrizione del caso di studio utilizzato per la proposta delle tecniche di mappatura .....	48
1. Introduzione .....	48
2. Rassegna delle alluvioni storiche di Cosenza .....	50
3. Descrizione dell'evento del 24 novembre 1959 .....	58
3.1. Analisi idrologica e determinazione dell'idrogramma di piena .....	58
3.2. Documentazione giornalistica degli effetti dell'alluvione in città e nei dintorni .....	60

3.3.	Valutazione dei danni e la sua distribuzione spaziale.....	65
4.	Simulazione numerica dell'alluvione di Cosenza.....	69
4.1.	Caratterizzazione del caso studio.....	69
4.2.	Costruzione del dominio di calcolo .....	70
4.3.	Breve descrizione del codice di calcolo utilizzato.....	72
4.4.	Analisi e discussione dei risultati.....	73
Capitolo 4 – Verso la mappatura 3-D per il miglioramento della comunicazione del rischio idraulico .....		75
1.	Introduzione .....	75
2.	Descrizione ed implementazione del <i>workflow</i> .....	77
2.1.	Costruzione e modellazione degli edifici.....	79
2.2.	Miglioramento della qualità visiva dell'ambiente urbano virtuale e <i>rendering</i> finali .	81
3.	Rappresentazione di uno scenario di allagamento in un ambiente 3-D: risultati.....	87
4.	Considerazioni sul <i>workflow</i> proposto .....	91
5.	Prospettive: in che modo le rappresentazioni 3-D possono integrare le mappe di rischio di alluvione per soddisfare le esigenze di diversi gruppi di utenti finali nella gestione del rischio	94
6.	Conclusioni .....	98
Capitolo 5 – Trattamento ed utilizzo di dati laser a scansione terrestre per la costruzione di modelli urbani 3-D realistici .....		100
1.	Introduzione .....	100
2.	Acquisizione dei dati.....	102
2.1.	Il Laser Scanner Terrestre e la campagna di acquisizione.....	102
2.2.	<i>Processing</i> dei dati.....	104
2.3.	Visualizzazione dell'ambiente 3-D.....	106
3.	Fusione dei dati LiDAR provenienti da piattaforma aerea e terrestre .....	107
4.	Il ruolo dei dati LiDAR terrestri per la mappatura della pericolosità idraulica e la comunicazione del rischio .....	110
5.	<i>Web-based rendering</i> di nuvole di punti per la rappresentazione interattiva di inondazioni urbane .....	112

6. Conclusioni .....	114
Capitolo 6 – Considerazioni generali e prospettive future .....	116
Bibliografia.....	118

### **Indice delle figure**

Figura 1-1 Esempio di griglia strutturata .....	22
Figura 1-2. Esempio di griglia non strutturata a maglia triangolare .....	23
Figura 2-1. Persone colpite da inondazioni (per milione di abitanti 2000-14). Dall' European Parliamentary Research Service Blog ( <a href="https://epthinktank.eu/2015/06/17/water-legislation-cost-of-non-europe-report/fig-2-10/">https://epthinktank.eu/2015/06/17/water-legislation-cost-of-non-europe-report/fig-2-10/</a> ) .....	31
Figura 2-2. Esempio di mappa. Le aree colorate in blu e in celeste rappresentano l'estensione dell'area inondabile per diversi tempi di ritorno; la campitura rappresenta l'estensione della piena in presenza di argini (da Van Alphen et al., 2009).....	39
Figura 2-3. Fiumara Valanidi (Calabria): carta delle aree inondabili (TR = 500 anni), massimi valori dei tiranti idrici. Elaborato prodotto nel Progetto POR Calabria 2000-2006.....	40
Figura 2-4. Fiumara Valanidi (Calabria): carta delle aree inondabili (TR = 500 anni), massimi valori del prodotto velocità per tirante. Elaborato prodotto nel Progetto POR Calabria 2000-2006. ....	41
Figura 2-5. Ciclo di azioni del progetto RiskMAP .....	43
Figura 3-1. Centro storico di Cosenza .....	49
Figura 3-2. Progetto del nuovo ponte san Lorenzo, redatto nel 1848 dall'arch. Clausi nel 1848. Intendenza di Calabria citeriore, opere pubbliche comunali b/13 fasc. 289 .....	52
Figura 3-3. Cosenza, fine 800. Fiume Crati e le due sponde ancora non delineate, che oggi sono: via lungo Crati "Donato Bendicenti" (a destra), via lungo Crati "Dante Alighieri" (a sinistra). A destra il rione Massa, in alto palazzo Arnone su colle Triglio, al centro il vecchio "ponte dei Pignatari", sostituito negli anni '60 dall'attuale ponte San Lorenzo.....	53
Figura 3-4. Estensione delle aree inondate dall'evento 1903, riportate su carta catastale.....	54
Figura 3-5. Fiume Busento: Il Ponte S. Domenico prima dell'alluvione del 1903.....	56
Figura 3-6. Il nuovo ponte S. Domenico e la sistemazione del Busento .....	56
Figura 3-7. Sistemazione della confluenza, progetto del 1904 .....	57
Figura 3-8. Cosenza, 1912. Lavori di inalveamento del Crati e del Busento e collettori ripuari delle fognature di Cosenza. (Fotografo R. Gaudio, Archivio Bilotti, Casa delle Culture, Cosenza – 2012). .....	57

Figura 3-9. RegISTRAZIONI DEI PLUVIOGRAFI DI Cecita, Cosenza e Domanico.....	59
Figura 3-10. Pluviogrammi orari.....	59
Figura 3-11. Telegrammi inviati in Prefettura dagli stabilimenti Mancuso ferri e Tannini Calabria (Archivio di Stato di Cosenza).....	66
Figura 3-12. A sinistra: il largo F. Ili Bandiera (la Garruba) e via Giuseppe Marini Serra come si presentano dopo l'alluvione; a destra: il brigadiere Mazzuca davanti l'ufficio postale. ....	67
Figura 3-13. Via dei Martiri .....	67
Figura 3-14. Tratto di parapetto asportato dalla corrente in localit� Arenella .....	68
Figura 3-15. Le baracche di via Lungo Crati investite dalla piena .....	68
Figura 3-16. Vista planimetrica del tratto oggetto di studio (dal POR Calabria 2000-2006). ....	70
Figura 3-17. (a) Dettagli della griglia di calcolo con l'inserimento di briglie, edifici e ponti nel dominio computazionale. Le linee rosse rappresentano la posizione delle briglie (da Costabile e Macchione, 2015); particolare della griglia in corrispondenza degli argini, prima (b) e dopo (c) le operazioni di affinamento manuale della stessa.....	71
Figura 3-18. Codici identificativi per l'assegnazione automatica del coefficiente di Manning ad ogni cella di calcolo.....	73
Figura 3-19. Restituzione, mediante la classica rappresentazione di una mappa di pericolosit�, dei calcoli idraulici (estensione dell'area inondabile e massime altezze idriche simulate dal modello 2-D) In verde: parte del centro storico preso in esame per la messa a punto delle metodologie proposte nei capitoli successivi.....	74
Figura 4-1. Fasi del workflow proposto .....	78
Figura 4-2. I cinque LOD definiti da CityGML 2.0.....	79
Figura 4-3.(a) Nuvola di punti proveniente da rilievo LiDAR; (b) ingombri planimetrici degli edifici; (c) estrusione degli edifici a tetto piano.....	80
Figura 4-4. Proiezione di immagini fotografiche delle facciate sulle superfici degli edifici mediante tecnica di texture mapping .....	81
Figura 4-5. Metodologia generale per la generazione di un modello fotorealistico di edificio 3-D mediante texture mapping .....	81
Figura 4-6. ISTALLAZIONE DELL'ADD-ON IN Blender™ .....	85
Figura 4-7. Schema di nodi per la realizzazione del materiale assimilabile ad acqua mista a fango. ....	86
Figura 4-8. Visualizzazione di Google Earth 3D (a), mappa classica (b) ed immagine 3-D (c) per il quartiere Spirito Santo.....	88

Figura 4-9. Visualizzazione di Google Earth 3D (a), mappa classica (b) ed immagine 3-D (c) per Via dei Martiri.....	89
Figura 4-10. Punto di vista diverso della stessa strada rappresentata in Figura 4-9; visualizzazione di Google Earth 3D (a), mappa classica (b) ed immagine 3-D (c).....	90
Figura 4-11. Punto di vista diverso del quartiere Spirito Santo: confronto tra l'immagine di Google Earth 3D (a) e la vista 3-D (b).....	93
Figura 4-12. Dettaglio della visualizzazione 3-D lungo via dei Martiri (vedere l'estremità sinistra della Figura 4-9(a) e lo stesso dettaglio sulla classica mappa 4-9(b)).	95
Figura 4-13. Dettaglio della visualizzazione 3-D lungo via dei Martiri (vedere l'estremità destra della Figura 4-9(a) e lo stesso dettaglio sulla classica mappa 4-9(b)).	96
Figura 5-1. Posizione delle scansioni.....	104
Figura 5-2. Ricevitore GNSS Leica GS15 (a) e Laser scanner terrestre Leica ScanStation P20 (b) .....	105
Figura 5-3. Fasi operative della metodologia proposta.....	106
Figura 5-4. Vista 3-D del modello di punti dell'area oggetto di studio .....	107
Figura 5-5. Integrazione dei dati provenienti da LiDAR aereo con la nuvola dei punti acquisita con tecnica TLS .....	109
Figura 5-6. Esempio di modello digitale del terreno derivato da dati LIDAR aerei localmente integrato con dati provenienti dal rilievo TLS per la ricostruzione degli argini (a); .....	110
Figura 5-7. Esempio di rappresentazione 3-D di uno scenario di allagamento utilizzando i dati TLS (a); dettaglio della visualizzazione dell'interazione tra superficie idrica (in rosso) e facciata dell'edificio (b).....	112
Figura 5-8. File di potree in .html file visualizzato nel browser. ....	114

## Abstract

I fenomeni di allagamento di aree urbane rappresentano un problema molto attuale, poiché il numero di persone potenzialmente coinvolte ed il valore degli elementi a rischio, in termini economici, artistici e culturali, può essere notevole in larghe parti del territorio e delle aree urbanizzate. Nel contesto europeo, la Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo del 23 ottobre 2007, relativa alla valutazione e alla gestione del rischio alluvionale, prescrive di valutare il rischio attraverso studi di natura idraulica. In tale ambito, vi è l'esigenza di utilizzare strumenti predittivi e metodologie di analisi adeguati per la determinazione delle reali condizioni di rischio associate al realizzarsi di un determinato evento alluvionale. Uno studio di inondazione in area urbana, per essere di reale supporto per l'implementazione di adeguate misure di previsione e prevenzione, necessariamente deve coinvolgere una serie di aspetti che spaziano dall'acquisizione di dati topografici alla descrizione dei processi fenomenologici tipici del moto di una corrente in piena e della sua interazione con edifici e infrastrutture, agli algoritmi da utilizzare per la risoluzione delle equazioni del modello, alla restituzione dei risultati.

Questa notevole mole di lavoro deve necessariamente trovare il suo sbocco naturale nella rappresentazione finale dei risultati tramite prodotti grafici che la Direttiva vigente individua nelle mappe di pericolosità e di rischio.

Tuttavia la medesima Direttiva, richiama anche l'importanza della comunicazione del rischio, finalizzata al coinvolgimento dei diversi *stakeholders* e all'implementazione di una corretta gestione dell'emergenza. Vi è, dunque, una crescente necessità di presentare i risultati delle simulazioni idrauliche delle alluvioni in un formato che consenta una comprensione più immediata per i decisori finali e per la popolazione esposta.

A tale scopo, potrebbe essere di notevole ausilio l'uso di rappresentazioni tridimensionali di alluvioni attraverso scenari virtuali ad integrazione delle classiche mappe di pericolosità da inondazione. Esse consentirebbero un incremento enorme della comprensibilità dei risultati dei complessi calcoli idraulici che sono alla base della redazione delle mappe di pericolosità.

Per questo motivo, sarebbe auspicabile una competenza di base nelle tecniche di visualizzazione 3-D per la comunicazione del rischio idraulico per gli ingegneri idraulici che operano nel campo dell'analisi del rischio di alluvione. Questa tesi di Dottorato si inserisce proprio in tale contesto, e si articola in una proposta di criteri di rappresentazione di simulazioni idrauliche bidimensionali all'interno di un ambiente di realtà virtuale 3-D, con contenuti informativi diversi, destinati a differenti target di utenti, finalizzati ad una migliore comunicazione della pericolosità idraulica.

Si tratta dunque di restituire i risultati dei calcoli in immagini (e, in prospettiva, in video) che possano rappresentare, sotto forma di scenari virtuali, in maniera immediata le condizioni in cui si verrebbe a trovare un luogo nel corso di un'alluvione. Dovendo le immagini rappresentare visivamente le superfici idriche calcolate, necessariamente la procedura deve basarsi su modelli di calcolo che descrivano in maniera corretta i fenomeni idraulici che occorrono nelle correnti di piena. Escludendo l'uso delle equazioni di *Navier-Stokes*, poiché attualmente ancora troppo onerose per l'applicazione su aree vaste, occorre riferirsi alle equazioni complete delle acque basse, formulate in modo che possano correttamente rappresentare i fenomeni cui si è fatto cenno.

Per tale motivo, la tesi ha inizio con l'analisi della modellistica 2-D completa, basata sulle equazioni delle acque basse (*Shallow Water Equations, SWE*) formulate originariamente da *De Saint Venant*. Si focalizzerà l'attenzione sulla formulazione e sui metodi di integrazione numerica idonei per ottenere delle soluzioni in grado di inglobare correttamente anche i fenomeni locali presenti nella propagazione della corrente, anche con riferimento all'interazione con la topografia e i manufatti. Inoltre, saranno descritti tutti gli elementi necessari per la simulazione di un evento alluvionale, in particolare i criteri per la corretta rappresentazione della topografia e dei manufatti, la definizione delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno, la stima della scabrezza.

Il secondo capitolo analizzerà i concetti teorici e metodologici relativi alla mappatura della pericolosità e del rischio di alluvione, in relazione allo stato dell'arte, ai metodi e alle sperimentazioni presenti nella letteratura scientifica internazionale e, più dettagliatamente, in ambito europeo. Verranno, dunque illustrati i criteri idonei per ottemperare alla Direttiva 2007/60/EC, relativi alla redazione delle mappe di pericolosità e di rischio idraulico. Il capitolo è finalizzato a mettere in luce peculiarità e criticità delle prassi correnti, da utilizzare come riferimento per la realizzazione di strumenti intuitivi ed efficaci per la comunicazione del rischio. È stata inoltre condotta un'analisi sugli aspetti cartografici della mappatura del rischio di inondazione, mettendo in luce alcune peculiarità relative all'elaborazione e alla redazione delle mappe.

Dopo l'inquadramento generale operato dai capitoli precedenti, nel capitolo 3 si focalizzerà la proposta centrale di questa tesi di dottorato, con riferimento alla situazione Calabrese. La Regione Calabria, con le risorse POR Calabria 2000-2006 si è già dotata, per l'esecuzione degli studi sulle alluvioni, di "Metodologie di individuazione delle aree soggette a rischio idraulico di esondazione". Tali metodologie e le relative Linee Guida sono state elaborate dal Laboratorio di Modellistica numerica per la Protezione Idraulica del Territorio (da ora in avanti LaMPIT) dell'Università della

Calabria in collaborazione con il CUDAM (Università di Trento), con l'Università di Pavia e con l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS (Trieste).

Questa tesi, svolta all'interno del LaMPIT, vuole essere un ideale sviluppo di quelle Metodologie. Esse sono basate sulle SWE trattate secondo i metodi e gli accorgimenti che appartengono alle categorie descritte nel capitolo 2 e, pertanto, le soluzioni da esse ottenute sono compatibili per l'uso finalizzato a una corretta trasposizione in immagini. La presente tesi ha perciò preso in esame i risultati di un caso di studio sviluppato per la Regione Calabria. Tali risultati furono rappresentati nelle Linee Guida secondo i classici canoni delle mappe di pericolosità. Tuttavia, come già osservato, le potenzialità di simulazione dei dettagli fisici conseguibili con i modelli numerici utilizzati potrebbero consentire la restituzione di tali risultati in immagini virtuali.

Tra tutti i casi trattati nelle Linee Guida, si è voluto qui prendere in esame quello della mappa di pericolosità di inondazione del centro storico di Cosenza.

Cosenza è attraversata dai fiumi Crati e Busento, che confluiscono proprio all'interno del centro urbano. Nonostante la città sia stata preservata da alluvioni negli ultimi 60 anni, Cosenza ha storicamente subito molte volte le conseguenze delle esondazioni dei suoi fiumi. Per documentare questo, una parte del lavoro di questa tesi si è voluto dedicarla alla descrizione degli eventi storici ricavata da documenti consultabili presso l'Archivio di Stato, la Biblioteca Nazionale, la Biblioteca Civica di Cosenza e concentrando l'attenzione non solo sugli aspetti idrologici, ma anche sugli effetti idraulici e sull'uso del suolo. L'ultima alluvione si verificò il 24 novembre 1959 e benché esista una discreta documentazione fotografica della situazione post-evento, non si ha nessuna immagine della città con l'alluvione in corso di svolgimento. Pertanto solo alcuni anziani abitanti dei luoghi alluvionati ricordano gli scenari vissuti. Le nuove generazioni non sono consapevoli di quali sarebbero questi scenari se oggi si verificasse l'esondazione dei fiumi. In verità le classiche mappe non sono lo strumento più intuitivo per trasferire tale consapevolezza alla popolazione. È questo il motivo per il quale si è scelto di implementare la procedura di visualizzazione oggetto di questa tesi proprio per la città di Cosenza. Pertanto, il terzo capitolo dopo un excursus storico, ha analizzato la simulazione idraulica di un'ipotetica alluvione di progetto riferita a un tempo di ritorno di 500 anni.

Il quarto capitolo è incentrato sullo sviluppo di un *workflow* per rappresentare simulazioni idrauliche bidimensionali all'interno di un ambiente 3-D realizzato utilizzando la tecnica della *texture mapping*. Vengono discussi i risultati conseguiti, nonché le potenzialità di questo tipo di rappresentazione ai fini di un miglioramento della consapevolezza e della percezione del rischio da parte della popolazione, ai fini della preparazione e pianificazione dell'emergenza e supporto nella

stima del danno alluvionale. La procedura proposta è stata applicata per la visualizzazione di immagini virtuali relative al caso studio descritto nel capitolo precedente.

Il quinto capitolo propone un secondo prodotto di realtà virtuale realizzato utilizzando dati provenienti dal laser scanner terrestre. Sono descritte le campagne di acquisizione nonché le diverse fasi di gestione dei dati e di visualizzazione. Inoltre, si proporrà un ambiente interattivo, basato sulla tecnologia Web-GL, per la visualizzazione di scenari di inondazione utilizzando nuvole di punti di grandi dimensioni. Segue una discussione sulle potenzialità di questo prodotto ai fini del *disaster management*.

Il capitolo finale è dedicato alle conclusioni generali e alle prospettive future.

**Keywords:** comunicazione del rischio di alluvione, modellazione idraulica bidimensionale, mappatura della pericolosità idraulica, ambienti virtuali 3-D.

## **Pubblicazioni**

- De Santis, R., Costabile, P., Costanzo, C., Macchione, F. (2018) *Miglioramento della comunicazione del rischio idraulico mediante la visualizzazione 3-D delle mappe di pericolosità*. In: XXXVI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Ancona, September 12-14, 2018.
- De Santis, R., Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C. (2018) *A comparative analysis of 3-D representations of urban flood inundation in virtual environments for hazard communication purpose*. In: River Flow 2018 - Ninth International Conference on Fluvial Hydraulics. Lyon. E3S Web of Conferences, Vol. 40. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006037>.
- De Santis R., Macchione F., Costabile P., Costanzo C. (2019) *Visual Risk Communication of Urban Flooding in 3D Environments Based on Terrestrial Laser Scanning*. In: Mannina G. (eds) *New Trends in Urban Drainage Modelling*. UDM 2018. Green Energy and Technology. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99867-1\\_135](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99867-1_135).
- De Santis, R., Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C. (2019) *Terrestrial and Airborne Laser Scanning supporting the 3-D visual risk communication of urban flooding: current opportunities and future perspectives*. *In preparation*.
- Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C., De Santis, R. (2016). *La visualizzazione scientifica applicata al rischio di alluvione*. In: *Tecniche per la Difesa dall’Inquinamento*, Vol. XXXVII (pp. 13-22). ISSN 2282-5517.
- Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C., De Santis, R. (2017). *La ricostruzione virtuale dell’evento*. In: *Atti del Seminario “L’alluvione di Cosenza del 1959”*, 21 dicembre 2017. <http://www.ingegneriacivile.unical.it/blog/l-alluvione-di-cosenza-del-1959/>.
- Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C., De Santis, R. (2018). *Fully-hydrodynamic modelling supporting flood hazard assessment and communication: a reference framework*. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Special Issue 1 (pp. 121-141). <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2018-01.S-10>.
- Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C., De Santis, R. (2018). *Rappresentazione tridimensionale di alluvioni attraverso scenari virtuali*. In: *Tecniche per la Difesa del Suolo e dall’Inquinamento*, Vol. XXXIX (pp. 429 – 444). ISSN 2282 - 5517.
- Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C., De Santis, R. (2019) *Moving to 3-D flood hazard maps for enhancing risk communication*. *Environmental Modelling & Software* 111, 510-522. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.11.005>

## Capitolo 1 - Metodi per la valutazione quantitativa del rischio idraulico

### 1. Introduzione

I fenomeni di allagamento di aree urbane rappresentano un problema molto attuale nell'ambito protezione idraulica del territorio, in quanto il numero di persone potenzialmente coinvolte e il valore degli elementi a rischio, in termini economici, artistici e culturali, può essere notevole. Di conseguenza, vi è l'esigenza di dotarsi di adeguati strumenti predittivi, metodologie di analisi e ambienti di visualizzazione dei risultati in grado di trasferire ai portatori di interesse informazioni locali dettagliate, oltre che una piena consapevolezza, sulle condizioni di reale pericolosità associate al realizzarsi di un determinato evento alluvionale sul territorio.

Uno studio di inondazione in area urbana, di reale supporto per l'implementazione di adeguate misure di previsione e prevenzione, necessariamente coinvolge una serie di aspetti che spaziano dall'acquisizione di dati e la relativa rappresentazione topografica, alla descrizione dei processi fenomenologici tipici del moto di una corrente in piena, agli algoritmi da utilizzare per la risoluzione delle equazioni del modello, realizzati secondo impostazioni sequenziali o parallele, alla rappresentazione finale dei risultati tale da fornire ai pianificatori e ai portatori di interesse una effettiva e chiara percezione dell'entità del fenomeno.

Dovendo restituire i risultati dei calcoli in immagini (e, in prospettiva, in video) che possano rappresentare, sotto forma di scenari virtuali, in maniera immediata le condizioni in cui si verrebbe a trovare un luogo nel corso di un'alluvione, necessariamente la procedura deve basarsi su modelli di calcolo che descrivano in maniera corretta i fenomeni idraulici che occorrono nelle correnti di piena. Escludendo l'uso delle equazioni di *Navier-Stokes*, poiché attualmente ancora troppo onerose per l'applicazione su aree vaste, occorre riferirsi alle equazioni complete delle acque basse, formulate in modo che possano correttamente rappresentare i fenomeni cui si è fatto cenno.

Per tale motivo, in questo capitolo si analizzerà la modellistica 2-D completa, basata sulle equazioni delle acque basse (*Shallow Water Equations*, SWE) formulate originariamente da *De Saint Venant*. Nell'idraulica computazionale i fenomeni di propagazione di un'onda di piena vengono descritti per mezzo di equazioni differenziali alle derivate parziali (*PDEs*). Esse vengono risolte numericamente attraverso diversi metodi, tra cui il Metodo delle Differenze Finite (FDM), il Metodo degli Elementi Finiti (FEM), il Metodo dei Volumi Finiti (FVM).

Negli ultimi decenni lo sviluppo della modellistica numerica delle alluvioni è stato incentivato dall'incremento della potenza di calcolo e dalle nuove tecniche di rilevazione topografica,

divenendo uno strumento applicabile anche in ambito tecnico per la perimetrazione delle aree inondabili. Inoltre, grazie agli schemi *shock-capturing* si riescono facilmente a trattare fenomeni di discontinuità e cambiamenti di regime all'interno del dominio di calcolo, la cui tenuta in conto è molto importante nel valutare realisticamente la variabilità spazio-temporale dei parametri di pericolosità all'interno dell'area inondata. Infatti le informazioni sulla propagazione della corrente, sulle altezze idriche e sulle velocità e sulla rapidità con cui i livelli idrici aumentano sono molto importanti per la gestione dell'emergenza, ai fini dell'evacuazione e per la stima delle potenziali perdite di vite umane (Jonkman et al., 2008; Xia et al., 2011; Gómez et al., 2011; Russo et al., 2013).

La vastità del tema richiederebbe un'ampia trattazione che non può trovare spazio in questo studio. Pertanto, il presente capitolo illustra le caratteristiche della modellistica 2-D completa, basata sulle equazioni delle acque basse formulate da *De Saint Vénant*, e le sue forme semplificative che spesso sono utilizzate per l'analisi delle alluvioni.

Infine si descriveranno tutti gli elementi necessari per la simulazione di un evento alluvionale, in particolare i criteri per la corretta rappresentazione della topografia e dei manufatti, la definizione delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno, la stima della scabrezza.

### **2. Formulazione delle equazioni di *De Saint Vénant* per la simulazione delle piene**

Nella corrente prassi tecnico-scientifica il moto vario di una corrente a superficie libera che si propaga in alvei naturali o in aree inondabili è descritto mediante le equazioni delle acque basse (*Shallow Water Equations, SWEs*) talvolta indicate come *fully dynamic wave equations*. Spesso le equazioni sono semplificate ricorrendo ad approssimazioni diffusive e cinematiche (*diffusive and kinematic wave modelling*). Le *Shallow Water Equations* sono un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali non lineari di tipo iperbolico, che sono ricavate mediante ipotesi semplificative, enunciate da De Saint Vénant (Cunge et al., 1980):

- la distribuzione della velocità in una sezione trasversale ortogonale alla direzione del moto è rappresentabile in termini di velocità media;
- la corrente è monodimensionale, monofase ed incomprimibile con densità costante;
- la corrente è gradualmente variata (distribuzione idrostatica della pressione);
- gli effetti della resistenza del contorno e della turbolenza possono essere descritti mediante leggi di resistenza analoghe a quelle impiegate per moto stazionario;
- la pendenza del fondo alveo è piccola.

Vi sono molti testi classici di riferimento per lo studio delle equazioni del moto vario in canali a pelo libero (si vedano ad esempio Stoker (1957), Abbot (1979), Cunge et al. (1980), etc). Le equazioni bidimensionali possono ottenersi estendendo alla seconda dimensione spaziale le classiche equazioni di *De Saint Venant* monodimensionali, oppure a partire dalle equazioni di *Navier-Stokes*, mediando i valori lungo la dimensione verticale ed assumendo che la lunghezza d'onda del fenomeno sia molto superiore alla profondità dell'acqua dove il fenomeno avviene.

Fino a qualche decennio fa, le SWEs venivano utilizzate secondo una schematizzazione monodimensionale. Tuttavia, la schematizzazione 1-D presenta delle limitazioni intrinseche che non sempre la rendono adeguata per la simulazione di fenomeni che avvengono fuori alveo. Pertanto, oggi è consuetudine utilizzare le SWEs nella schematizzazione bidimensionale, sebbene l'approccio 1-D rimanga competitiva, in termini di oneri computazionali, per la propagazione delle piene in tratti fluviali montani. Il sistema di equazioni che descrive i fenomeni di propagazione di una corrente a pelo libero, nella sua formulazione bidimensionale, è costituito da un'equazione di conservazione del volume (1) e da due equazioni di conservazione della quantità di moto nelle direzioni x (2) e y (3):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{1}{2}g \frac{\partial h^2}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{1}{2}g \frac{\partial h^2}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (3)$$

in cui:

$t$  è il tempo;  $x, y$  sono le coordinate spaziali;  $h$  è profondità della corrente;  $u, v$  sono le velocità medie della corrente in direzione  $x$  e  $y$ ;  $g$  è l'accelerazione di gravità;  $S_{0x}, S_{0y}$  sono le pendenze del fondo in direzione  $x$  e  $y$  pari a  $-\partial z/\partial x$  e  $-\partial z/\partial y$ ;  $S_{fx}, S_{fy}$  sono i termini di resistenza al fondo rispettivamente lungo  $x$  e  $y$  espressi dalle equazioni:  $S_{fx} = \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{K_s^2 h^{4/3}}$ ;  $S_{fy} = \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{K_s^2 h^{4/3}}$  con  $K_s$  coefficiente di scabrezza al fondo di *Strickler*. In forma vettoriale, il sistema costituito dalle (1), (2) e (3) si esprime come:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (4)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}; \mathbf{F} = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2 / 2 \\ huv \end{pmatrix}; \mathbf{G} = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + gh^2 / 2 \end{pmatrix}; \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Le equazioni così scritte sono usualmente note come equazioni in forma conservativa, in quanto strettamente rappresentative di leggi di conservazione. Il sistema può essere riscritto in forma integrale come:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \mathbf{U} dV = - \iint_{\Omega} \mathbf{n} \cdot \mathbf{F}(\mathbf{U}) d\Omega + \iiint_V S(\mathbf{U}) dV \quad (6)$$

In cui  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{F}(\mathbf{U})$  è la componente normale del flusso attraverso la superficie  $\Omega$  racchiudente il volume  $V$ . La forma integrale ammette la presenza di discontinuità nella soluzione, diversamente da quella differenziale.

### 3. Breve rassegna dei metodi numerici e dei principali codici di calcolo utilizzati per l'integrazione delle *Shallow Water Equations*

I metodi di discretizzazione consentono di approssimare le equazioni differenziali in un sistema di equazioni algebriche, le cui variabili sono valutate in locazioni discrete nello spazio e nel tempo. Le equazioni algebriche sono risolte con riferimento ai valori nodali di una griglia. Dunque, considerando l'errore commesso con il troncamento delle derivate spaziali e temporali delle variabili, una soluzione più accurata può ottenersi infittendo ragionevolmente la griglia di calcolo. L'implementazione di un metodo numerico richiede:

la scelta del livello di approssimazione del problema fisico da risolvere, che dipende dall'accuratezza richiesta e dagli strumenti per ottenerla;

- la scelta del metodo di discretizzazione del modello matematico che, a sua volta, interessa la discretizzazione spaziale e il modello di discretizzazione.

La discretizzazione spaziale consiste nel fissare una griglia di calcolo in cui lo spazio continuo è sostituito da un numero finito di punti o celle dove le principali grandezze idrauliche incognite sono calcolate. L'accuratezza dell'approssimazione numerica dipenderà dall'errore della simulazione numerica, che tende a zero quando le dimensioni delle celle tendono a zero e la rapidità di questa variazione dipende dall'ordine della discretizzazione numerica delle equazioni, ma anche dalla forma delle celle. In tale contesto, si inserisce il problema della generazione della griglia. Su tale specifico argomento si rimanda ai paragrafi successivi.

I principali metodi che integrano numericamente le equazioni del moto vario nei canali a pelo libero, ricadono, per ciò che riguarda la discretizzazione spaziale, nelle seguenti tre categorie: *metodi alle differenze finite*, *metodi agli elementi finiti* e *metodi ai volumi finiti*.

I *metodi alle differenze finite* sono quelli più utilizzati in letteratura (CADAM, 1998; Aureli et al., 2000; Macchione & Morelli, 2003), in quanto semplici e di facile implementazione su griglia strutturata e prevalentemente per schemi monodimensionali.

I *metodi agli elementi finiti* si basano sulla trasformazione delle equazioni del moto, che vengono moltiplicate per una funzione peso prima di essere integrate sull'intero dominio. In tal modo, possono adattarsi a geometrie arbitrarie, ma risultano difficili da implementare su griglie di calcolo non strutturate.

Attualmente, i *metodi ai volumi finiti* sono quelli maggiormente utilizzati per l'integrare le equazioni del moto vario in forma integrale. I problemi di dam-break nei corsi d'acqua naturali caratterizzati da domini a topografia irregolare e da discontinuità della superficie libera ne hanno favorito l'utilizzo. In letteratura si ritrovano diversi risolutori approssimati di *Riemann* (Roe, 1981; Harten, 1983; Van Leer, 1997), applicati poi allo studio delle correnti a superficie libera da Alcrudo & García Navarro (1994) e Valiani et al. (2002).

Il dominio in esame è suddiviso in un insieme di celle o volumi di controllo contigui su cui vengono integrate le equazioni del modello. In corrispondenza del centroide di ciascun volume di controllo si identifica il *nodo* su cui si calcola il valore della variabile incognita. Tali metodi sono applicabili a qualunque tipo di griglia, pertanto risulta flessibile nell'ambito di problemi con geometria complessa. Partendo da una formulazione integrale, riesce a rispettare la conservazione della massa e a trattare le discontinuità. Inoltre, esso permette l'introduzione di semplici condizioni al contorno come la presenza di *solid wall*, attraverso cui il flusso è nullo. La sua attuale applicazione all'idrodinamica coinvolge schemi del tipo *Godunov*, schemi approssimati del problema di *Riemann* e schemi centrati come quello di *MacCormack* di tipo bidimensionale.

L'integrazione numerica delle equazioni discretizzate può essere di tipo esplicito - al passo temporale successivo  $n+1$  per la discretizzazione spaziale si usano le variabili note calcolate al tempo  $n$  - o implicito - si utilizzano anche le variabili incognite dello stesso tempo  $n+1$  -. Analisi dettagliate sugli schemi sono in Toro (2001) e Leveque (2002).

#### 4. La simulazione delle alluvioni: il metodo ai volumi finiti applicato alle *Shallow Water Equations*

Il metodo ai volumi finiti, applicato all'idrodinamica, è basato sulla formulazione integrale delle equazioni bidimensionali delle acque basse su un dominio volumetrico  $\Omega_{i,j}$ :

$$\int_{\Omega_{i,j}} \left( \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} \right) = \int_{\Omega_{i,j}} S d\Omega \quad (7)$$

Nel caso bidimensionale, nel metodo ai volumi finiti il dominio di calcolo è costituito da volumi di controllo assimilabili a superfici racchiuse da un contorno. La cella di calcolo  $(i,j)$  quadrangolare è costituita da quattro lati di lunghezza  $\Delta L_r$  ( $r=1,\dots,4$ ). Applicato il teorema di *Green* al sistema (7) si ottiene l'integrale di superficie (8):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_{i,j}} \mathbf{U} d\Omega + \oint_{\partial\Omega_{i,j}} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dL = \int_{\Omega_{i,j}} S d\Omega \quad (8)$$

In cui  $\partial\Omega_{i,j}$  è il contorno che racchiude  $\Omega_{i,j}$ ,  $\mathbf{F} = [\mathbf{f}, \mathbf{g}]$ ,  $\mathbf{n}$  è il vettore normale unitario. L'equazione (8) può essere discretizzata come:

$$\mathbf{U}_{i,j}^{n+1} = \mathbf{U}_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Omega_{i,j}} \sum_{r=1}^4 \mathbf{F}_r \cdot \mathbf{n}_r \Delta L_r + \Delta t S_{i,j}^n \quad (9)$$

In cui  $\mathbf{U}_{i,j}$  il valore medio delle variabili dipendenti sul volume di controllo  $\Omega_{i,j}$  ad un dato istante di tempo. Occorre prestare attenzione al flusso numerico attraverso i lati della cella: a seconda dell'espressione utilizzata per questo termine si distinguono i diversi schemi numerici.

Gli schemi ai volumi finiti presenti in letteratura sono di due tipi:

- schemi di tipo *upwind*, in cui le celle di calcolo sono scelte conformemente alla propagazione delle perturbazioni;
- schemi di tipo centrale, caratterizzati da una discretizzazione del flusso di tipo centrale attraverso un lato della cella. Uno degli schemi centrati più diffuso è lo schema di *MacCormack*, già sviluppato per il metodo delle differenze finite e introdotto nello studio dei volumi finiti da Alcrudo & García Navarro (1994).

In particolare, gli schemi *upwind* si differenziano in metodi *flux vector splitting* e in *flux difference splitting*. I primi discretizzano i flussi in base al segno delle velocità di propagazione; i secondi, più usati, valutano i flussi convettivi in corrispondenza dell'interfaccia del volume di controllo attraverso la soluzione del problema di *Riemann*. Tali schemi possono essere caratterizzati, come proposto da *Godunov*, da variabili costanti per l'intera cella e da flussi calcolati come soluzione del

problema di *Riemann*. A tal proposito, sono stati sviluppati risolutori da Osher et al. (1982) e da Roe (1981). Lo schema di *Roe* è molto utilizzato poiché può fornire soluzioni molto accurate anche in presenza di onde di *shock*. Lo schema di *Roe* è basato sulla soluzione del sistema in forma non conservativa:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}(\mathbf{U}) \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

che può essere diagonalizzata per ottenere

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} + \Lambda \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x} = \mathbf{P}^{-1} \mathcal{S} \quad (11)$$

dove si è indicato con  $\partial \mathbf{W} = \mathbf{P}^{-1} \partial \mathbf{U}$  e  $\Lambda = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P}$ , con  $\mathbf{P}$  e  $\mathbf{P}^{-1}$  matrici di trasformazione. Gli autovalori di  $\mathbf{A}$  rappresentano la celerità di propagazione delle perturbazioni. Lo schema *upwind* utilizzato per risolvere il sistema di equazioni di partenza richiede una linearizzazione locale del sistema nelle interfacce che separano le celle di calcolo. Questa approssimazione fu sviluppata per prima da *Roe* (1981). Si definisce una matrice approssimata  $\tilde{\mathbf{A}}_{i+1/2}$  per la coppia di punti  $(i, i+1)$  della maglia che soddisfa le seguenti proprietà:

- $\tilde{\mathbf{A}}_{i+1/2} = \tilde{\mathbf{A}}_{i+1/2}(\mathbf{U}_{i+1}, \mathbf{U}_i)$
- $\delta \mathbf{F}_{i+1/2} = \tilde{\mathbf{A}}_{i+1/2} \cdot \delta \mathbf{U}_{i+1/2}$
- $\tilde{\mathbf{A}}_{i+1/2}$  ha valori reali e distinti
- $\tilde{\mathbf{A}}_{i+1/2}(\mathbf{U}_i, \mathbf{U}_i) = \mathbf{A}(\mathbf{U}_i)$ .

*Glaister* (1988) propose di calcolare  $\tilde{\mathbf{A}}_{i+1/2}$  come la matrice jacobiana del flusso esatto calcolata in un punto medio  $\tilde{\mathbf{U}}_{i+1/2}$  che è determinato per alveo rettangolare,  $\mathbf{A}(\tilde{\mathbf{U}}_{i+1/2})$ . Quest'ultima matrice ha autovalori e autovettori del tipo:

$$\tilde{a}_{i+1/2}^{1,2} = \tilde{u}_{i+1/2}^{1,2} \pm \tilde{c}_{i+1/2}^{1,2} \quad \tilde{e}_{i+1/2}^{1,2} = \begin{pmatrix} 1 \\ \tilde{a}_{i+1/2}^{1,2} \end{pmatrix}$$

Con  $\tilde{c}_{i+1/2}^{1,2} = \sqrt{g \left( \frac{A_{i+1} + A_i}{b_{i+1} + b_i} \right)}$  e  $\tilde{u}_{i+1/2}^{1,2} = \frac{\sqrt{h_{i+1}} \cdot u_{i+1} + \sqrt{h_i} \cdot u_i}{\sqrt{h_{i+1}} + \sqrt{h_i}}$

La matrice  $\tilde{\mathbf{A}}_{i+1/2}$  può essere diagonalizzata con la trasformazione:

$$\Lambda_{i+1/2} = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{i+1/2}^1 & 0 \\ 0 & \tilde{a}_{i+1/2}^2 \end{pmatrix}.$$

La discretizzazione *upwind* conservativa del primo ordine si può allora estendere formalmente al sistema di equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto ottenendo:

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (F_i^+ - F_{i-1}^+) - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (F_{i+1}^- - F_i^-) \quad (12)$$

Il flusso numerico corrispondente allo schema *upwind* del primo ordine per il sistema considerato è:

$$F_{i+\frac{1}{2}}^* = \frac{1}{2} (F_{i+1} + F_i) - \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1,2} |\tilde{a}_{i+\frac{1}{2}}^k| \cdot \alpha_{i+\frac{1}{2}}^k \cdot \tilde{e}_{i+\frac{1}{2}}^k$$

Se i punti (i, i+1) sono agli estremi di una discontinuità che si propaga con velocità  $v_s$ , per la relazione di *Rankine - Hugoniot*, si ha:

$$\delta \mathbf{F}_{i+\frac{1}{2}} = v_s \cdot \delta \mathbf{U}_{i+\frac{1}{2}} = \mathbf{A}_{i+\frac{1}{2}} \cdot \delta \mathbf{U}_{i+\frac{1}{2}}$$

Dunque,  $v_s$  è un autovalore di  $\mathbf{A}_{i+\frac{1}{2}}$  e  $\delta \mathbf{U}_{i+\frac{1}{2}}$  l'autovettore corrispondente, per cui  $\mathbf{A}_{i+\frac{1}{2}}$  tiene conto delle discontinuità. Nel caso in cui l'informazione si propaga nella stessa direzione e la funzione del flusso diventa:

$$\begin{cases} F_{i+\frac{1}{2}}^* = F_i & \text{per } v_s > 0 \\ F_{i+\frac{1}{2}}^* = F_{i+1} & \text{per } v_s < 0 \end{cases}$$

All'interfaccia tra le celle  $i$  e  $i+1$  la (12) diventa:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_{i+\frac{1}{2}} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

La (13) riconosce le onde di *shock*, ma non quelle di rarefazione. Se è presente una discontinuità nei punti della maglia (i, i+1), si calcola la grandezza  $\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}^k$  che è pari a zero se nella cella (i,i+1) si produca uno *shock*:

$$\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}^k = \max \left[ 0, \left( \tilde{a}_{i+\frac{1}{2}}^k - \tilde{a}_i^k \right), \left( \tilde{a}_{i+1}^k - \tilde{a}_{i+\frac{1}{2}}^k \right) \right] \quad k=1,2$$

Quindi, si definisce il valore corretto del modulo di  $\tilde{a}_{i+\frac{1}{2}}^k$ :

$$\Psi_{i+\frac{1}{2}}^k = \begin{cases} \left| \tilde{a}_{i+\frac{1}{2}}^k \right| & \text{se } \left| \tilde{a}_{i+\frac{1}{2}}^k \right| \geq \tilde{e}_{i+\frac{1}{2}}^k \\ \tilde{e}_{i+\frac{1}{2}}^k & \text{se } \left| \tilde{a}_{i+\frac{1}{2}}^k \right| < \tilde{e}_{i+\frac{1}{2}}^k \end{cases}$$

#### 4.1. La rappresentazione topografica del terreno e dei manufatti

Negli studi di propagazione delle piene la corretta rappresentazione topografica dell'area di interesse è estremamente importante. L'andamento altimetrico del terreno entra nelle equazioni del moto mediante i termini legati alla pendenza della superficie nelle due direzioni spaziali.

L'uso delle equazioni complete è oggi ancor più giustificato dalla disponibilità di dati topografici ad alta risoluzione ottenibili con le nuove tecniche di rilevazione. Negli ultimi anni, infatti, alle tradizionali tecniche di modellazione assistita e di rilievo del territorio si è affiancata la metodologia semi-automatica di rilievo ad alta risoluzione LiDAR (*Light Detection and Ranging*). In relazione al tipo di applicazione, l'impianto di acquisizione può essere aviotrasportato (*Aerial Laser Scanner, ALS*), terrestre (*Terrestrial Laser Scanner, TLS*) o montato su un apparato di rilevamento dinamico terrestre (*Mobile Terrestrial Laser Scanner, MTLs*). La frequenza del campionamento è tale da consentire di acquisire un cospicuo numero di punti per unità di superficie che, in rapporto alla scala del rilievo, consente un campo di applicazioni estremamente ampio: rilievo architettonico (Remondino & Rizzi, 2010), monitoraggio dei dissesti idrogeologici (Mora et al., 2018; Shi et al., 2018; Mahalingam & Olsen, 2016;) erosione costiera (Obu et al., 2017; Mitchell et al., 2013), modellazione idraulica (Shen et al., 2015; Teng et al., 2015; Costabile & Macchione, 2015).

Per quanto riguarda la modellistica idraulica, negli ultimi anni l'uso della tecnologia LiDAR ha permesso di utilizzare sempre più diffusamente la modellazione bidimensionale per la simulazione di inondazioni in aree urbane (Courty et al., 2017; Pedrozo-Acuña et al., 2017; Thomas Steven Savage et al., 2016; Yin et al., 2016; Costabile & Macchione, 2015; Costabile et al. 2015a; Costabile et al. 2015b) consentendo di condurre, potenzialmente, l'analisi del rischio inondazione a scala di edificio (Schubert & Sanders, 2012). Ormai è prassi consolidata l'utilizzo di laser aviotrasportabili in grado di restituire il valore di elevazione sul livello del mare di ogni elemento scansionato sulla superficie della terra. Tali sistemi possono fornire dati con accuratezza molto elevata: ad esempio, per quote di volo di 300-1200 m, l'accuratezza della quota della superficie topografica è sempre inferiore ai 15 cm, mentre quella planimetrica è dell'ordine del decimetro. I dati grezzi sono costituiti da una nuvola di punti disposti irregolarmente sul territorio, di cui sono note le coordinate, la quota e l'intensità di riflessione. I principali prodotti che si ottengono dall'elaborazione di questi punti sono il DTM (*Digital Terrain Model*) e il DSM (*Digital Surface Model*). In particolare, il DSM viene ottenuto dai dati puntuali  $x, y, z$  *first pulse*, relativi alla rappresentazione tridimensionale delle superfici riflettenti (suolo, vegetazione, edifici, etc.), mentre

il DTM viene ottenuto dai dati puntuali *last pulse*, della sola superficie fisica del suolo. Il DTM è la base di partenza per ottenere domini computazionali affidabili e il tipo di griglia da utilizzare in un modello bidimensionale gioca un ruolo non secondario nella simulazione di un evento di piena e, generalmente, è necessario disporre di domini di calcolo con regioni a risoluzione diversa, al fine di minimizzare gli errori numerici e massimizzare le performance computazionali (Kim et al., 2014).

Un aspetto limitante nell'uso di rilievi LiDAR aerei, risiede nella difficoltà di individuare la batimetria in zone densamente alberate, sotto strutture urbane come sottopassi e ponti ed entità urbane di dimensioni modeste, come marciapiedi, vicoli stretti, archi, che possono deviare in modo non trascurabile le correnti poco profonde lungo strade, cortili ed in prossimità degli edifici.

In presenza di caratteristiche topografiche complesse, diversi studi presenti in letteratura (de Almeida et al., 2018; Papaioannou et al., 2017; Papaioannou et al. 2016; Thatcher et al., 2016; Sampson et al., 2012; Fewtrell et al., 2011; Meesuk et al., 2017; Bolkas et al., 2016; Leitão et al., 2016; Shaad et al., 2016; Meesuk et al., 2015; Ozdemir et al., 2013; Costabile & Macchione, 2015) suggeriscono un'integrazione dei dati acquisiti con Laser Scanner aereo con dati provenienti da rilievi laser terrestri (TLS), per la costruzione di DTM alta risoluzione da utilizzare nella modellistica 2D. Si ottiene così una rappresentazione più realistica della dinamica dell'allagamento, influenzando nella mappatura della pericolosità idraulica. Tale aspetto verrà affrontato in maniera più dettagliata nei prossimi capitoli.

La qualità del DTM può influire significativamente sulla risposta dei modelli di inondazione, pertanto in letteratura (Sanders, 2007, Casas et al., 2007, Fewtrell et al., 2011) si cerca di capire quale sia il giusto compromesso tra i possibili vantaggi derivanti dall'uso di dati ad alta risoluzione e la loro gestione in termini di *effort* computazionale. Comunque, occorre sottolineare che (Costabile et al., 2011):

- l'area inondata diminuisce al crescere della risoluzione spaziale e dell'accuratezza verticale del dato topografico di partenza;
- l'accurata descrizione del corso d'acqua è di fondamentale importanza; i calcoli idraulici 2-D perdono di attendibilità se il canale principale non è descritto da almeno tre punti: uno rappresentante il *thalweg* e gli altri due relativi alle quote arginali in destra e in sinistra idraulica. Come conseguenza, se la larghezza del corso d'acqua è inferiore al doppio della risoluzione del DEM il risultato del calcolo deve essere preso con cautela in quanto i modelli tendono a sovrastimare l'estensione dell'area inondata e ad aumentare la velocità

della corrente. È buona norma quindi effettuare sopralluoghi ad hoc nelle situazioni in cui il DEM di partenza non possenga le suddette informazioni;

- molti dati topografici, compresi quelli provenienti dai LIDAR, non includono i dettagli batimetrici del canale di magra del corso d'acqua; come conseguenza, la batimetria del fondo del corso d'acqua non viene descritta adeguatamente in fase di costruzione del DEM. È stato visto che l'aggiunta di informazioni di dettaglio relative alla topografia del fondo alveo comporta una riduzione dell'area inondata;
- la qualità del DEM da utilizzare opportunamente per studi di perimetrazione idraulica può dipendere anche dal tempo di ritorno  $T$  dell'evento che si intende analizzare; ad esempio, le piene ordinarie ( $T=10$  anni) richiedono un DEM a maggiore risoluzione di quelle delle piene eccezionali ( $T=100-500$  anni) o quelle causate da rottura di sbarramenti. Ciò è dovuto al fatto che le piene ordinarie sono spesso contenute in alveo e quindi è necessaria un'elevata risoluzione spaziale per la descrizione topografica di quest'ultimo.

Pertanto, in funzione del fenomeno idraulico studiato, si deve stabilire il tipo di griglia da utilizzare e l'opportuna risoluzione delle celle della griglia e valutare l'influenza di quest'ultima sui risultati dei calcoli.

La costruzione del dominio computazionale (*mesh generation*) è un processo di discretizzazione che associa una variabile del processo fisico ad un punto del dominio. Nell'applicazione di un metodo numerico, come quello dei volumi finiti, si possono utilizzare griglie strutturate e non strutturate.

In una *griglia strutturata* i nodi della griglia vengono generati dall'intersezione di due famiglie di linee appartenenti a determinati sistemi di coordinate cartesiane o curvilinee. In griglie di questo tipo la numerazione dei nodi appartenenti a ciascun elemento può essere ottenuta attraverso semplici operazioni algebriche (Figura 1-1).

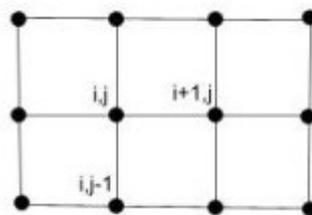


Figura 1-1 Esempio di griglia strutturata

Questo tipo di griglie presenta una topologia regolare che consente di attribuire consecutivamente una numerazione ordinata agli elementi del dominio: ciò induce un notevole grado di semplicità

nella programmazione per via della immediata individuazione automatica della generica cella del dominio di calcolo e di quelle ad essa confinanti. Per configurazioni geometriche molto complesse un notevole grado di flessibilità e adattabilità al dominio oggetto di studio è garantito dalle griglie non strutturate. Esse permettono di avere un infittimento della griglia in parti del dominio reale in cui ci si aspettano i cambiamenti maggiori dei gradienti delle grandezze idrodinamiche, (ad esempio, in presenza di onde a fronte ripido o di risalti idraulici, la griglia può essere opportunamente infittita in modo da assicurare soluzioni localmente più accurate). Gli elementi di questo tipo di griglie vanno opportunamente individuati mediante una corretta numerazione delle celle e dei corrispondenti vertici, in modo da produrre sia informazioni geometriche sulla *mesh* sia informazioni sulla connettività dei nodi. A tal proposito si utilizza una matrice di connettività (Figura 1-2). Da un punto di vista computazionale, l'uso di una griglia non strutturata comporta un maggiore utilizzo di memoria rispetto alle griglie strutturate, dovendo memorizzare la matrice delle connettività e una minore efficienza a causa degli indirizzamenti indiretti. Gli approcci di base maggiormente utilizzati per la generazione di griglie non strutturate sono essenzialmente la triangolazione di *Delaunay* e il metodo di Avanzamento del Fronte (*Advancing Front*).

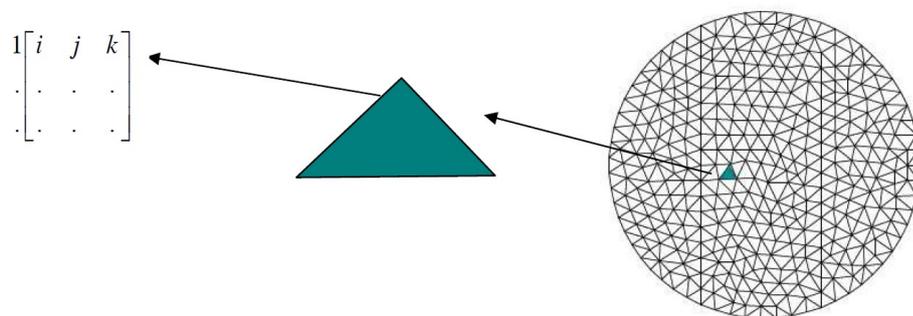


Figura 1-2. Esempio di griglia non strutturata a maglia triangolare

Altro aspetto da considerare è la rappresentazione dei manufatti. Per quanto riguarda gli edifici, essi possono essere trattati come contorni interni del dominio di calcolo, in modo che essi coincidano con i lati delle celle adiacenti. Le celle occupate dagli edifici non sono incluse nel calcolo computazionale, mentre per il calcolo nelle celle confinanti dei flussi di interfaccia, vengono imposti in esse gli stessi valori dei tiranti delle celle interne e le stesse intensità delle velocità normali alla parete, ma col segno opposto, in modo da garantire l'annullamento della componente della velocità normale alla parete. Inoltre, all'interno delle celle occupate da edifici, è prassi porre la componente della velocità tangenziale alla parete uguale a quella della cella interna

adiacente. Su tali lati devono essere imposte le opportune condizioni al contorno, che sono le tipiche condizioni che vengono poste in presenza di parete verticale.

Nelle aree rurali, invece, gli edifici distanti dal corso d'acqua possono essere trattate assegnando alla zona occupata dal tessuto urbano un valore più elevato del coefficiente di scabrezza. Il limite di questo approccio risiede nell'inadeguatezza di rappresentazione dei fenomeni locali che avvengono tra gli edifici, ottenendo valori locali delle velocità e dei tiranti diversi da quelli che in realtà si verificano. Inoltre, non è adatto alla rappresentazione di dettaglio dell'evoluzione spazio-temporale del fenomeno di inondazione. Può invece essere utile per tener conto della presenza di zone urbanizzate all'interno di un dominio più vasto, al fine di non appesantire troppo l'onere del calcolo. Nel capitolo dedicato alla descrizione del caso di studio, si forniranno maggiori dettagli applicativi riguardo la tecnica di rilevazione a scansione laser e la costruzione del dominio di calcolo.

### 4.2. Le condizioni iniziali

Le equazioni bidimensionali del moto vario descrivono l'evoluzione spazio-temporale delle grandezze idrodinamiche lungo le due direzioni  $x$  e  $y$ , componenti del vettore  $\mathbf{U}(x, y, t)$ . Nei sistemi con variabili dipendenti dal tempo, si definisce il valore spaziale delle grandezze idrodinamiche al tempo iniziale:  $\mathbf{U}(x, y, t=t_0)$ .

### 4.3. Le condizioni al contorno

Per i problemi descritti da equazioni di tipo iperbolico, occorre imporre una o più condizioni contorno sul dominio considerato. Nei domini bidimensionali si possono fissare:

- condizioni al contorno di monte o di ingresso (*inflow boundary condition*);
- condizioni al contorno di valle o di uscita (*outflow boundary condition*);
- condizioni specifiche sulla restante parte del contorno, spesso assimilabile ad un contorno solido (*solid boundary conditions*).

Le prime due appartengono ai contorni aperti (*open boundary*) con superfici in contatto con il fluido, la terza è indicata come contorno chiuso (*wall boundary*) con contorni fisici impermeabili alla corrente. Le condizioni al contorno da fissare possono essere di tipo fisico, quando l'informazione della perturbazione si propaga dall'esterno verso l'interno del dominio, e di tipo numerico, se la perturbazione si propaga dall'interno del dominio verso l'esterno. Il numero di condizioni di tipo fisico da imporre sui contorni è funzione del regime di corrente:

- in presenza di *corrente lenta* nella sezione al contorno di monte, si fissa il valore dell'idrogramma di piena, cioè il valore della variabile  $uh$  normale al contorno stesso, e si considera nulla la velocità tangenziale; nella sezione al contorno di valle, si deve imporre una sola condizione di tipo fisico in quanto due autovalori sono negativi e uno positivo. Generalmente si impone il livello idrico (costante o variabile nel tempo) o una scala delle portate;
- in presenza di *corrente veloce* nella sezione a monte si hanno tre autovalori positivi e dunque tre condizioni al contorno relative alle due componenti del vettore velocità e al livello idrico; nella sezione di valle, si hanno tre autovalori negativi e quindi le condizioni al contorno saranno esclusivamente di tipo numerico; genericamente queste ultime possono rappresentare un'uscita libera (*free outflow boundary conditions*) in cui le variabili alla faccia di contorno assumono gli stessi valori delle variabili interne.

Per il calcolo delle condizioni al contorno di tipo numerico si può ricorrere all'utilizzo degli invarianti di *Riemann* per il calcolo del flusso sul lato di contorno e la tecnica basata sull'introduzione di cosiddette *ghost cells*, sulle quali fissare un opportuno valore delle variabili. Maggiori dettagli sono riportati all'interno del progetto *POR Calabria 2000-2006 Asse I, Misura 1.4 Azione, 1.4.c Lotto Progettuale n. 8 "Metodologie di Individuazione delle Aree Soggette a Rischio Idraulico di Esondazione"*.

#### 4.4. La stima della scabrezza

Nelle *shallow water equations* il termine sorgente  $\mathbf{S}$  tiene conto delle resistenze al moto e della pendenza al fondo lungo le due direzioni spaziali:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

La valutazione quantitativa della resistenza al moto richiede la stima dei coefficienti di scabrezza. Essi influenzano notevolmente i risultati numerici in termini di forma dell'onda di piena, di valore della portata al picco e del tempo in cui essa si raggiunge in un'assegnata sezione. Occorre stimare tali coefficienti in diversi tratti del corso d'acqua e per le varie porzioni di sezioni composite e valutare la scabrezza della superficie, le irregolarità geometriche del corso d'acqua, la vegetazione, i depositi, le erosioni, ecc.

Negli alvei naturali, la definizione ottimale del coefficiente richiede ulteriori analisi, poiché la scabrezza intrinseca non è l'unica causa della resistenza al moto; la determinazione di un coefficiente globale può dipendere da diversi fattori, quali:

- vegetazione in termini di altezza, densità, distribuzione e tipologia delle formazioni arbustive e arboree;
- forme di fondo e variazioni di forma indotte dagli allargamenti e restringimenti delle sezioni che si succedono lungo il corso d'acqua;
- ostruzioni, quali macigni, alberi, pile di ponti, sbarramenti, ecc.;
- irregolarità dell'andamento planimetrico.

Negli alvei naturali, alla resistenza del contorno si aggiungono altre perdite di energia dovute alla continua variazione di geometria del contorno (allargamenti, restringimenti, variazioni di forma, ecc.) non valutabili distintamente. Si tiene conto di tali effetti in maniera globale, incrementando convenientemente il coefficiente di resistenza. *Cowan* (1956) suggerisce di valutare la resistenza al moto in un alveo naturale, sommando tra loro gli effetti di tutti i fattori che ostacolano la corrente, per cui il coefficiente di scabrezza di Manning è dato dal:

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

La resistenza al moto dovuta alla sola scabrezza del contorno è espressa con  $n_0$ , in funzione del materiale costituente l'alveo, se questo è indeformabile. Il significato e il campo di variazione dei valori dei singoli termini è fornito in Tabella 1-1.

## Capitolo 1 - Metodi per la valutazione quantitativa del rischio idraulico

Condizioni del corso d'acqua		Valori del coefficiente	
Materiale d'alveo	Sabbie e limi	n <sub>0</sub>	0.020
	Ghiaie e sabbie		0.024
	Ciottoli e sabbie		0.028
	Roccia		0.025
Forma della sezione	Regolare	n <sub>1</sub>	0.000
	Abbastanza regolare		0.005
	Moderatamente irregolare		0.010
	Molto irregolare		0.020
Grado di uniformità longitudinale	Variazioni graduali	n <sub>2</sub>	0.000
	Saltuarie strettoie e varici		0.005
	Frequenti cambi di sezione		0.010 ÷ 0.015
Effetto delle ostruzioni	Trascurabile	n <sub>3</sub>	0.000
	Poco importante		0.010 ÷ 0.015
	Apprezzabile		0.020 ÷ 0.030
Vegetazione	Forte	n <sub>4</sub>	0.040 ÷ 0.060
	Scarsa		0.005 ÷ 0.010
	Media		0.010 ÷ 0.025
	Importante		0.025 ÷ 0.050
	Molto importante		0.050 ÷ 0.100
Grado di sinuosità	Scarso	m <sub>5</sub>	1.00
	Apprezzabile		1.15
	Notevole		1.30

Tabella 1-1. Tabella per il calcolo del coefficiente di resistenza di tronco coefficiente di Manning:  $n$  ( $s/m^{1/3}$ ) da [Chow v. t.,1959]

Negli alvei boscati il coefficiente di resistenza della vegetazione può essere stimato in prima approssimazione consultando la Tabella 1-2.

## Capitolo 1 - Metodi per la valutazione quantitativa del rischio idraulico

Tipo di superficie	Minimo	Normale	Massimo
ALVEI DI PIANURA			
non vegetati, rettilinei, corrente regolare come sopra ma con pietre e alghe	0.025	0.030	0.033
non vegetati, tortuosi con molienti e rapide come sopra ma con pietre e alghe come sopra, in magra	0.030	0.035	0.040
non vegetati, tortuosi con molienti e rapide come sopra ma con pietre e alghe come sopra, in magra	0.033	0.040	0.045
non vegetati, tortuosi, pietre, molienti e rapide molto irregolari e alghe molto fitte	0.035	0.045	0.050
	0.040	0.048	0.055
	0.045	0.050	0.060
	0.075	0.100	0.150
ALVEI DI MONTAGNA (SPONDE CON ALBERI E CESPUGLI)			
sul fondo: ghiaia, ciotoli e massi radi	0.030	0.040	0.050
sul fondo: ciotoli e grandi massi	0.040	0.050	0.070
GOLENE E PIANE INONDABILI			
prato senza cespugli, erba bassa	0.025	0.030	0.035
prato senza cespugli, erba alta	0.030	0.035	0.050
campi incolti	0.020	0.030	0.040
coltivazioni a filari	0.025	0.035	0.045
colture di cereali in pieno sviluppo	0.030	0.040	0.050
aree con cespugli sparsi e erba alta	0.035	0.050	0.070
aree con cespugli bassi e alberi, in inverno	0.035	0.050	0.060
aree con cespugli bassi e alberi, in estate	0.040	0.060	0.080
cespugli fitti, in inverno	0.045	0.070	0.110
	0.070	0.100	0.160

*Tabella 1-2. Valori del coefficiente di resistenza di Manning:  $n$  ( $s/m^{1/3}$ ) da [Chow v. t., 1959].*

*Corsi d'acqua minori (larghezza a piene rive < 30 m)*

Per simulare fenomeni di allagamento in zona urbana, è necessario far riferimento sia ai dati di letteratura sia all'esperienza acquisita nel campo della modellistica idraulica.

È anche possibile affidarsi alle tecniche di rilevamento satellitare, molto utili per la parametrizzazione della scabrezza dello strato superficiale del suolo, poiché con tale tecnica possono acquisirsi informazioni areali riguardo alle proprietà fisiche del terreno, in forma distribuita e spesso con ottima risoluzione spaziale.

Come già evidenziato, la scabrezza idraulica è un parametro di riferimento nella calibrazione di un modello; la sua definizione ottimale e la variabilità planimetrica si determinano in fase di calibrazione, in funzione dei dati osservati disponibili. Ciò contribuisce in modo fondamentale all'affidabilità del modello numerico. Per il modello monodimensionale, l'influenza delle singolarità idrauliche che si verificano nel campo di flusso viene eseguita calibrando in modo

corretto i parametri che tengono conto delle ostruzioni del canale e del grado di meandri. Nel modello 2-D, la sinuosità del fiume, la presenza di sezioni di restringimento e le irregolarità del fondo sono già rappresentate nella batimetria. Per questo motivo, non è necessario introdurre coefficienti aggiuntivi (Morvan et al., 2008). Per ulteriori dettagli si rimanda a Costabile et al., 2015a, b).

### 5. Conclusioni

Nel presente capitolo sono stati richiamati alcuni aspetti dell'idraulica computazionale applicata al rischio di alluvione. L'approccio più accurato tecnicamente utilizzabile implica l'uso delle equazioni bidimensionali delle correnti a superficie libera in moto vario, formulate in forma conservativa ed integrate con metodi conservativi *shock capturing*. La robustezza del calcolo viene supportata dalla disponibilità di dati topografici ad alta risoluzione ottenibili dalle acquisizioni laser aeree, integrabili con rilievi LiDAR terrestri. I modelli completi, inoltre, consentono di tradurre le informazioni relative alla propagazione dell'allagamento in termini quantitativi di pericolosità, aspetto fondamentale per lo studio e la comunicazione del rischio idraulico. I risultati numerici che si ottengono dai modelli idraulici basati sulle equazioni 2-D complete del moto vario hanno in sé le peculiarità fisiche che li rendono idonei ad essere visualizzati in immagini. Questa considerazione apre all'idea di rappresentare i risultati così ottenuti mediante prodotti di realtà virtuale che traducano in immagini i risultati del calcolo. In tal modo si otterrebbero degli strumenti utili per il miglioramento della comunicazione del rischio, per incrementare la comprensione del rischio al pubblico non esperto e ai decisori politici e per attuare la preparazione della popolazione a fronteggiare gli eventi ai quali è esposta.

È per tale motivo che in questo capitolo si è inteso mettere in luce la solidità dell'approccio garantito dalla modellistica 2-D completa nella mappatura del rischio e come essa sia una base sufficientemente accurata dal punto di vista della descrizione dei fenomeni idraulici, anche localizzati. Pertanto tale base di calcolo può a tutti gli effetti entrare in gioco nella costruzione di scenari di allagamento in ambienti virtuali 3-D.

Tali argomenti verranno trattati dettagliatamente nei prossimi capitoli, non prima però di avere richiamato le attuali tecniche di rappresentazione dei risultati numerici, costituite dalle classiche mappe di pericolosità, cui sarà dedicato il prossimo capitolo.

## Capitolo 2 - Metodi tecnici usuali per la mappatura della pericolosità idraulica

### 1. Introduzione

La Direttiva individua come passaggio chiave della pianificazione e della gestione del rischio la redazione delle mappe di rischio e di pericolosità. Di fatto, le mappe di pericolosità e di rischio sono, come specificato nel preambolo 12, uno strumento conoscitivo ed informativo, e la loro importanza è ormai indiscutibilmente riconosciuta in letteratura (Kellens et al., 2009; Dransch et al., 2010; Papaioannou et al., 2014; Lagmay et al. 2017). Tuttavia, la loro efficacia in termini di interpretazione e comprensione da parte di un pubblico quanto più vasto possibile rimane una questione ancora aperta (White et al., 2010; Retchless, 2017). Al giorno d'oggi, molte mappe sono disponibili sul web (Hagemeier-Klose & Wagner, 2009) e, grazie alle piattaforme GIS, l'utente può esplorarle in maniera interattiva. Tuttavia, è necessario non trascurare i gruppi di utenti che potrebbero non avere accesso a queste fonti digitali o che non sono abituati ad utilizzarli (Van Kerkvoorde et al., 2017). Pertanto, le mappe tradizionali sono ancora il principale mezzo di comunicazione in grado di raggiungere tutti gli *stakeholder*.

Il presente capitolo analizza i concetti teorici e metodologici relativi alla mappatura della pericolosità e del rischio alluvione, in relazione allo stato dell'arte, ai metodi e alle sperimentazioni presenti nella letteratura scientifica internazionale e più dettagliatamente in ambito europeo.

Il capitolo è finalizzato a mettere in luce peculiarità e criticità delle prassi correnti, da utilizzare come riferimento per la realizzazione di strumenti intuitivi ed efficaci per la comunicazione del rischio.

È stata condotta un'analisi sugli aspetti cartografici della mappatura del rischio di inondazione, mettendo in luce alcune peculiarità relative all'elaborazione e al *design* delle mappe.

### 2. I criteri di mappatura in Europa

Durante gli ultimi decenni in Europa si sono verificati numerosi eventi alluvionali che hanno provocato danni ingenti in termini di persone colpite (Figura 2-1), disastri ambientali e perdite economiche.

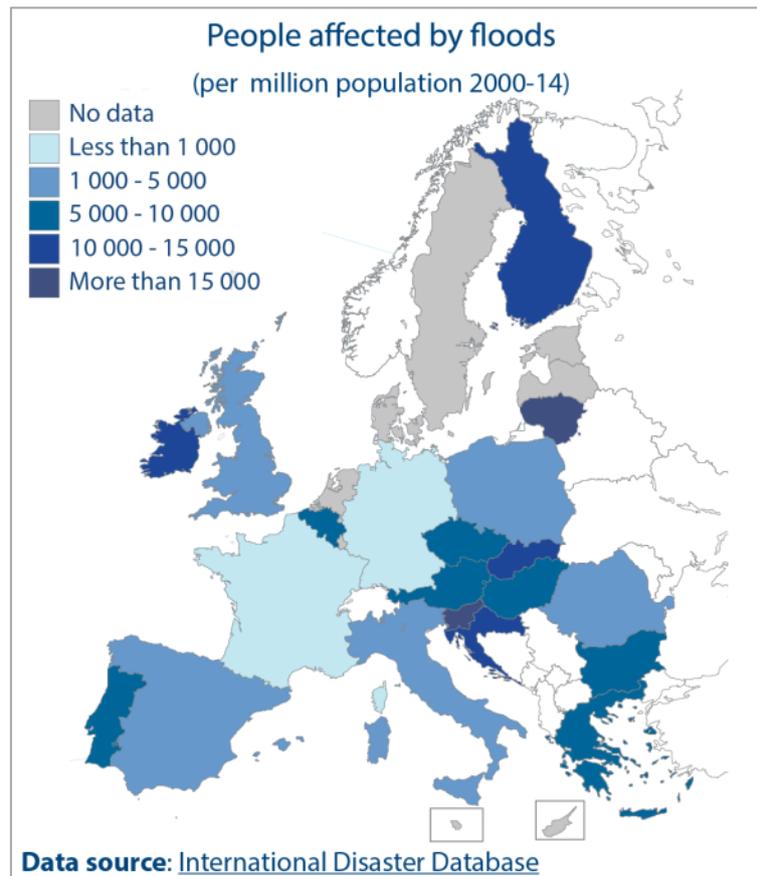


Figura 2-1. Persone colpite da inondazioni (per milione di abitanti 2000-14). Dall' European Parliamentary Research Service Blog (<https://epthinktank.eu/2015/06/17/water-legislation-cost-of-non-europe-report/fig-2-10/>)

Questi fenomeni hanno suscitato un aumento di consapevolezza riguardo la severità delle potenziali conseguenze delle inondazioni ed hanno messo in evidenza la necessità di intraprendere azioni concrete a livello comunitario per quanto riguarda la comunicazione del rischio alla popolazione ed ai *stakeholders*. La descrizione spaziale del rischio, attraverso la mappatura, gioca un ruolo fondamentale nel *flood risk management* (Merz et al., 2007); dalla consapevolezza della crescente necessità di uno sviluppo della mappatura delle piene in Europa nasce il progetto EXCIMAP (*European Exchange Circle on Flood Mapping*), concluso nel 2007, il quale ha l'obiettivo di mettere a punto le buone pratiche ed i requisiti minimi della Direttiva Alluvioni relativi alla mappatura delle inondazioni, contenute nel manuale *Handbook of Flood risk mapping in Europe* (EXCIMAP, 2007; Van Alphen et al., 2009). Il manuale include le raccomandazioni sui contenuti delle mappe delle inondazioni per diversi gruppi di utenti, alcune tecniche di modellazione del rischio e della pericolosità idraulica ed i dati richiesti. Inoltre, il progetto ha realizzato un atlante online ([http://ec.europa.eu/environment/water/flood\\_risk/flood\\_atlas/](http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/flood_atlas/)) in cui sono consultabili i

geo-portali dei diversi Stati membri che, in quanto tali, pubblicano le proprie mappe del rischio di alluvione.

Il progetto RISK MAP (2011), sviluppato all'interno dell'iniziativa di ricerca "2nd ERA-Net CRUE", ha utilizzato le intuizioni e le lezioni del progetto EXCIMAP, fornendo una panoramica delle attuali pratiche di mappatura delle inondazioni in Europa, riportando con maggiore dettaglio la situazione di Inghilterra, Sassonia, Baviera, Austria e Francia, con l'obiettivo di sviluppare adeguati processi di partecipazione delle parti interessate, migliorare il contenuto delle mappe di rischio considerando i rischi sociali, economici e ambientali, migliorare la visualizzazione dei rischi di alluvione al fine di produrre mappe di rischio *user-friendly* e fornire informazioni quantitative relative al contenuto della mappa dei rischi. Un ulteriore punto di riferimento sono stati gli studi del progetto RISK CATCH (Fuchs et al., 2009), il quale si concentra principalmente sugli aspetti di visualizzazione e design di mappe del rischio e sulle linee guida sviluppate su questo argomento.

Secondo la Direttiva europea, entro il 2011, gli Stati membri avrebbero dovuto effettuare una valutazione preliminare delle aree a rischio di inondazione; successivamente, avrebbero dovuto redigere le mappe di pericolosità e di rischio di alluvione (entro il 2013) e i Piani di Gestione del Rischio di Alluvione (entro il 2015). Secondo la Direttiva 2007/60/CE, quando si parla di mappatura delle piene, occorre fare una distinzione tra mappe di pericolosità e mappe di rischio. Le prime rappresentano le aree interessate dall'evento di piena secondo 3 scenari (art. 6):

- Scarsa probabilità di alluvione o eventi estremi (tempo di ritorno  $T_R$  fino a 500 anni)
- Media probabilità di alluvione ( $T_R$  fra 100 e 200 anni)
- Elevata probabilità di alluvione ( $T_R$  fra 20 e 50 anni), se opportuno.

Per ciascuno dei suddetti scenari, esse devono contenere informazioni sul tipo di evento (inondazione fluviale, per debordamento delle acque lacustri, marina in zone costiere), la sua estensione, profondità delle acque o livelli idrici e, se opportuno, la velocità o la principale direzione della corrente.

Le mappe di rischio mostrano le potenziali conseguenze associate all'evento per il relativo scenario, espresse in termini di: numero indicativo di abitanti potenzialmente esposto, tipo di attività economica dell'area potenzialmente colpita, impianti potenzialmente interessati da inquinamento accidentale nel caso di inondazione, altre informazioni che uno Stato membro ritiene di rilevante importanza.

In Italia la Direttiva Alluvioni viene recepita con il D. Lgs. 49/2010, specificandone le modalità di implementazione, individuando in dettaglio i contenuti necessari per ognuno dei documenti previsti e le autorità competenti per la loro realizzazione. Il decreto tiene conto in modo sostanziale della normativa nazionale già vigente relativa agli strumenti predisposti nell'ambito della pianificazione di bacino, facendo esplicito riferimento in particolare al D. Lgs. 152/2006. Considerato l'argomento del presente capitolo, si illustreranno unicamente le peculiarità previste per l'attività di mappatura, per le informazioni concernenti gli altri strumenti si rimanda agli articoli del D. Lgs. 49/2010.

In riferimento alla panoramica delle pratiche correnti per la mappatura delle inondazioni in Europa, è stato possibile identificare le seguenti caratteristiche per le mappe delle inondazioni disponibili in Europa (Tabella 2-1). Alcuni Stati associano alle mappe di pericolosità le carte del rischio. In particolare, Francia e Svizzera hanno prodotto tali mappe sovrapponendo semplicemente informazioni derivanti dalle carte di pericolosità ai dati relativi all'uso del suolo, al fine di considerare il livello di esposizione delle diverse zone. In Belgio, Germania, Paesi Bassi e Spagna, invece, si tentava di tener conto sia dell'esposizione, sia della vulnerabilità degli elementi a rischio. I criteri per la valutazione della vulnerabilità, utilizzati nei diversi paesi, non sono però esplicitati in dettaglio all'interno del progetto EXCIMAP.

## Capitolo 2 - Metodi per la valutazione quantitativa del rischio idraulico

	Mappe di pericolosità	Mappe di rischio
<i>Contenuto</i>	Parametri descrittivi della piena: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estensione dell'inondazione in base alle classi di probabilità, agli eventi storici</li> <li>• Livelli idrici o profondità</li> <li>• Velocità della corrente</li> <li>• Propagazione della piena</li> </ul>	Parametri descrittivi del rischio: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Attività a rischio</li> <li>• Vulnerabilità</li> <li>• Probabili danni</li> <li>• Probabili perdite (unità per tempo)</li> </ul>
<i>Finalità ed utilizzo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso del suolo e gestione del territorio</li> <li>• Gestione dei bacini idrografici</li> <li>• Gestione delle risorse idriche</li> <li>• Valutazione della pericolosità a livello locale</li> <li>• Pianificazione e gestione dell'emergenza</li> <li>• Pianificazione di misure tecniche</li> <li>• Creazione di una consapevolezza generale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Base per un dialogo politico</li> <li>• Strategie di prevenzione, mitigazione</li> <li>• Gestione dell'emergenza</li> <li>• Creazione di una consapevolezza generale</li> </ul>
<i>Scala</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Scala locale: da 1:5 000 a 1:25 000, diversi parametri</li> <li>• Scala di bacino, scala nazionale: da 1:50 000 a 1: 1 000 000, generalmente solo estensione delle aree inondabili</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Scala locale: da 1:5 000 a 1:25 000</li> <li>• Scala di bacino, scala nazionale: da 1:50 000 a 1: 1 000 000</li> </ul>
<i>Accuratezza</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta, per mappe di dettaglio a scala locale</li> <li>• Bassa, per rappresentazioni a scala di bacino, a scala nazionale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta per mappe di dettaglio</li> <li>• Bassa per rappresentazioni a scala di bacino, a scala nazionale</li> </ul>
<i>Destinatari ed usi</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pianificazione dell'uso del territorio nazionale, regionale o locale</li> <li>• Flood managers</li> <li>• Servizi di emergenza</li> <li>• Servizi forestali</li> <li>• Pubblico in generale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Settori privati, in particolare il settore assicurativo</li> <li>• Servizi di emergenza nazionali, regionali o locali</li> <li>• Pianificatori del territorio, gestori delle risorse idriche nazionali, regionali o locali</li> </ul>

*Tabella 2-1. Panoramica sulle caratteristiche per le mappe delle inondazioni disponibili in Europa*

La mappatura degli eventi di piena può rappresentare attività supplementare o secondaria richiesta nei processi decisionali su questioni non direttamente correlate inondazioni, come la pianificazione ambientale o la contaminazione del suolo dopo un'alluvione. A seconda dei diversi contesti e in particolare dei requisiti normativi dei diversi Stati o Regioni, i contenuti di una mappa possono variare a seconda delle finalità (gestione del rischio idraulico, pianificazione e gestione dell'emergenza, comunicazione del rischio, pianificazione del territorio, valutazione dei premi assicurativi). Per maggiori dettagli si rimanda a EXCIMAP, 2007 (pp. 13-16).

Il progetto RISKMAP (Meyer, et al., 2011), analizza più dettagliatamente lo stato d'avanzamento dell'attività di mappatura alluvionale in Austria, Germania, Francia ed Inghilterra, seguendo sostanzialmente l'approccio già in atto negli anni precedenti. In particolare, le carte di pericolosità prevedono la rappresentazione delle aree di allagamento per eventi storici o fenomeni simulati per diverso tempo di ritorno e, in alcuni casi, l'indicazione dell'altezza d'acqua e della velocità della corrente. Le metodologie di valutazione e rappresentazione del rischio, invece, variano da paese a paese. In Austria ed in Inghilterra le mappe di rischio non erano ancora state prodotte; pertanto, al fine di fare un passo avanti in tale direzione, in Austria durante un *workshop* tenuto nell'ambito del progetto, si è ipotizzata una metodologia di calcolo del rischio che tiene conto delle conseguenze economiche, degli impatti sociali e della vulnerabilità degli edifici. Tale approccio è stato applicato a due casi studio a Wartschenbach e Vorderbergerbach. Durante il workshop si è innanzitutto studiata la relazione tra i danni di eventi storici passati e l'intensità degli eventi calamitosi che li avevano generati al fine di creare funzioni di vulnerabilità.

L'appropriato utilizzo delle mappe nell'ambito della comunicazione del rischio, nei processi di pianificazione richiede che esse debbano avere delle caratteristiche di base, descritte di seguito.

- *Titolo, breve descrizione del tipo di mappa, contenuti e/o finalità (nel caso di mappe di pericolosità occorre far riferimento ai parametri della corrente, a un evento storico, al tempo di ritorno).*

Per quanto riguarda i contenuti, nel caso di mappe disponibili in ambienti GIS, devono essere forniti appropriati metadati, nonché la proiezione della mappa e qualsiasi livello di riferimento utilizzato. Si dovrebbe anche prendere in considerazione qualsiasi protocollo o requisito relativo ai metadati.

- *Mappe di base e sfondi cartografici relativi alla topografia, edifici, strade, fiumi e corpi idrici, uso del suolo, ecc. oppure ortofoto su cui proiettare l'informazione tematica.*

Uno sfondo visibile ed opportunamente ridimensionato facilita la localizzazione geografica dell'area interessata. Affinché i colori dello sfondo non siano confondibili con quelli utilizzati nella mappatura delle alluvioni (o viceversa), l'immagine di sfondo è talvolta fornita in bianco e nero o in scala di grigi per migliorare la chiarezza delle informazioni riportate sulla mappa. Le ortofoto possono essere interpretate più facilmente come mappa di base (Ion et al., 2008). Recentemente, Google Earth è diventato un potente strumento per questo tipo di prodotto.

- *Mappa di localizzazione e copertura dell'area inondata all'interno di un'area geografica più ampia (nazione, regione, bacino idrografico)*

Può essere una mappa o un piano schematico opportunamente ridimensionato (con posizioni-chiave appropriate, come città, strade, fiumi, ecc.). Per le mappe digitali saranno necessari strumenti di navigazione (zoom, pan, ritorno alla vista predefinita, ecc.).

- *Legenda (simbologia e combinazioni di colori utilizzati; classi o scale cromatiche per la rappresentazione di valori numerici) al fine di consentire una facile lettura*

Quando si rappresenta semplicemente l'estensione dell'area inondabile per un determinato tempo di ritorno, è prassi utilizzare una scala cromatica su una mappa di sfondo. Una scala cromatica o tonale (sfumature di un singolo colore) può essere utilizzata per presentare più parametri, come i livelli idrici, classi di pericolosità, classi di rischio. La scelta dei colori può essere fattore influente per la leggibilità delle mappe, in termini di capacità di interpretarle correttamente (Seipel & Lim, 2017). I colori scelti dovrebbero risaltare sullo sfondo della mappa e adattarsi anche al significato dato al colore stesso. Ad esempio, il blu è il colore associato all'acqua e può essere utilizzato per rappresentare l'estensione dell'inondazione, come mostrato in Figura 2-2. Rosso, arancione e verde sono usati rispettivamente per rappresentare pericolo, cautela e sicurezza. È possibile utilizzare una gradazione di colori continua o discreta.

La gradazione discreta viene utilizzata per rappresentare un numero prestabilito di intervalli o classi. La scelta dell'intervallo di gradazione può essere basata su divisioni uguali, o forse più appropriatamente, su classificazioni correlate alle conseguenze (ad esempio, classi di profondità-danno per la valutazione economica del danno atteso).

Nella gradazione le diverse profondità idriche sono descritte cromaticamente mediante una scala tonale di blu, dove ad esempio sfumature più scure rappresentano livelli idrici maggiori. Questo metodo è adottato in Inghilterra e Galles, in Finlandia e in Germania. La gradazione continua fornisce maggiori dettagli, ma potrebbe non essere semplice da interpretare, soprattutto quando l'intervallo di valori è molto ampio.

- *Nord e scala di rappresentazione*

Per una corretta interpretazione è richiesta anche un'indicazione di orientamento e scala di rappresentazione della mappa. Le informazioni di scala possono essere fornite da una scala in formato numerico (ad es. 1: 5 000) riportata nel titolo o nella legenda; una barra della scala fornita

sulla mappa che consente di modificare le dimensioni della pagina; un grigliato con la dimensione quadrata della griglia definita nella legenda.

- *Autorità responsabile o istituto con indirizzo, sito web (e / o numero di telefono)*
- *Base dati e data di preparazione/pubblicazione*
- *Se necessario, è possibile aggiungere un disclaimer ed osservazioni sulla qualità delle informazioni, per fornire protezione legale all'autorità responsabile contro le conseguenze negative di un uso improprio.*

Gli aspetti cartografici, la finalità ed i contenuti informativi delle mappe di inondazione dovrebbero variare a seconda della tipologia di utente finale. Ad esempio, le mappe destinate ad un pubblico non esperto dovrebbero essere di agevole lettura ed includere una leggenda chiara così da essere di supporto per una corretta interpretazione. Al contrario, le mappe destinate ai portatori di interesse (autorità, amministrazioni, enti), utilizzate quindi da un pubblico più esperto nei processi decisionali dovrebbero contenere informazioni esplicative più dettagliate per aiutare l'utente a comprendere appieno lo sviluppo e le limitazioni delle mappe, in particolare in relazione ai metodi di sviluppo e all'incertezza.

### **2.1. Mappe di pericolosità**

La tipologia di mappa più diffusa in Europa a fine 2006 era una semplice rappresentazione della pericolosità in termini di estensione di aree allagate per eventi storici passati o per eventi simulati con diversi tempi di ritorno (de Moel et al., 2009; Merz et al., 2007; Nones, 2017) e, solitamente, dei livelli idrici in scala cromatica. Tuttavia, solo pochi Stati Membri riportano la velocità della corrente nelle mappe di pericolosità (Tabella 2-2); solo nel caso del fiume Serchio, in Italia, viene rappresentato questo parametro. In Belgio, Francia e Gran Bretagna alcuni documenti indicano anche il fenomeno del trasporto dei sedimenti e di eventuali processi di erosione e deposito. Per tale aspetto, l'articolo 6.5d della Direttiva Alluvioni suggerisce di conseguire ulteriori informazioni.

Stati Membri	Parametri rappresentati		
	T <sub>R</sub> basso	T <sub>R</sub> medio	T <sub>R</sub> alto
Austria	Area inondabile	Area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile
Danimarca	Livelli idrici nell'area inondabile Velocità della corrente	Livelli idrici nell'area inondabile Velocità della corrente	Livelli idrici nell'area inondabile Velocità della corrente
Estonia	Livelli idrici nell'area inondabile Velocità della corrente	Livelli idrici nell'area inondabile Velocità della corrente	Livelli idrici nell'area inondabile Velocità della corrente
Baviera (Germania)	Livelli idrici nell'area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile
Brandeburgo (Germania)	Area inondabile	Area inondabile	Area inondabile
Bassa Sassonia (Germania)	Livelli idrici nell'area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile
Saarland (Germania)	Livelli idrici nell'area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile
Sassonia (Germania)	Area inondabile	Area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile Velocità della corrente
Schleswig-Holstein (Germania)	Area inondabile	Area inondabile	Area inondabile
Italia (D. Lgs. 49/2010)	Area inondabile	Area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile (e/o velocità della corrente)
Alpi Orientali (Italia)	Livelli idrici nell'area inondabile (e/o velocità)	Livelli idrici nell'area inondabile (e/o velocità)	Livelli idrici nell'area inondabile (e/o velocità)
Bacino del Po (Italia)	Area inondabile	Area inondabile	Area inondabile
Fiume Serchio (Italia)	Direzione di deflusso nell'area inondabile	Direzione di deflusso nell'area inondabile	Direzione di deflusso nell'area inondabile
Norvegia	Livelli idrici nell'area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile
Paesi Bassi	Livelli idrici nell'area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile	Livelli idrici nell'area inondabile
Inghilterra/Galles (UK)	Area inondabile	Area inondabile	Area inondabile
Scozia (UK)	Livelli idrici nell'area inondabile Velocità	Livelli idrici nell'area inondabile Velocità	Livelli idrici nell'area inondabile Velocità

Tabella 2-2. Parametri rappresentati nelle mappe di pericolosità nei diversi Stati Europei (da Nones, 2017)

L'estensione dell'area inondabile viene rappresentata come una superficie che ricopre la topografia, ed è opportuno riportare anche la viabilità principale, la rete ferroviaria, gli edifici, i limiti amministrativi ed i corpi idrici responsabili dell'inondazione, e preferibilmente le eventuali opere di difesa e di invaso.

Anche la campitura può essere utilizzata in associazione alla scala cromatica per la rappresentazione di una stessa grandezza, ma in condizioni diverse (ad esempio, una differenziazione tra aree allagate naturalmente e aree potenzialmente allagate protette da argini, come rappresentato in Figura 2-2). Le mappe risultano difficili da leggere quando le informazioni di tipo superficiale, come l'estensione dell'inondazione, sono presentate in isolinee anziché in superfici colorate o quando le velocità della corrente sono raffigurate da vettori.



Figura 2-2. Esempio di mappa. Le aree colorate in blu e in celeste rappresentano l'estensione dell'area inondabile per diversi tempi di ritorno; la campitura rappresenta l'estensione della piena in presenza di argini (da Van Alphen et al., 2009)

### ❖ *Mappa dei massimi livelli idrici*

Per trasferire su Carta Tecnica Regionale o su ortofoto i risultati dei calcoli idraulici, essi devono essere innanzitutto riferiti allo stesso sistema di riferimento. Inoltre, occorre utilizzare un *software* in cui creare un algoritmo, inserendo come prima superficie il file del tematismo trattato. A tal proposito, l'*header* del file deve contenere l'indicazione del valore da considerare come “*no data*”, altrimenti le zone senza dati assumono una colorazione e non lasciano trasparire la carta o l'ortofoto di base. Come già descritto precedentemente, la scala dei colori per la rappresentazione della grandezza idraulica considerata va scelta in base all'esigenza di evidenziare le variazioni dei valori bassi, medi o alti.

Il risultato finale va esportato in un formato tale da consentire la migliore compressione dell'immagine con perdita minima di informazioni, oltre ad essere georeferenziato (ad esempio, si possono scegliere i formati *.ers* o *.ECW*). Per non perdere nessuna informazione radiometrica si può esportare l'immagine ottenuta in formato TIF georeferenziato (*.TIF* e *.TFW*). Queste estensioni consentono l'esplorazione e le misure con lettori gratuiti o sul GIS, e la stampa dell'elaborato.

A titolo di esempio, la Figura 2-3 mostra una mappa di pericolosità in cui sono rappresentati i massimi valori dei tiranti idrici e l'estensione delle aree inondabili, redatta secondo i criteri sovraesposti.

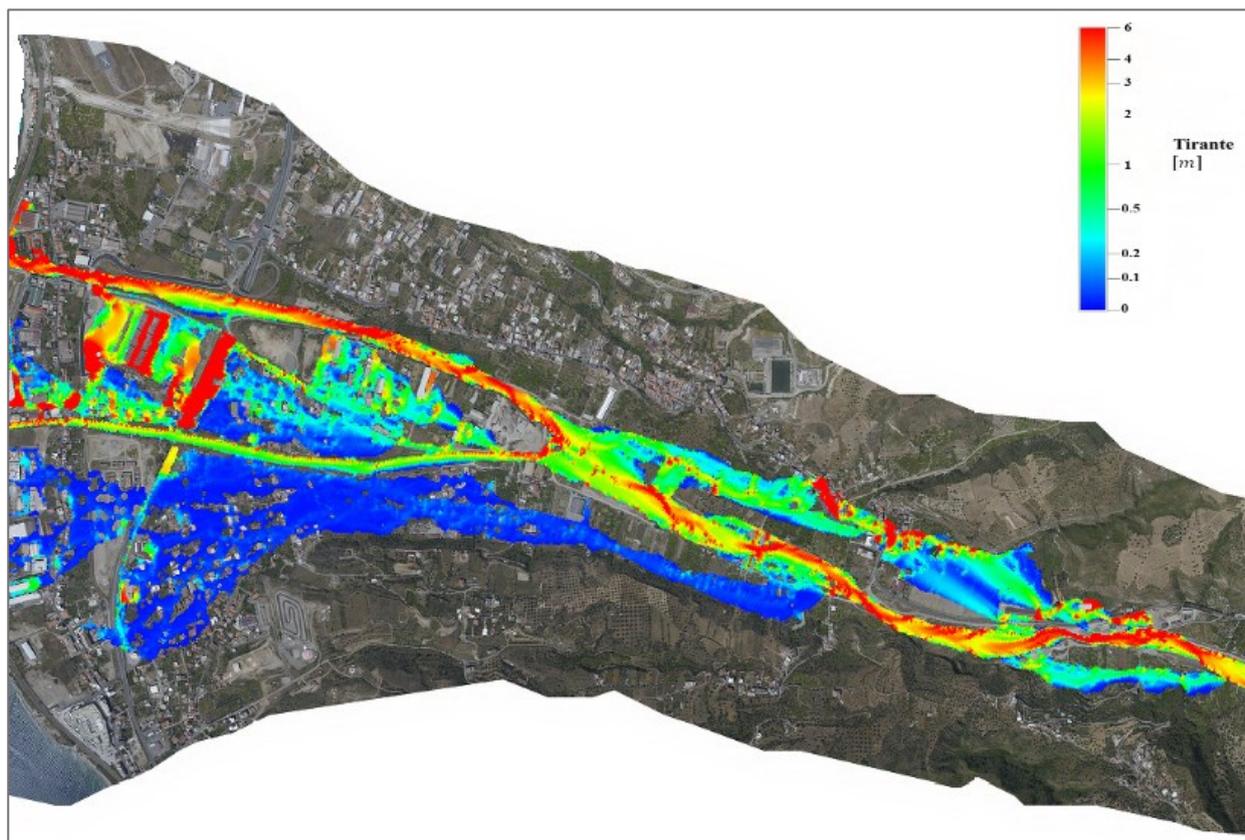


Figura 2-3. Fiumara Valanidi (Calabria): carta delle aree inondabili ( $TR = 500$  anni), massimi valori dei tiranti idrici. Elaborato prodotto nel Progetto POR Calabria 2000-2006.

### ❖ *Mappa dei parametri di pericolosità*

In letteratura vi è ormai largo consenso sul fatto che il grado di pericolosità sia principalmente associato alla velocità ( $v$ ) e alla profondità ( $h$ ) della corrente. Vari autori hanno proposto differenti relazioni tra questi due parametri, al fine di esprimere il livello di pericolosità in caso di alluvioni (Abt et al., 1989; Reiter, 2000; Shand et al., 2010). Le suddette relazioni sono state sviluppate al fine di prevedere il prodotto della profondità e della velocità del flusso al quale può corrispondere un certo grado di pericolo per la stabilità di pedoni (Russo et al., 2013), veicoli o per lo studio dei danni agli edifici o alle infrastrutture (Kreibich et al., 2009). Queste espressioni empiriche possono essere utilizzate negli studi di inondazione in aree urbane per l'elaborazione di mappe di pericolosità (Gómez et al., 2011).

La Figura 2-4 mostra un esempio di mappa di pericolosità in cui viene rappresentata l'area inondabile e, in scala cromatica, vengono rappresentati i massimi valori del prodotto tirante per velocità, derivanti da modellistica 2-D.

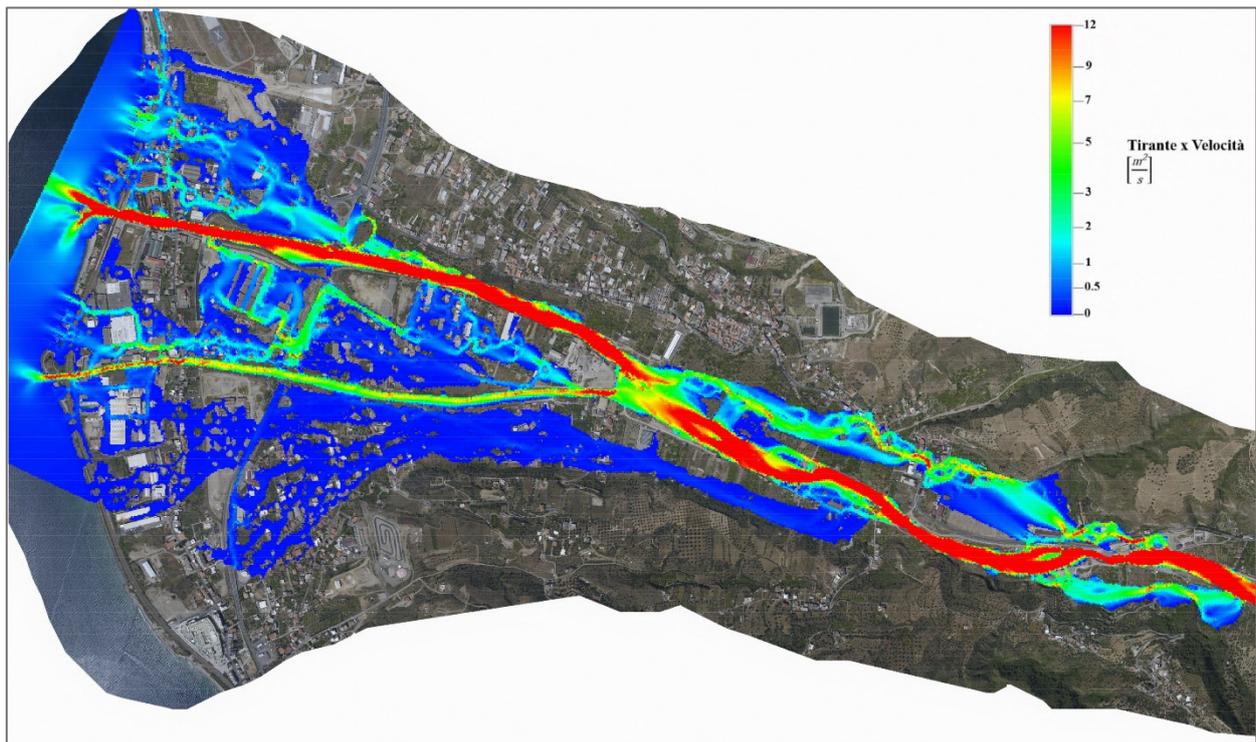


Figura 2-4. Fiumara Valanidi (Calabria): carta delle aree inondabili ( $T_R = 500$  anni), massimi valori del prodotto velocità per tirante. Elaborato prodotto nel Progetto POR Calabria 2000-2006.

## 2.2. Mappe di rischio

Nell'ambito degli scenari individuati nell'art. 6 della Direttiva, occorre redigere le mappe di rischio indicanti le potenziali conseguenze negative in seguito ad evento alluvionale. Tali mappe devono considerare quattro classi di rischio, espresse in termini di:

- *numero indicativo degli abitanti potenzialmente interessati;*
- *infrastrutture e strutture strategiche (reti autostradali e ferroviarie, ospedali, scuole);*
- *beni ambientali, storici e culturali di rilevante interesse presenti nell'area potenzialmente interessata;*
- *distribuzione e tipologia delle attività economiche insistenti sull'area potenzialmente interessata;*
- *impianti che potrebbero provocare inquinamento accidentale in caso di alluvione e aree protette potenzialmente interessate;*
- *se necessario, ulteriori informazioni di dettaglio relative ad aree soggette ad alluvioni con elevato volume di trasporto solido e colate detritiche o informazioni su fonti rilevanti di inquinamento.*

Nella maggior parte dei Paesi europei le mappe del rischio di alluvione e i prodotti correlati sono molto meno sviluppati rispetto alle mappe di pericolosità (RiSKMAP, 2011).

È bene ricordare che il rischio può essere calcolato come:

$$R = H \cdot E \cdot V$$

in cui: **H** rappresenta la pericolosità (*Hazard*), definita come la probabilità di superamento della portata al colmo di piena; **E** rappresenta il valore degli elementi a rischio in termini monetari o umani, ossia proprietà, attività economiche, popolazione esposti a rischio in una data area; **V** è la vulnerabilità, cioè la capacità di resistere alle sollecitazioni indotte dall'evento. Essa varia da 0 a 1 ed è legata alle caratteristiche di uso del territorio. Il prodotto tra valore degli elementi a rischio e vulnerabilità rappresenta il danno atteso **D**:

$$D = E \cdot V$$

Le *best practices* spesso producono raccomandazioni inconsistenti e contraddittorie (Demeritt & Nobert, 2014).

Non vi sono studi approfonditi e randomizzati finalizzati alla valutazione delle scelte di formati appropriati per diversi tipi di pubblico e, dunque, come risultato i servizi operativi in tutta Europa hanno spesso faticato a decidere se e come comunicare l'incertezza delle previsioni.

L'implementazione della Direttiva Alluvioni dovrebbe considerare non solo aspetti legislativi e tecnici, ma anche di natura scientifica e sociale. In particolare, in molti Paesi europei vi sono ancora incertezze sul tipo di informazioni sulla vulnerabilità e su quale scala temporale occorre far riferimento per una valutazione completa del rischio di inondazione (Nones, 2015). La mappatura del rischio è essenzialmente basata sul concetto di tempo di ritorno, il significato delle piene centennali crea spesso confusione (Norman & Brody, 2013), sebbene l'Europa con la Direttiva Alluvioni e gli USA con il *National Flood Insurance Program* ne hanno fatto lo standard delle mappe. Nell'ambito tecnico, assume un ruolo centrale il contributo scientifico sulla messa a punto di metodologie chiare e facilmente riproducibili finalizzate ad una comprensione efficace del rischio, nella gestione dell'emergenza (Müller, 2013; Nones & Pescaroli, 2016). Pertanto, le nuove mappe di pericolosità possono essere considerate un passaggio essenziale per condividere le informazioni in modo più completo e intelligente, al fine di raggiungere le parti interessate e il pubblico non esperto.

### 3. Il modello statunitense di trattamento del rischio alluvionale

Negli scenari alluvionali statunitensi, gli interventi di protezione non strutturali hanno contribuito alla formulazione delle *flood policies*. Fra queste misure vi sono il programma *Risk MAP*, relativo

alla mappatura, valutazione e pianificazione dei rischi di inondazione, ed il *National Flood Insurance Program* (NFIP), il programma di assicurazione contro i danni da inondazione. Tali programmi rappresentano le più importanti iniziative di mitigazione non strutturale gestiti dall'Ente federale per la gestione delle emergenze statunitense, la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA).

Il programma *Risk MAP* fornisce mappe e risorse online per la valutazione ed il supporto delle comunità nella mitigazione del rischio di alluvione, attraverso il *Flood Map Service Center* (MSC), un portale costantemente aggiornato in cui consultare le mappe ufficiali. Ogni progetto è adattato alle esigenze di ciascuna comunità e può coinvolgere diversi prodotti e servizi, che presentano informazioni finalizzate ad una migliore pianificazione di attività per lo sviluppo di strategie di mitigazione della pericolosità idraulica (Figura 2-5). Gli studi condotti alla scala di bacino idrografico hanno consentito alle contee, comunità locali, attività commerciali ed associazioni di sviluppare partnership, combinare risorse, condividere le informazioni sul rischio di alluvione con la FEMA per identificare maggiori azioni di mitigazione.



Figura 2-5. Ciclo di azioni del progetto RiskMAP

Le linee guida fornite per questo progetto supportano gli attuali standard FEMA e sono finalizzate ad una più efficace implementazione del programma, alla luce della normativa vigente, ma non sono obbligatorie.

Il *National Flood Insurance Program* mira a ridurre l'impatto delle inondazioni sui beni pubblici e privati, fornendo un'assicurazione ai proprietari di immobili, affittuari e imprese ed incoraggiando

le comunità ad adottare e applicare i regolamenti di gestione delle aree a rischio di inondazione. In questo programma, la mappatura del rischio assume un ruolo fondamentale ai fini assicurativi, sebbene generalmente non fornisce informazioni rilevanti per gli aspetti non assicurativi del *Flood Risk Management* (FRM), come la comunicazione del rischio al pubblico e la pianificazione di emergenza (Luke et al., 2018).

Nel programma NFIP, FEMA redige le *Flood Insurance Rate Maps* (FIRM), ossia le mappe per il calcolo dell'aliquota assicurativa nelle zone potenzialmente soggette ad inondazioni. Le informazioni contenute in esse si basano su dati storici, meteorologici, idrologici ed idraulici. Le FIRM comprendono aree soggette a un'inondazione di 100 anni (denominata inondazione di base), aree con moderato rischio di alluvione, soggette a un'alluvione di 500 anni, ed aree in cui il rischio è minimo. Nella loro versione digitale (DFIRM) esse includono tre livelli informativi: una mappa di base (generalmente un'ortofoto), il modello digitale del terreno ed i livelli idrici.

Esse sono consultabili attraverso il *Map Service Center*. Rappresentano uno strumento consultivo per diverse tipologie di utenti e forniscono una visione autorevole e consolidata del rischio di alluvione. In quanto tali, sono uno strumento importante per intere comunità, aziende, e agenzie governative per comprendere e affrontare il rischio di alluvione. Migliorare l'accuratezza della mappa non è quindi una questione accademica. L'aggiornamento ed il miglioramento dell'accuratezza sono attività non semplici, né economiche. Anche dopo un investimento di oltre 1 miliardo di dollari per portare le mappe di rischio in formato digitale, solo il 21% della popolazione dispone di mappe che soddisfano o superano le soglie di qualità dei dati di pericolosità delle alluvioni. Anche quando si dispone di un'elevata precisione, lo sviluppo del territorio e le modifiche naturali al paesaggio o ai sistemi idrologici creano la necessità di manutenzione ed aggiornamenti continui. Alla luce di queste considerazioni, il FEMA ha promosso uno studio che esamina i fattori che influenzano l'accuratezza e la qualità delle mappe di pericolosità, valutandone i benefici ed i costi, e suggerisce modi per migliorare la mappatura, la comunicazione e la gestione dei dati relativi alle inondazioni (*National Research Council, 2009*). Sebbene esista già questo strumento di comunicazione del rischio, tale studio riconosce che occorre migliorare la precisione dei dati e delle mappe delle inondazioni e deve fare un ulteriore passo in avanti nella comunicazione delle informazioni sulla pericolosità ed il rischio idraulico (*National Research Council, 2009, p. 89*). Dransch et al. (2010) hanno sottolineato le carenze della comunicazione del rischio, oggi prevalentemente orientata verso la formazione di esperti di cartografia e rischi, proponendo dunque

un approccio che estenda le conoscenze tecniche sulla mappatura del rischio, per supportare una comunicazione efficace per diverse tipologie di utenti finali.

#### **4. Limiti della mappatura classica nella comunicazione della pericolosità**

La necessità di ampliare la visione delle mappe di inondazione oltre gli aspetti puramente tecnici è evidenziata da diversi studi in letteratura che hanno mostrato che mappatura classica spesso non riesce a soddisfare le esigenze di utenti diversi, risultando limitata nel fornire una fonte di informazioni chiara e comprensibile per la pianificazione. In particolare, secondo Hagemeyer-Klose e Wagner (2009) e Rowe e Frewer (2000), l'efficacia delle mappe nel sensibilizzare la popolazione ad agire per ridurre la loro vulnerabilità risulta abbastanza limitata e spesso il loro contenuto informativo è ritenuto inaccurato.

A questo proposito, possono essere identificati alcuni svantaggi nella comunicazione del rischio attraverso le mappe (Fuchs et al., 2007; Steinführer et al., 2008; Meyer et al., 2009). In primo luogo, l'utilizzo delle mappe per la comunicazione del rischio avviene per lo più in maniera *top-down* unidirezionale, ossia i decisori finali sono considerati solo come i riceventi di informazioni e non sono direttamente coinvolti nel processo di mappatura delle inondazioni. Questo aspetto mette in luce un altro limite, cioè i contenuti delle mappe non sono focalizzati sulle esigenze degli utenti finali (Meyer et al., 2009). In terzo luogo, le mappe di allagamento sono spesso progettate e visualizzate da chi possiede competenze tecniche della mappatura e/o degli eventi di piena, e quindi le informazioni in esse contenute possono risultare di difficile comprensione da parte di persone non esperte o risultano inadatte per le esigenze delle autorità pubbliche per chi deve gestire l'emergenza (Cronin, 2004; Fuchs et al., 2007; Holub & Fuchs, 2009).

Burningham et al. (2008) evidenziano che le persone potenzialmente a rischio presentano difficoltà a comprendere il linguaggio tecnico, come il concetto di tempo di ritorno espresso in termini probabilistici (si veda ad es. Bell e Tobin, 2007). Dalla letteratura emerge, dunque, che differenti gruppi di utenti finali perseguono esigenze ed obiettivi diversi che potrebbero non essere necessariamente conformi o compresi da chi produce le mappe, e quindi il processo di creazione di questi strumenti dovrebbe tener conto di tali aspetti (Zeisler, 2010).

Si possono distinguere tre tipi di utenti finali (Meyer et al. 2012), di seguito descritte:

##### *1. Utenti che si occupano di pianificazione strategica*

Le persone di questo gruppo generalmente appartengono all'ente che produce le mappe di alluvioni o agli enti che si occupano del *risk management*. Gli utenti di questo gruppo sono di solito esperti

professionisti che utilizzano le mappe come strumento base nei processi decisionali. Questo gruppo di utenti è in grado di comprendere contenuti tecnici, come il concetto di tempo di ritorno, danni medi annui, ecc. Questo gruppo di solito è anche coinvolto nel contribuire alla gestione strategica del rischio di alluvione, ma è spesso localizzato all'interno di una diversa organizzazione o dipartimento. I pianificatori di professione possono avere meno familiarità con le mappe di alluvione.

### *2. Utenti che si occupano di emergency management*

La gestione delle emergenze o delle catastrofi è un'attività istituzionalmente separata dalla pianificazione strategica in termini di gestione del rischio. Le responsabilità sono, ad esempio, delle amministrazioni locali o regionali e spesso sono coinvolti anche vigili del fuoco e forze armate. In questo caso, la mappa dovrebbe fornire un rapido accesso alle informazioni sulle aree colpite in caso di emergenza, come ad esempio persone da evacuare, infrastrutture critiche o percorsi di evacuazione. Poiché spesso le inondazioni non sono argomento di loro competenza, gli utenti di questo gruppo possono avere meno familiarità con il concetto scientifico di rischio e con le mappe di inondazione rispetto agli utenti che si occupano di pianificazione strategica. Inoltre, le mappe generalizzano le informazioni in esse contenute alla scala di mappatura, riducendone così il dettaglio (Pile et al., 2018) e potrebbero pertanto essere poco utili in questo contesto. Informazioni locali su livelli idrici e velocità critiche possono essere preziose per mostrare l'accessibilità di alcune aree.

Oltre alle comuni informazioni sulla pericolosità e sui rischi, dovrebbero essere incluse anche le indicazioni sulla gestione dell'emergenza, come punti di raccolta, ospedali, centri di coordinamento ed infrastrutture d'emergenza. Ma queste strutture possono anche essere esse stesse a rischio di inondazioni. Pertanto, nelle mappe dovrebbero essere incluse nelle mappe informazioni aggiuntive sul livello di allagamento di tali strutture di emergenza a rischio. Inoltre, l'aggiunta di informazioni testuali all'interno della mappa potrebbe essere particolarmente importante durante le attività di emergenza in cui c'è poco tempo per leggere le mappe; in tal modo gli utenti non devono far continuamente riferimento alla legenda per chiarimenti.

### *3. La popolazione*

I cittadini di solito non sono direttamente coinvolti nella produzione delle mappe, né hanno competenze tecniche al riguardo. Tuttavia, il destinatario delle mappe è spesso la popolazione a rischio, con l'obiettivo di aumentarne la consapevolezza. Da quanto emerso dalla letteratura, l'uso

delle mappe di pericolosità da inondazione è generalmente infrequente e quindi è probabile che questo gruppo non abbia familiarità con concetti quali probabilità di superamento o danni medi annui. D'altro canto, la popolazione ha più probabilità di fare affidamento su una conoscenza contestuale dettagliata, ottenuta da precedenti esperienze di inondazioni. Potrebbero quindi essere in grado di fornire validi contributi al processo di mappatura, fornendo un diverso tipo di conoscenza e informazioni per arricchire il contenuto e la visualizzazione della mappa. Il contenuto informativo delle mappe per il pubblico, quindi, dovrebbe essere il più semplice possibile ed incentrato solo sugli aspetti più importanti (l'estensione dell'inondazione, le profondità, gli edifici interessati e i percorsi praticabili e non).

## Capitolo 3 – Descrizione del caso di studio utilizzato per la proposta delle tecniche di mappatura

### 1. Introduzione

Lo sviluppo di una metodologia per la rappresentazione di simulazioni idrauliche bidimensionali in un ambiente 3-D a supporto della comunicazione del rischio di allagamento ha richiesto strumenti di simulazione fisico-matematica in grado di riprodurre gli aspetti del fenomeno che concorrono a determinarne la pericolosità. Dopo l'inquadramento generale operato dai capitoli precedenti, nel presente capitolo si focalizzerà la proposta centrale di questa tesi di dottorato, con riferimento alla situazione Calabrese. La Regione Calabria, con le risorse POR Calabria 2000-2006 si è già dotata, per l'esecuzione degli studi sulle alluvioni, di "METODOLOGIE DI INDIVIDUAZIONE DELLE AREE SOGGETTE A RISCHIO IDRAULICO DI ESONDAZIONE - LINEE GUIDA". Tali metodologie e le relative Linee Guida sono state elaborate dal Laboratorio di Modellistica numerica per la Protezione Idraulica del Territorio (LaMPIT) dell'Università della Calabria in collaborazione con il CUDAM (Università di Trento), con l'Università di Pavia e con l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS (Trieste).

Questa tesi, svolta all'interno del LaMPIT, vuole essere un ideale sviluppo di quelle Metodologie. Esse sono basate sulle SWE trattate secondo i metodi e gli accorgimenti che appartengono alle categorie descritte nel capitolo precedente e, pertanto, le soluzioni da esse ottenute sono compatibili per l'uso finalizzato a una corretta trasposizione in immagini. La presente tesi ha perciò preso in esame i risultati di un caso di studio sviluppato per la Regione Calabria. Tali risultati furono rappresentati nelle Linee Guida secondo i classici canoni delle mappe di pericolosità.

Tra tutti i casi trattati nelle Linee Guida, si è voluto qui prendere in esame quello della mappa di pericolosità di inondazione del centro storico di Cosenza (Figura 3-1).

Cosenza è attraversata dai fiumi Crati e Busento, che confluiscono proprio all'interno del centro urbano. Nonostante la città sia stata preservata da alluvioni negli ultimi 60 anni, Cosenza ha storicamente subito molte volte le conseguenze delle esondazioni dei suoi fiumi. Per documentare questo, una parte del lavoro di questa tesi si è voluto dedicarla alla descrizione degli eventi storici ricavata da documenti consultabili presso l'Archivio di Stato, la Biblioteca Nazionale, la Biblioteca Civica di Cosenza e concentrando l'attenzione non solo sugli aspetti idrologici, ma anche sugli effetti idraulici e sull'uso del suolo. L'ultima alluvione si verificò il 24 novembre 1959 e benché esista una discreta documentazione fotografica della situazione post-evento, non si ha nessuna

immagine della città con l'alluvione in corso di svolgimento. Pertanto solo alcuni anziani abitanti dei luoghi alluvionati ricordano gli scenari vissuti. Le nuove generazioni non sono consapevoli di quali sarebbero questi scenari se oggi si verificasse l'esonazione dei fiumi. In verità le classiche mappe non sono lo strumento più intuitivo per trasferire tale consapevolezza alla popolazione. È questo il motivo per il quale si è scelto di implementare la procedura di visualizzazione oggetto di questa tesi proprio per la città di Cosenza.

Lo studio della documentazione storica ha consentito di integrare il quadro delle conoscenze relative allo studio del fenomeno delle piene in aree urbane, fornendo anche preziose informazioni relative alle trasformazioni urbane in termini protezione idraulica del territorio. La conoscenza storica dei fenomeni di piena verificatisi nel passato è di fondamentale importanza non solo per la calibrazione dei modelli idraulici, ma anche in termini di pianificazione.

Dopo un excursus storico, ha analizzato la simulazione idraulica di un'ipotetica alluvione di progetto riferita a un tempo di ritorno di 500 anni.



Figura 3-1. Centro storico di Cosenza

Per la città di Cosenza si dispone di dettagliati studi sul rischio idraulico, i cui aspetti metodologici e applicativi sono anche stati pubblicati in Macchione (2008), Costabile et al. (2011), Costabile e

Macchione (2015), Costabile et al. (2015a, 2015b), Macchione et al. (2016). Le diverse alluvioni storiche originate dall'esondazione del Crati evidenziano un reale rischio di inondazione per il centro storico della città. Il presente capitolo vuole fornire un'accurata e completa fonte di informazione, ad oggi disponibile, sulle alluvioni storiche che hanno interessato la città di Cosenza.

## 2. Rassegna delle alluvioni storiche di Cosenza

I documenti storici preservati in diversi fondi dell'Archivio di Stato di Cosenza dimostrano come le numerose esondazioni dei fiumi Crati e Busento abbiano minacciato costantemente la vita civile e l'espansione urbanistica della città.

I primi eventi di cui si ha notizia si verificarono nel 1544, con la distruzione del Ponte San Domenico (oggi Ponte Mario Martire). Lo scrittore e politico Davide Andreotti, nella sua opera *Storia dei Cosentini* riporta: “*Il 18 gennaio 1544, per l'inondazione del Busento, questo ponte – il ponte San Domenico – fu rovesciato, ...*”.

Il 30 ottobre 1590, il Crati in piena ruppe gli argini devastando il quartiere dello Spirito Santo e Sant'Agostino. Le cronache del tempo sono molto interessanti, poiché mostrano alcuni aspetti poco noti del paesaggio urbano: “*A 30 ottobre 1590 martedì ad' ore quattro di notte venne in tanta inondazione il fiume Grate che annegò tutti li Pignatari e buttò tutte le mura delli giardini a terra incominciando da quelli delli Garofali...*” (Galli, 1949).

Il 21 settembre 1729, alle ore 23 la piena del Crati determinò il crollo del ponte “*delli Pignatari*”, provvisoriamente sostituito da una passerella in legno. Dalla *Cronaca del bosco*: “*... pure nel 21 settembre 1729, essendo alle ore 23 circa sopravvenuta una fiera pioggia tanto che avendo preso abbondantissima acqua un vallone secco detto di Rovito, che è sotto parte il Convento dei P.P. Agostiniani e fra più case, e sormontando le mura del giardino detto delli Garofali, che è dalle parti del Quartiere delle Conciarie, e ritendo il corso del fiume Crati, sdradicò gli alberi ben grandi di gelsi bianchi e neri, e dei fichi, ed altre frutta, col empito si venne a chiudere l'arco di detto ponte, indi, sopraggiunta l'inondazione si di esso Crati che dei fiumi Caricchio ed altri che collo stesso Crati si uniscono, portando arena, e pietre, si venne a serrare dall'intutto l'arco in modo che, inondate le case dell'uno e dell'altro lato, ne perirono e subissarono molte del detto Borgo e di quelle accanto il fiume...*”.

Le piene del fiume Crati ebbero cadenza annuale e provocarono i danni più ingenti alle strade e ai ponti. In particolare, la piena del 29 ottobre 1789 determinò il crollo parziale del Ponte San Domenico, del quale non rimane “*... che il solo arco grande attaccato alla città*” (Andreotti, 1869).

L'anno successivo si registrò un'altra piena che minacciava nuovamente il quartiere dello Spirito Santo.

Dalla documentazione archivistica emerge una profonda consapevolezza delle criticità territoriali; infatti, nel 1790 il canonico Luigi Maria Greco segnalava i numerosi danni causati dalle piene al quartiere dello Spirito Santo e alla Chiesa omonima. Pertanto, qualche anno dopo fu costruita una grossa massa di fabbrica per rinforzare le fondamenta della Chiesa e arginare il fiume (*Not. Giovanni Casini, n. 299, 1790, c.2, allegato all'atto del 18 giugno 1800*).

Ben note erano anche le ragioni del cattivo corso dei fiumi e delle acque sull'altopiano silano. A tal proposito, nel 1792, il giudice Zurlo scrisse: “[...] *Il terreno della Sila generalmente è molto leggero e miserabile [...]. I fiumi vi scorrono ancora tanto tortuosamente che si perde una gran quantità di terre. Sarebbe facile darle un corso più regolare, tantopiù che i fiumi sono piccoli, e lungi dal recar danno, potrebbero essere di molta utilità, ma i possessori de' fondi vicini non se ne prendono alcuna cura [...]*”. (Archivio di Stato di Cosenza, Demanio Silano, b. 72, fasc. 415).

Da questi documenti si comprende la perspicacia di analisi ed il rigore metodologico con cui i tecnici dell'epoca individuavano il rapporto tra alluvioni e caratteristiche morfologiche che si andavano delineando anche in virtù dei cambiamenti indotti per effetto delle opere compiute nel corso degli anni.

Altre inondazioni si verificarono nel 1800 e 1833. Dopo il distruttivo terremoto del 1835, la città fu investita dalle piene nel settembre del 1839 e del 1842.

Un atto del 1842 contiene la relazione dell'Ing. Todisco, il quale individuò le cause principali della situazione di degrado del territorio e dell'alto livello di rischio per gli abitanti dei quartieri Spirito Santo e Pignatari: il disboscamento dei monti circostanti aveva provocato l'elevarsi del greto del fiume e la riduzione dell'altezza degli argini, dovuta al continuo accumulo di materiale eroso. Da qui il pericolo dei ponti storici - in particolare il ponte San Lorenzo - che durante le piene venivano ostruiti. In particolare, il ponte San Lorenzo - ostacolava il corretto defluire del Crati, il quale in corrispondenza di esso rigurgitava, inondando i quartieri circostanti. Inoltre, l'ulteriore argine in pietrame realizzato sulla sponda destra qualche anno prima non risultava sufficiente a contenere le acque in alveo.

Nel 1848, il progetto di abbattimento e ricostruzione del Ponte San Lorenzo, redatto dall'Architetto Clausi, venne accolto dalle autorità competenti (Figura 3-2).

Nelle osservazioni preliminari vengono descritte le cause dei danni causati dalla piena: “*Tre sono le cause principali de' guasti che il Crati arreca colle sue inondazioni ai quartieri che attraversa,*

*cioè il dissodamento delle terre in pendio situate nelle gronde superiori, la tortuosità del suo letto e l'angustia della luce dell'attuale ponte San Lorenzo. Quanto alla prima delle accennate cause, spetta alle ottime autorità preposte all'Amministrazione della Provincia di apportarvi un riparo; la seconda viste le circostanze locali, non è delle forze di questo Comune di ovviarla. Della terza solamente mi occuperò". (Archivio di Stato di Cosenza, Intendenza di Calabria Citra, Opere Pubbliche Comunali, b. 13, fasc. 289).*

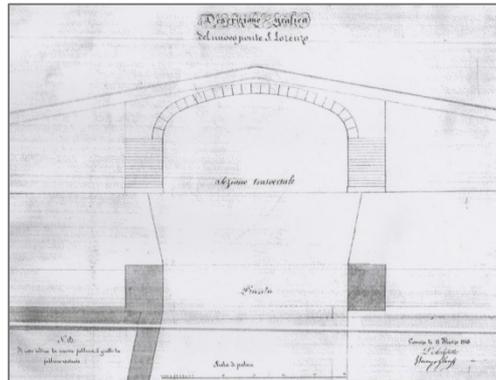


Figura 3-2. Progetto del nuovo ponte san Lorenzo, redatto nel 1848 dall'arch. Clausi nel 1848.  
Intendenza di Calabria citeriore, opere pubbliche comunali b/13 fasc. 289

Nella relazione si sottolinea che “[...] le dimensioni cardinali dell'edificio si sono determinate convenientemente all'indole del fiume per quanto l'han permesso le circostanze locali. Si è però riconosciuto indispensabile di rialzarlo per palmi 18 sul livello del ponte esistente. Per la figura del arco si è prescelta una ovale a tre centri come la più atta a facilitare il passaggio delle acque al di sopra delle imposte. La cattiva località relativamente alla giacitura de' due tronchi di strade laterale al ponte mi ha costretto a confermare il dorso di questo culminante nel mezzo, anziché orizzontale. La strada che attraversa il ponte non essendo di natura rotabile, la pendenza longitudinale de' due suddetti tronchi si è fissata al 20 per cento; essa però potrà modificarsi a seconda delle circostanze locali in modo che si arrechi il menomo danno possibile alle contigue fabbriche. Conformemente alle idee del sullodato Ingegnere Sig. Todisco si è ancor proposto un argine in fabbrica sopracorrente al ponte, il quale colla sua direzione segnerà la porzione di giardino de' Signor Renzelli che deve tagliarsi per ingrandire la sezione del fiume. Il suddetto argine avrà coll'asse del ponte la stessa inclinazione della massa esistente nella opposta riva.

*Onde impedire che le acque del fiume nelle sue escrescenze entrassero nello spianato suinnanzi al ponte sottocorrente a questo si è proposto un muro d'ala, il quale verrà prolungato sino all'incontro delle casette che esistono nello spianato suddetto e chiuderà così interamente l'adito al fiume; e perché non resti impedito l'esito alle piovane che si raduneranno nello spianato*

*medesimo, si collocherà una valvola nel muro in parola, la quale in tempo di piena sarà mantenuta chiusa dalla pressione delle acque del fiume, e si aprirà per la pressione opposta delle piovine innanzi ad esse radunate, allorché l'acque del fiume andranno a decrescere".*

Il 26 settembre 1860 alle 22.30 il Crati inondò nuovamente i quartieri Spirito Santo, Pignatari e Sant'Agostino, raggiungendo l'altezza di 21 palmi (circa 5.5. m) nelle aree più grandi e di 31 (circa 8 m) nei vicoli più stretti.

Nel 1869 il Ponte San Domenico fu nuovamente distrutto dalla piena. La necessità di innalzare e prolungare gli argini dei fiumi Crati e Busento passò inosservata, e la piena del 1881 aggravò la situazione già precaria (Figura 3-3).



*Figura 3-3. Cosenza, fine 800. Fiume Crati e le due sponde ancora non delineate, che oggi sono: via lungo Crati "Donato Bendicenti" (a destra), via lungo Crati "Dante Alighieri" (a sinistra). A destra il rione Massa, in alto palazzo Arnone su colle Triglio, al centro il vecchio "ponte dei Pignatari", sostituito negli anni '60 dall'attuale ponte San Lorenzo.*

Dell'alluvione del 1903 si hanno informazioni dettagliate. Altre piene si verificarono nel 1905, 1906, 1945 e 1949. Infine, piena del 1959 è stata l'ultima ad interessare il ponte San Lorenzo e l'area circostante, in cui si sono verificati i maggiori danni. Il racconto di questi eventi costituiscono una testimonianza indiretta della volontà dei cosentini a non abbandonare i quartieri, più volte invasi dalle acque.

A seguito di precipitazioni consistenti, il 30 ottobre 1903 il Crati raggiunse la fase di massima piena alle otto del mattino. Dopo sei ore circa anche le acque del Busento abbandonarono l'alveo. La rete idrica fu gravemente colpita. Lungo la sponda sinistra del Crati, la corrente sormontò i muri di sponda, a monte e a valle del ponte San Lorenzo (allora a travata metallica), ed inondò il quartiere Spirito Santo prima per sifonamento attraverso gli sbocchi fognari, successivamente per

tracimazione degli argini innanzi la chiesa del Crocefisso. L'acqua raggiunse un'altezza media di 1.5 m, con depositi di fanghiglia di circa 0.5 m.

A monte del ponte S. Lorenzo, sulla destra idraulica del Crati, la corrente fece crollare un tratto di parapetto della lunghezza di 50 m, e furono interrati i quartieri Spirito Santo, Arenella, Carruba e le aree vicine. In questi quartieri le acque raggiunsero un'altezza media di 2 m e depositi di mezzo metro, allagando abitazioni ed esercizi commerciali. Il quartiere Sant'Agostino subì ingenti danni, poiché qui era situato l'unico mulino della città.

Le acque del Busento distrussero due campate del ponte S. Domenico. Il parapetto a valle del ponte, alla destra del Busento, venne sormontato dalla corrente, che invase il quartiere Fontana Nuova – oggi parte di piazza dei Valdesi e l'acqua raggiunse i 2 m di altezza con depositi di fango di 70 cm. Sulla sinistra del Busento, la corrente fece crollare un tratto di 160 m di parapetto, e le acque si riversarono nel quartiere dei Revocati. La città rimase priva di acqua, luce e di collegamenti diretti fra la città ed il quartiere Rivocati. Le zone suddette sono riportate in Figura 3-4.

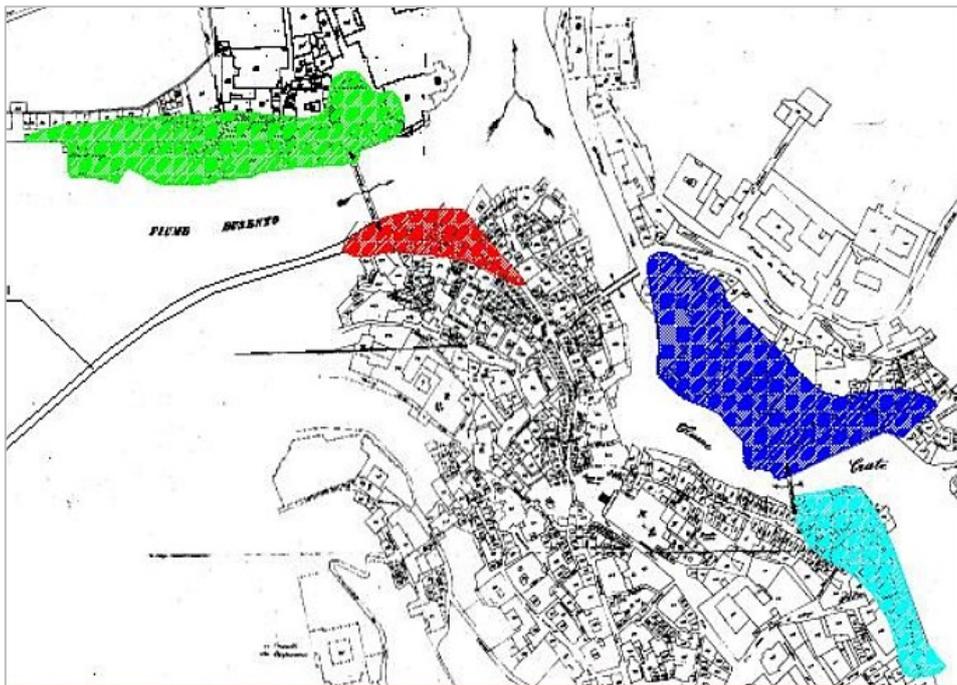


Figura 3-4. Estensione delle aree inondate dall'evento 1903, riportate su carta catastale.

(In verde: sinistra Busento – quartiere rivocati; in rosso: destra Busento – quartiere fontana nuova; in celeste: sinistra Crati – quartiere Spirito Santo; in azzurro: destra Crati – quartiere Reginella (Arenella) ).

L'articolo del quotidiano *Cronaca di Calabria* del 1 novembre 1903 descrive la tragicità dell'evento, a partire dal titolo “*L'immane disastro di venerdì. Cosenza inondata – le immense,*

*spaventevoli piene del Crati e del Busento – I quartieri Rivocati, Massa, Concerie, Spirito Santo sommersi – Case, ponti, giardini, masse crollate – Case pericolanti, I gravissimi danni”.*

Il giorno seguente il Genio Civile organizzò quattro squadre, alle quali fu affidata la direzione dei lavori di messa in sicurezza degli edifici pericolanti e di costruzione di una passerella temporanea sul ponte S. Domenico. Lungo le sponde del Busento, gli interventi di sgombero avanzarono lentamente, a causa della scarsità di manodopera e di controversie tra le squadre del Genio Civile e l'impresa esecutrice.

Non si hanno stime certe della portata di piena, in quanto all'epoca non esistevano ancora gli Annali Idrologici, ma il Direttore dell'Ufficio Tecnico del tempo, l'ingegnere Francesco Camposano, fece un calcolo approssimativo utilizzando la formula degli stramazzi rigurgitati, ottenendo un valore di  $365 \text{ m}^3/\text{s}$ . Egli assume che il fondo si fosse mantenuto identico a quello che si rilevava in magra, eccetto nei punti in cui si verificarono rigurgiti per strozzamenti. Prima di questo evento, il Ponte S. Domenico presentava una travata in legno su due pile intermedie in muratura, che per le dimensioni e insufficiente altezza dell'impalcato era un ostacolo al libero deflusso (Figura 3-5). Per limitare il pericolo delle piene, il ponte fu realizzato ad una sola luce, fu aumentata la distanza degli appoggi e fu necessario innalzare il piano stradale (Figura 3-6).



Figura 3-5. Fiume Busento: Il Ponte S. Domenico prima dell'alluvione del 1903.

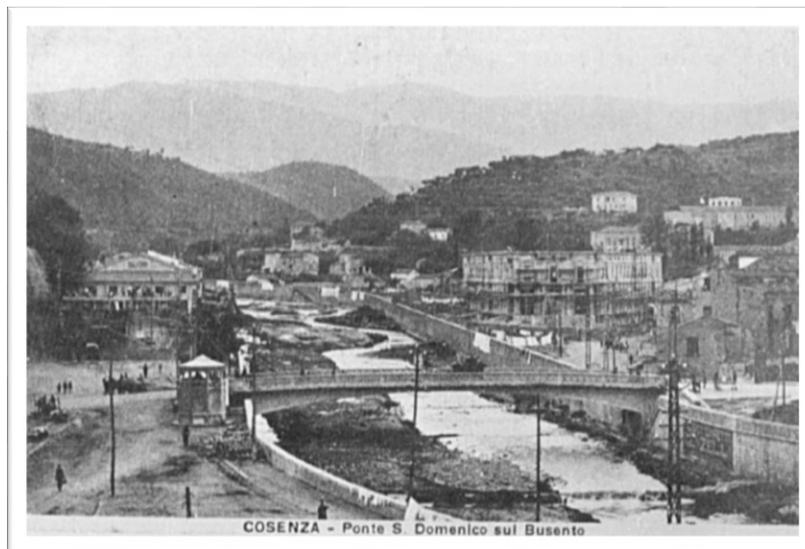
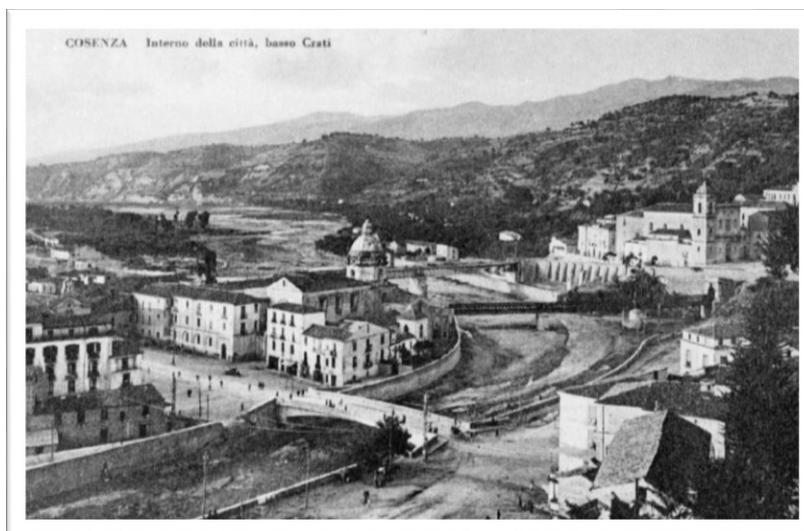


Figura 3-6. Il nuovo ponte S. Domenico e la sistemazione del Busento

Come previsto dalla Legge 22 marzo 1900, nell'aprile 1904, il Ministero dei LL. PP. avviò gli interventi di bonifica e sistemazione fluviale del Crati e del Busento (Figura 3-7), la costruzione dei muri di sponda (indicati nei documenti storici con il termine *dighe*) lungo i due fiumi, il ricoprimento dei terreni a tergo di questi, al fine di evitare il ristagno delle acque di pioggia, la realizzazione di collettori fognari.

In una relazione l'Ingegnere Caposano dispone una serie di interventi che furono realizzati parzialmente: *“Ora è condizione necessaria che lungo i fiumi vengano praticate strade ampie e ben sistemate, e ciò non soltanto nei riguardi alle esigenze della viabilità, ma anche al*

*coordinamento dei piani di ampliamento e di sistemazione edilizia dei quartieri bassi, e al disimpegno del servizio di fognatura”.*



*Figura 3-7. Sistemazione della confluenza, progetto del 1904*

Con un progetto del 31 agosto 1910, il Genio Civile dispose i lavori per l'inalveamento dei due fiumi, tra i ponti di San Lorenzo e di San Domenico. Il piano di massima del febbraio 1912 prevede importanti opere di difesa, in particolare il completamento delle dighe ripuarie del Crati e del Busento e la costruzione dei collettori laterali delle fogne urbane (Figura 3-8). Inoltre, si prolungò l'arginatura del Crati nel tratto di valle e lungo la sponda destra nel tratto compreso tra il ponte Alarico e il vallone di Zumpano.



*Figura 3-8. Cosenza, 1912. Lavori di inalveamento del Crati e del Busento e collettori ripuari delle fognature di Cosenza. (Fotografo R. Gaudio, Archivio Bilotti, Casa delle Culture, Cosenza – 2012).*

Si demolì il Ponte S. Maria del 1554, (detto Ponte Maggiore o anche Ponte Grande), e fu sostituito nel 1914 dall'attuale Ponte San Francesco di Paola, primo esempio nella città di struttura in cemento armato.

Lo sviluppo della città e la necessità del miglioramento delle condizioni di vita (le febbri malariche provocarono numerosi morti, a causa delle acque stagnanti, soprattutto in occasioni delle piene) resero necessari diversi interventi di bonifica idraulica, che proseguirono anche negli anni trenta.

### **3. Descrizione dell'evento del 24 novembre 1959**

Dalla ricerca storico - giornalistica effettuata emerge che l'alluvione del 1959, in ordine temporale, è stata l'ultima ad interessare il ponte San Lorenzo e l'area circostante, in cui si sono verificati i maggiori danni. In particolare, le intense precipitazioni che si ebbero nella notte tra il 23 e il 24 novembre causarono una grande quantità di sedimenti in alveo, tronchi d'albero e detriti, determinando fenomeni di sovralluvionamento nel tratto urbano e la parziale ostruzione delle luci del ponte. Intorno le ore 20, l'esonazione del Crati nel tratto a monte in sinistra ed in destra, determinò l'allagamento di tutta la zona che si estende da piazza Valdesi allo Spirito Santo e dall'altro lato quella compresa tra la Massa ed il Vallone di Rovito (Principato, 2006).

Le strade furono ricoperte da una spessa coltre di fango, che in alcuni punti raggiunse i 2 m di altezza.

#### **3.1. Analisi idrologica e determinazione dell'idrogramma di piena**

Nel mese di novembre 1959 tutta la Calabria fu colpita da violente precipitazioni, che raggiunsero intensità più elevate nei giorni 12 e 13, 24 e 25. In particolare, nella notte tra il 23 e il 24 un nubifragio proveniente da Sud-Est si abbatté sul litorale ionico, sull'altopiano silano e sull'alto bacino del Crati. In quei giorni la Calabria fu interessata per il 48% della sua estensione da piogge superiori a 100 mm. La stazione ricadente nel bacino del Crati maggiormente colpita dall'evento fu quella di Piane Crati, che con 190.8 mm registrò il suo massimo giornaliero nel periodo di osservazione 1921-1970. La stazione di Trenta registrò 134 mm, quella di Domanico 116 mm. Le precipitazioni massime registrate a Cosenza durante l'evento del 24 novembre 1959 furono di: 48 mm in 3 ore; 71,4 mm in 6 ore; 119,2 mm in 12 ore; 122,6 mm in 24 ore.

Vennero asportati dalla corrente tratti di parapetto delle strade parallele al Crati, in particolare in contrada Castagna in località Arenella; acqua fango e detriti invasero i quartieri Massa e Garruba, in destra, e i rioni piazza Valdesi, Spirito Santo e Castagna, in sinistra.

La ricostruzione degli idrogrammi di piena dei fiumi Crati e Busento è stata condotta in riferimento agli studi di tesi di Salituri M., 2001 e Castagnino S., 2014. Per la stima dei deflussi superficiali è stato utilizzato il modello idrologico HEC-HMS®. Il processo di trasformazione afflussi – deflussi ha richiesto la determinazione della pioggia netta e la trasformazione della pioggia netta in deflussi superficiali, al fine di definire la risposta del bacino mediante l'idrogramma unitario SCS. I pluviogrammi orari di seguito riportati sono stati ricavati a partire dalle registrazioni dei pluviografi di Cecita, Cosenza e Domanico (Figura 3-9).

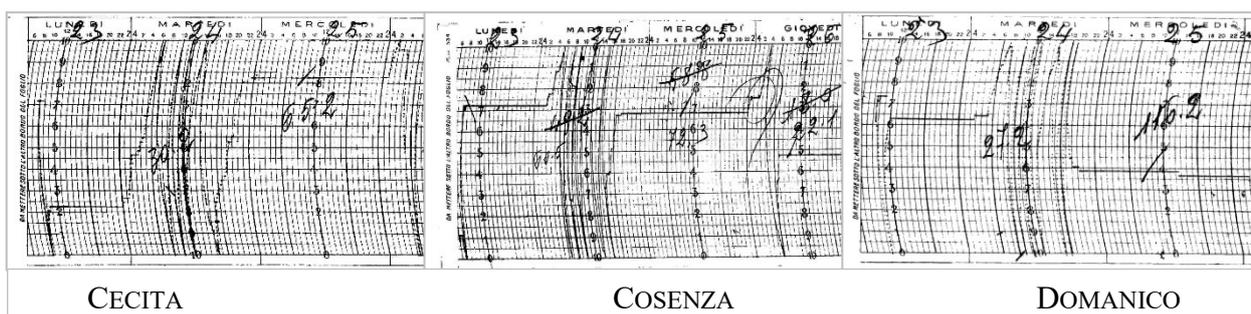


Figura 3-9. Registrazioni dei pluviografi di Cecita, Cosenza e Domanico

Poiché dalle notizie storiche è noto che il Crati esondò intorno alle ore 20 e considerando un tempo di corrivazione di circa 3 ore (Salituri, 2001) si considera il pluviogramma di Domanico, che presenta un massimo intorno alle 17; esso è stato considerato costante su tutto il bacino.

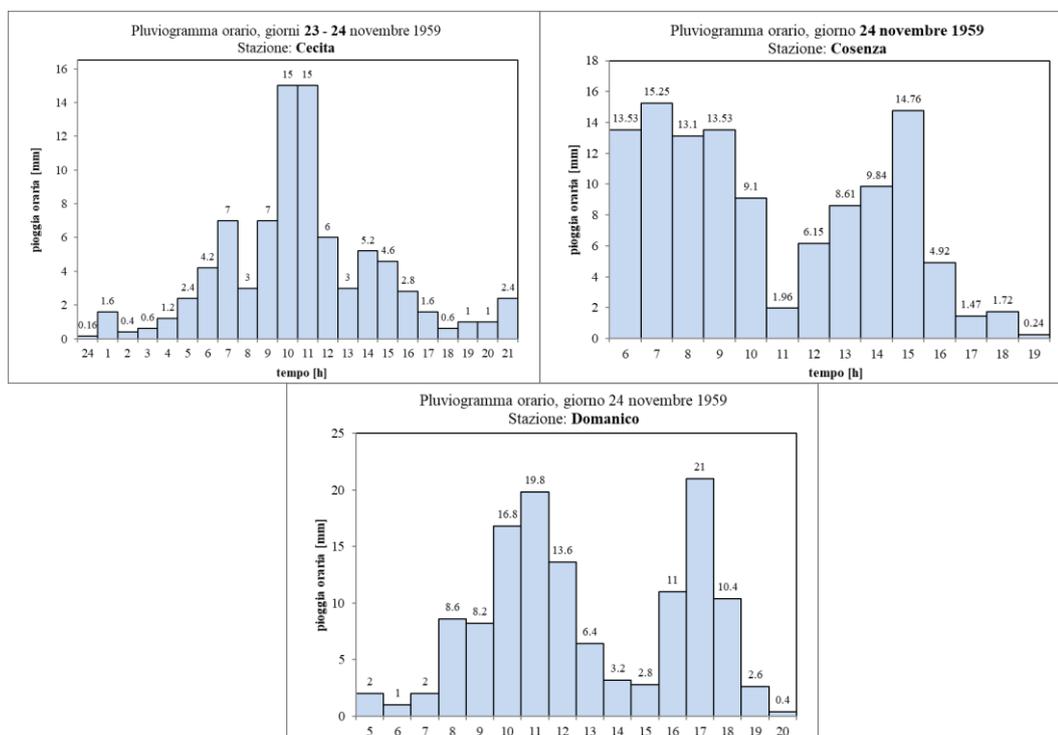


Figura 3-10. Pluviogrammi orari

Per la stima dei deflussi superficiali è stato utilizzato il metodo del *Curve Number*, proposto nel 1972 dal *Soil Conservation Service* (SCS); utilizzando un CN pari a 91 - omogeneo per tutto il bacino - si ottengono portate molto simili a quelle stimate dal Genio Civile e dal CNR (

Tabella 3-1).

	Portate massime stimate [m <sup>3</sup> /s]	
	Crati	Busento
CNR	437	524
Genio Civile	450	525
Modello ( <i>Castagnino S., 2004</i> )	420	520

Tabella 3-1. Confronto delle portate massime stimate (da *Castagnino S., 2014*)

### 3.2. Documentazione giornalistica degli effetti dell'alluvione in città e nei dintorni

Numerosi furono i quotidiani locali e nazionali che diedero notizia dell'evento nei giorni seguenti. La prima pagina del quotidiano *Cronaca di Calabria* del 29 novembre 1959 si presenta con l'articolo *Decine di miliardi di danni prodotti dal terribile nubifragio che ha sconvolto la Calabria*. Il giornalista riporta: “[...] Intere zone agricole trasformate a pantani dalla furia devastatrice delle acque che hanno visto opere, culture e case andate perdute o rese inutilizzabili.

*Ecco perché si giustifica come le nostre autorità e gli uomini politici, oggi tutti tesi a dare il primo contributo d'aiuto e di conforto per i più colpiti dalla tragedia, possono parlare a giusta ragione di pubblica calamità e sollecitare in tal senso provvedimenti di emergenza da parte del governo.*

*In quest'ora triste per la nostra regione può esserci di conforto il senso unanime di solidarietà nazionale, dal Presidente della Repubblica on. Gronchi al Presidente del Consiglio dei Ministri on. Segni, al presidente della Cassa del Mezzogiorno on. Pastore, dal Santo Padre che per mezzo degli Arcivescovi ha inviato la sua paterna parola di conforto e il suo personale obolo per i più colpiti, dalla Croce Rossa che ha inviato coperte ed indumenti, [...].*

*L'odierna calamità, è inutile nascondere, si riflette e ripercuote e lo farà per largo raggio su tutta la vita economica della regione [...].*

Il Senatore Giuseppe Mario Militerni, segretario della Giunta Consultiva del Mezzogiorno, rivolge un appello ai Ministri dell'Interno, dei LL. PP. e al Presidente del Comitato dei Ministri per la Cassa del Mezzogiorno al fine di individuare provvedimenti per fronteggiare l'emergenza, gli strumenti tecnici per la definitiva sistemazione della regimazione fluviale del Crati e degli affluenti e di predisporre un adeguato programma di edilizia popolare per eliminare le abitazioni malsane

nei bassi antigienici dei rioni lungo Crati e lungo Busento. In quei giorni, dunque, scattò una gara di solidarietà per le famiglie cosentine, che nonostante tutto, mantennero viva la loro fede.

L'edizione de *Il Mattino* del 27 novembre racconta: “*Tutti, qui a Cosenza, gridano al miracolo ed ammettono l'intervento diretto della Madonna del Pilerio patrona della città, come fu nel precedente episodio dello inizio del secolo. La tragedia può essere riassunta in questi aridi dati: oltre mille persone senza tetto; cinquecento circa, fra alloggi, negozi, magazzini, ripostigli e terranei allagati completamente; oltre un miliardo complessivo di danni. [...] dinanzi alla enormità ed alla estensione del disastro non ci si capacita come non si siano dovute lamentare vittime: ecco perché il popolo cosentino si dichiara certo e sicuro dell'intervento della Sua alta Patrona*”.

Il settimanale cattolico *Parola di Vita* del 26 novembre riporta: “*Per più di 30 ore la pioggia è caduta rovinosamente, tra tuoni e lampi che han dato al 24 novembre un colore apocalittico. Il Crati e il Busento hanno rotto gli argini e li hanno superati in vari punti, invadendo la zona dello Spirito Santo, della Massa, via dei Martiri e Lungo Crati. Pare che si lamentino alcuni dispersi e forse alcune vittime! [...] Per fortuna i sintomi dell'eccezionale nubifragio si sono fatti sentire fin dalle ore 18; c'è stato il tempo quindi per far sloggiare tanta povera gente (centinaia di famiglie) che altrimenti avrebbe sofferto crudelmente la furia degli elementi scatenati! Insieme con i tronchi d'alberi e con enormi massi, sono stati trascinati dal fiume, animali domestici e macchine [...]*”.

*Il Mattino* del 26 novembre riporta la testimonianza di chi ha vissuto attimi di terrore: “*Un lungo boato ha preceduto l'irrompere delle acque. Poi non abbiamo visto più niente. Tutto era buio. Ci siamo precipitati verso i piani alti delle nostre abitazioni in cerca di salvezza. Abbiamo perduto tutto. Ci restano i soli occhi per piangere*”.

Il *Corriere delle Calabrie* del 28 novembre pubblicò un telegramma del sottosegretario di Stato Dario Antoniozzi, che dava notizia dei finanziamenti assegnati per la ricostruzione delle zone andate distrutte: “*Ministro Lavori Pubblici On. Togni particolarmente sensibile verso famiglie rimaste senza tetto seguito alluvione mi habet comunicato di aver disposto finanziamento eccezionale lire 850 milioni at favore Istituto Case Popolari Cosenza*”.

*Fonte di Calabria* del 29 novembre 1959 aggiunge: “*La furia del nubifragio cha ha devastato la zona di Cosenza Vecchia, non trova precedenti da circa un ventennio. Dalle prime ore del 24 novembre il centro di Cosenza è investito da una tempesta di pioggia accompagnata da fulmini. Le autorità militari temono un disastro; ecco allora l'opera sagace ed intuitiva del comandante del Presidio e della Zona militare di Cosenza, Generale Mario Giordano, che inizia a diramare*

*ordini per uno stato di preallarme e di emergenza agli Enti Militari. Le FF.AA. si trovano pronte a intervenire quando, alle 19 circa, i fiumi Crati e Busento, superando i limiti e rompendo argini, straripano travolgendo con l'acqua impetuosa, abitazioni automezzi e isolando interi quartieri. I soccorsi militari sono tempestivi: vengono inviati automezzi pesanti, soldati comandati da ufficiali, che si prodigano davvero in modo encomiabile al salvataggio di cose e persone [...]”.*

Il signor Luigi Barbarossa, ex calciatore del Cosenza degli anni cinquanta, ricorda che per due giorni fu prigioniero della propria abitazione. *“I viveri – spiega – ci venivano consegnati attraverso la finestra. Avevo una motocicletta nel garage. Quando l'alluvione finì, impiegai 24 ore per liberarla dal fango. Fummo fortunati perché l'ondata si fermò a pochi centimetri dal balcone. A casa nostra arrivarono altre famiglie che avevano perso tutto e si accamparono nell'appartamento. Nei vicoli del rione Spirito Santo ho assistito a terribili scene di disperazione”.* Tra le persone che misero a rischio la propria incolumità per soccorrere la gente, la memoria restituisce onore a due carabinieri che salvarono un giovane legandolo con una fune ad un tronco d'albero, che fu fatto galleggiare fino al primo piano delle case di piazza Valdesi. Il generale Giordano attraversò a piedi le zone allagate per prestare soccorso e riuscì a trovare un telefono funzionante per chiedere aiuto a Roma.

Dal presidente della Repubblica Gronchi arrivò una telegramma in prefettura. Un treno speciale della Croce Rossa arrivò nella stazione di Paola, portando viveri e indumenti; il preside del liceo classico B. Telesio raccolse nell'istituto £. 133.000 da destinare agli alluvionati (Dionesalvi C., 1999).

L'Architetto Fulvio Terzi ricorda che il ponte San Lorenzo fu la causa principale dello straripamento: *“L'esondazione del fiume, avvenuta il 24 novembre 1959 alle ore 20 circa dopo intense precipitazioni occorse nell'arco temporale di due settimane circa, causarono forti fenomeni di erosione con trasporto con trasporto di sedimenti e detriti, oltre che di fasciame e alberature, dal bacino del Crati a monte. La condizione suddetta determinò la parziale ostruzione delle due luci del ponte S. Lorenzo costruito in cemento armato, favorita dalla presenza dei piloni di appoggio centrali. In primo momento si ebbe la tracimazione delle acque nel rione Castagna in sinistra e nel corrispettivo ambito in destra, poi le acque si riversarono dal quartiere dello Spirito Santo fino a piazza Valdesi e dall'altro lato di S. Agostino nel settore basso del rione Massa, inondando vie, vicoli e locali seminterrati e interrati.*

Il ponte San Lorenzo è stato spesso ritenuto responsabile, per le sue discusse dimensioni, delle numerose esondazioni del fiume Crati, e pertanto è stato terreno di scontro politico e di accesi

dibattiti. Agli inizi del novecento esso era a travatura metallica, e venne gravemente danneggiato nel 1943 dai bombardamenti aerei della seconda guerra mondiale. In attesa della sua ricostruzione, venne realizzata una passerella in legno su una travatura in ferro, ma la struttura cedette a causa del traffico autoveicolare. Nel 1950 iniziò la sua ricostruzione, in cemento armato ma senza alcun criterio di sicurezza di tipo idraulico. Nel periodico *Parola Socialista* dell'8 dicembre 1959 i socialisti accusarono l'Amministrazione Comunale (di Democrazia Cristiana) per la non applicazione della Legge Speciale: *“È iniziato sulla stampa e in parte dell'opinione pubblica il processo al ponte San Lorenzo ritenuto responsabile unico dell'allagamento dei rioni a destra e a sinistra del Crati. In quanto abbiamo letto e sentito c'è certamente dell'esagerazione perché la responsabilità di quanto accaduto non può essere attribuita al ponte. Non è improbabile che tra le cause del disastro ci sia anche il ponte, ma non c'è dubbio che si tratti di non responsabilità principale ed essenziale. Perciò se il processo si farà il ponte San Lorenzo dovrà essere rinviato alla competenza del pretore: davanti la Corte d'Assise, a nostro avviso, devono essere rinviati altri imputati. Come per la provincia anche per Cosenza è essenziale la mancata applicazione della legge speciale. Il disastro di Cosenza si spiega con Aprigliano; vogliamo dire che la mancata regolamentazione del bacino dell'alto Crati è la causa principale del precipitare violento degli affluenti su Cosenza. Una situazione normale a monte non può diventare drammatica a valle e a Cosenza; una situazione di completo dissesto a monte e nella zona degli affluenti del Crati determina necessariamente le catastrofi più imprevedibili a valle e a Cosenza. Nel bacino dell'alto Crati la legge speciale non ha operato; deve invece operare subito. Puntare contro il San Lorenzo significa anche questo: non avere mai la sistemazione dell'alto Crati. Forse si avrà un nuovo ponte; ma con il nuovo ponte gli allagamenti continueranno all'altezza dello stabilimento Mancuso e Ferro o attraverso il vallone di Rovito. Con la sistemazione dell'alto Crati si deve pretendere anche la sistemazione del Busento. Perciò prima causa importante e rilevante per Cosenza è la mancata sistemazione a monte. I socialisti l'avevano chiesta da anni. Ma c'è un'altra causa egualmente importante ed è costituita dall'esistenza dei bassi nei rioni popolari. Nessuno ricorda – perché è spiacevole – che i bassi di via Neve e dello Spirito Santo si allagano in settembre per l'acqua che scende da Portapiana. Accusare il ponte San Lorenzo significa anche questo: avere sempre a Cosenza la vergogna dei bassi e dei tuguri stipati di povera gente alluvionata una volta l'anno. Perciò un'altra causa importante ed essenziale di quanto è avvenuto a Cosenza è l'esistenza di quartieri in condizioni di assoluta inciviltà e sotto il livello dei fiumi. [...] Una volta stabilite queste*

*responsabilità si potrà chiamare in causa il ponte San Lorenzo costruito a quel punto su richiesta dell'amministrazione comunale che non volle però provvedere all'abbattimento delle case vicine indispensabile per l'allargamento del ponte [...]”.*

Un articolo pubblicato sulla *Gazzetta del Sud* nei giorni successivi all'evento, descrive: “*Le persone che oggi hanno una certa età e che abitano in Cosenza, ricorderanno le scene di panico ed il terrore che invase tutti coloro che nell'autunno del 1903, essendosi, per le piogge impetuose e prolungate, aumentato in modo imprevedibile il letto dei fiumi Crati Busento, si verificò l'allagamento di tutti i quartieri bassi della città. Allora sia l'uno che l'altro dei due fiumi, erano senza argini di protezione, e salvo qualche muro di sostegno, che spesso crollava minato dalle fondamenta per la furia dell'acque, nell'interno dell'abitato, tutta la zona che andava dall'attuale Lungo Crati L. De Seta, e fino al largo dello Spirito Santo, era soggetta a frequenti, non appena il maltempo prendeva una piega troppo insistente. Vennero poi costruiti gli argini che dalla periferia della città, e precisamente dalla località Cardopiano (all'altezza ove allora era null'altro che verde campagna, ed oggi sorge il Pastificio Lecce) attraverso tutta la parte più antica della città, si spingevano fino ad oltre la località della Pietà, al già citato largo dello Spirito Santo. [...] Gli argini costruiti almeno fino ad ora hanno dato in genere ottima prova. Ma cosa è accaduto nella serata di martedì scorso? La spiegazione si presenta sufficientemente chiara a coloro che osservino una pianta planimetrica della città: difatti l'alveo del Crati nella parte a Nord-Est della vecchia città, con gli argini costruiti nel 1914 e il prolungamento eseguito alcuni anni fa, hanno un sufficiente spazio, atto a dare sfogo a qualsiasi volume d'acqua: mentre all'interno e nella parte più vecchia dell'abitato per la naturale conformazione urbana avvicendatasi nel corso dei secoli, per uno spazio ristretto, ha di necessità dovuto assumere un letto più limitato che in alcuni punti non supera i dieci metri. Ora due fiumi della portata continua e soggetti ad un ingente aumento volumetrico, a causa del loro carattere torrentizio, che raccolgono lungo il loro corso una decina di piccoli affluenti (dei quali quelli di Rovito e del vallone dei Sei, quasi all'interno della città stessa) hanno contribuito in poche ore ad aggravare la situazione e si sono prodotti crolli ed allagamenti. L'acqua forzata così nella strozzatura che è tra lo sbocco del Crati delle acque provenienti dal Vallone di Rovito, all'altezza cioè di Via dei Martiri e il ponte costruito nell'immediato dopoguerra per allacciare le due sponde tra Via dei Martiri e Via Abate Gioacchino ha fatto pressione contro i pilastri e il nuovo ponte San Lorenzo, poi ha superato in altezza il ponte stesso che è alto appena tre metri e mezzo dal greto del fiume ed infine si è riversato invadendo le strade limitrofe. Chiunque abbia visto il ponte San Lorenzo (o della Massa) prima*

*dell'inondazione si sarebbe reso agevolmente conto che stante il ristretto spazio tra l'uno e l'altro pilastro (appena pochi metri), nel caso di un aumento della portata dell'acqua esso avrebbe potuto costruire una pericolosa ostruzione al deflusso. Ond'è che tale varco, occluso dal materiale vario trasportato dalla furia della corrente ha fatto presto a formare una specie di barriera contrastando l'acqua che alla fine ha spazzato via le sovrastrutture del manufatto. Allorquando le cose verranno avviate alla normalità occorrerà quindi adottare quegli accorgimenti tecnici affinché il ponte non sia d'ostacolo al deflusso delle acque. E forse, non sarebbe del tutto inopportuna l'idea se esso venisse ricostruito più a valle, e precisamente nel punto ove era ubicato quello in ferro. Anche perché con la demolizione di case poste all'angolo tra il lungo Crati De Seta e la via Dante, si avrebbe a disposizione uno spiazzo dal quale agevolmente si accederebbe al ponte. Il quale, essendo ad una sola tesa, non sarebbe in contrasto alla corrente del fiume come quello attualmente esistente ed avrebbe a disposizione un letto ben più ampio, e la possibilità di un miglior deflusso senza ostacoli [...]. Ma una considerazione si impone e che è alla base di tutto il discorso, e cioè che la prima operazione da fare è quella di dragare il letto del Crati e del Busento, ripristinando le briglie che costruite per regolare il deflusso delle acque dei due fiumi, nel corso della città, sono sommerse da qualche buon metro di materiale che l'acqua nei periodi di maggiore inclemenza del tempo, reca a valle. Abbassato l'attuale letto l'acqua avrà maggiore possibilità di seguire il suo corso, e un nuovo ponte, può benissimo essere eretto ad un'unica arcata a sesto ribassato, evitando così i pilastri ai quali va attribuita la causa di gran parte del disastro”.*

### **3.3. Valutazione dei danni e la sua distribuzione spaziale**

La documentazione fotografica relativa agli effetti dell'alluvione nella città è ripresa dal libro “Kráthis, Letteratura e storia” (Bosco, Cannataro, 2009). Le immagini fotografiche che seguono sono scatti del giornalista dell'epoca Antonio Cannataro, e ritraggono la situazione post evento, i disagi e le criticità, l'entità dei danni. Come si evince dalla documentazione storica e dal materiale fotografico di seguito mostrato, una volta defluite le acque, i quartieri e i vicoli delle aree inondate rimasero sotto uno spesso strato di fango e detriti. Lungo i tratti cittadini dei due fiumi si verificarono danni alla rete fognaria e stradale, alle opere di adduzione. Numerose famiglie furono sfollate, i pianterreni degli edifici e degli esercizi commerciali furono totalmente allagati. Circa duemila i sinistrati, i quali sono stati alloggiati temporaneamente in alberghi e pensioni cittadine. L'Ingegnere capo del Genio Civile del tempo riporta: “Nella città di Cosenza il numero delle famiglie sgomberate si aggira intorno alle 170 unità. I negozi distrutti o danneggiati superano il centinaio; enorme è il numero delle botteghe danneggiate. I lavori di somma urgenza sinora

eseguiti, superano £. 26.800.000 di cui £. 9.000.000 per il ripristino delle sponde del Crati. Una valutazione sommaria delle opere occorrenti per evitare il ripetersi di danni catastrofici nella città di Cosenza... si aggira intorno a £. 3.050.000.000”.

Alcuni telegrammi inviati in quei giorni al Gabinetto della Prefettura di Cosenza (destinati al macero, ma fortunatamente recuperati e conservati presso l’Archivio di Stato di Cosenza) descrivono gli ingenti danni subiti dagli stabilimenti industriali *Mancuso Ferri*, valutabili in 300 milioni di lire, e 100 milioni di lire presso lo stabilimento *Tannini Calabria* (Figura 3-11). Trecento dipendenti rimasero senza un lavoro.

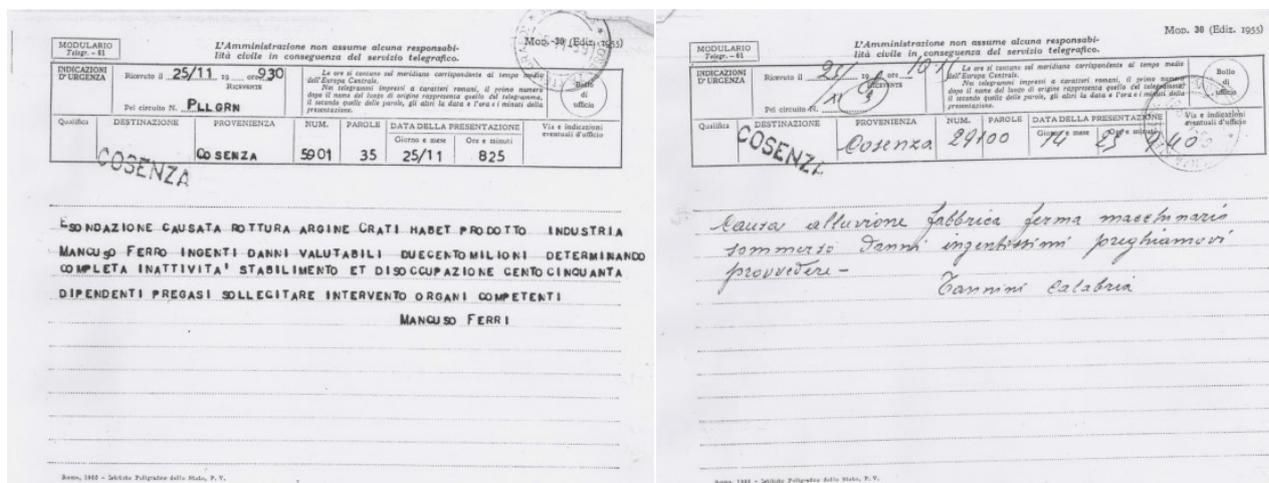


Figura 3-11. Telegrammi inviati in Prefettura dagli stabilimenti Mancuso ferri e Tannini Calabria (Archivio di Stato di Cosenza)

Numerose furono le richieste di intervento ai Vigili del fuoco, in particolare da parte del Direttore delle Poste, poiché gli scantinati della sede centrale erano invasi dal fango (Figura 3-12). Inoltre, comunicò che l’ufficio succursale, sito in Via Spirito Santo era andato distrutto. Infatti, in un articolo del quotidiano *Il Mattino del 25 novembre* riporta che “un grosso pioppo trascinato dalle acque ha abbattuto un piccolo ufficio postale [...]”.



*Figura 3-12. A sinistra: il largo F. Ili Bandiera (la Garruba) e via Giuseppe Marini Serra come si presentano dopo l'alluvione; a destra: il brigadiere Mazzuca davanti l'ufficio postale.*

Le opere di pronto soccorso per la rimozione delle materie alluvionali sulle strade e i rioni Spirito Santo, Piazza Valdesi, Garruba, Massa costarono £. 540.000. Gli schizzi d'acqua evidenti sulle facciate dei palazzi di via dei Martiri (Figura 3-13) dimostrano la forza della corrente.



*Figura 3-13. Via dei Martiri*

Il località Arenella (Figura 3-14) la corrente asportò parte del parapetto, ma raggiunse altezze più limitate, probabilmente perché l'apertura dell'argine consentì il ritorno delle acque in alveo.



*Figura 3-14. Tratto di parapetto asportato dalla corrente in località Arenella*

Le baracche di via lungo Crati andarono distrutte (Figura 3-15), questo diede un duro colpo all'economia locale.



*Figura 3-15. Le baracche di via Lungo Crati investite dalla piena*

Gli alloggi comunali situati in Via Bendicenti a circa 8 m dall'argine destro del Crati – in parte crollato - furono invasi dalle acque per un'altezza di 30 cm, con depositi di fanghiglia e danneggiamento delle suppellettili e dei mobili. Tali alloggi altro non erano che baracche in legno, dichiarate inabitabili dopo la piena. Un gruppo di 18 famiglie occupanti quegli alloggi chiesero l'assegnazione delle nuove abitazioni popolari.

#### 4. Simulazione numerica dell'alluvione di Cosenza

##### 4.1. Caratterizzazione del caso studio

Il Laboratorio di Modellistica numerica per la Protezione Idraulica del Territorio (LAMPIT), del Dipartimento di Ingegneria per l'ambiente e il Territorio e Ingegneria Chimica dell'Università della Calabria, ha sviluppato per scopi di ricerca un modello matematico basato sulle equazioni bidimensionali delle acque basse (*Shallow Water Equations, SWEs*) scritte in forma conservativa. L'analisi idraulica dell'evoluzione dell'inondazione ed i dettagli delle simulazioni sono disponibili sono disponibili sul web ([http://old.regione.calabria.it/abr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=460&Itemid=299](http://old.regione.calabria.it/abr/index.php?option=com_content&task=view&id=460&Itemid=299)) e in successivi lavori (Costabile et al., 2011; Costabile & Macchione, 2015).

Il modello bidimensionale è stato applicato al tratto che si estende dalle aree limitrofe a monte della confluenza fra Crati e Busento fino al ponte di Castiglione, nella zona industriale di Rende, per una lunghezza complessiva di circa 10 km (Figura 3-16). Tuttavia, per l'applicazione della metodologia proposta nel capitolo 4, si è preso come riferimento un'area molto più ristretta. Inoltre, si fa riferimento ad un'ipotetica piena con periodo di ritorno  $T_R=500$  anni.

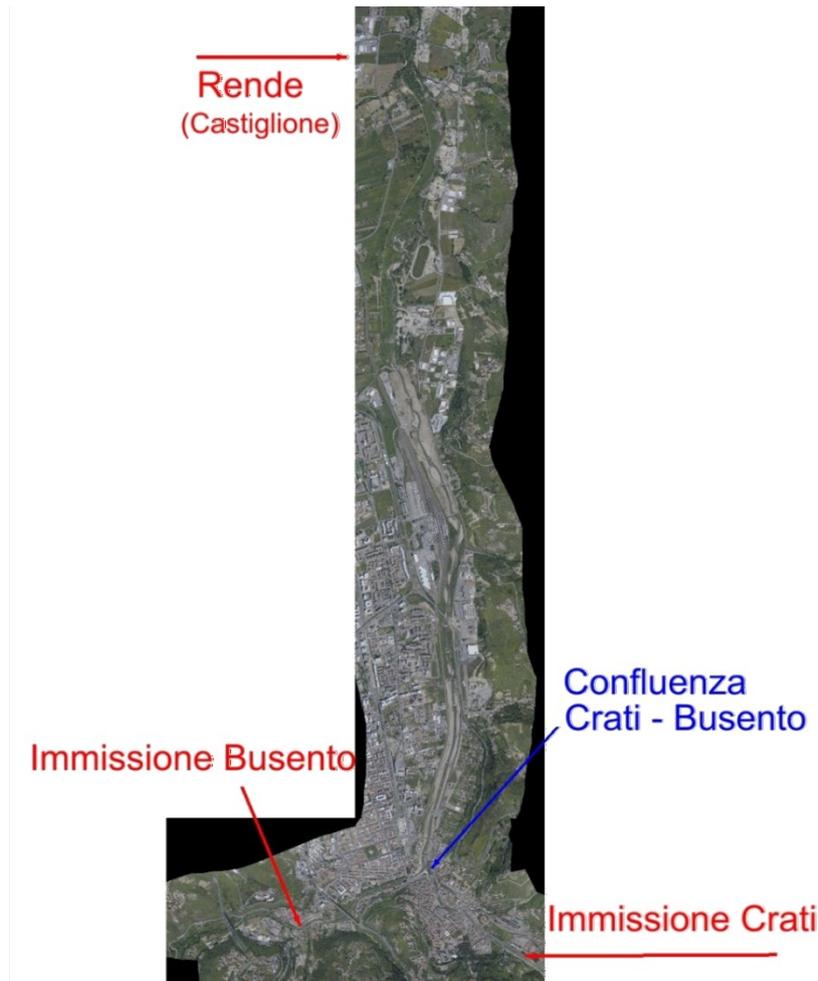


Figura 3-16. Vista planimetrica del tratto oggetto di studio (dal POR Calabria 2000-2006).

#### 4.2. Costruzione del dominio di calcolo

Il primo step per la simulazione numerica bidimensionale risiede nella costruzione di una griglia di calcolo, in grado di descrivere tutte le peculiarità rilevanti dell'ambiente urbano ai fini del calcolo, come gli alvei, le *breaklines* (strade, argini, ecc.), gli edifici, i vicoli, ecc. (Figura 3-17(a)). Per la costruzione della griglia computazionale relativa all'area di studio, sono stati utilizzati i dati topografici ottenuti da un rilievo LIDAR aereo (sensore RIEGL LMS-Q560), avente densità di campionamento di 4 punti/m<sup>2</sup>. Le risoluzioni orizzontale e verticale dei dati sono, rispettivamente, pari a 0.5 cm e 15-20 cm.

Il dominio è stato organizzato utilizzando una griglia non strutturata perché, grazie al suo alto grado di flessibilità e adattabilità, fornisce un'accurata descrizione geometrica del sito anche in presenza di un gradiente topografico significativo o quando si prevede che le variabili idrauliche varino molto rapidamente (Costabile e Macchione, 2015). Esso è più fitto nelle aree di interesse, ovvero nel letto del fiume, presso gli argini e nel centro abitato prossimo al fiume stesso, nei vicoli e nelle

zone ad alto gradiente topografico (per dettagli si rimanda a Costabile e Macchione, 2015). Inoltre, è stato necessario un affinamento manuale del dominio in corrispondenza del rilevato arginale (Figura 3-17(b e c)), al fine di garantire la stabilità del calcolo ed il conseguimento di risultati realistici alla luce della reale topografia del luogo.

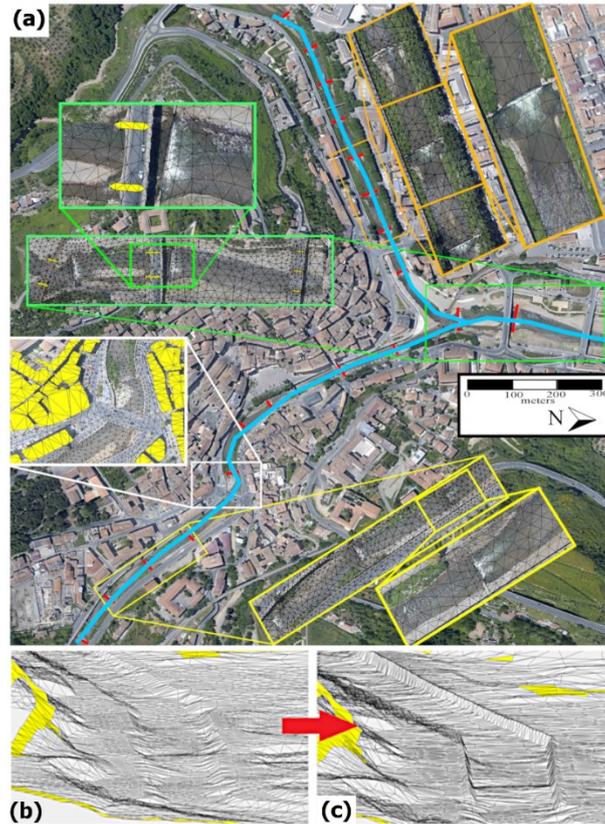


Figura 3-17. (a) Dettagli della griglia di calcolo con l'inserimento di briglie, edifici e ponti nel dominio computazionale. Le linee rosse rappresentano la posizione delle briglie (da Costabile e Macchione, 2015); particolare della griglia in corrispondenza degli argini, prima (b) e dopo (c) le operazioni di affinamento manuale della stessa.

Per la generazione della griglia di calcolo è stato utilizzato il software Aquaveo SMS<sup>®</sup> (*Surface-water Modeling System*), il quale fornisce un file (in formato *.2dm*) contenente le coordinate e l'ID dei nodi che compongono la griglia stessa. A titolo indicativo, le strade principali e gli alvei fluviali principali sono stati discretizzati con celle aventi dimensioni medie rispettivamente di 5 m<sup>2</sup> e 8 m<sup>2</sup>. Gli edifici e le pile dei ponti all'interno della griglia di calcolo vengono identificati assegnando un attributo specifico alle celle corrispondenti all'ingombro planimetrico di questi, affinché fossero riconosciuti automaticamente come aree non sommergibili e, quindi, non interessate dal calcolo. Ciò opera alla stregua di una condizione al contorno interna di parete solida (*solid wall*). Anche per le celle appartenenti al contorno laterale è stata imposta una condizione di parete solida, per via della loro posizione altimetrica che le rende di fatto insommergibili.

### 4.3. Breve descrizione del codice di calcolo utilizzato

Come già sottolineato in precedenza, per la simulazione idraulica sono state utilizzate le equazioni bidimensionali del moto vario in forma completa, integrate numericamente utilizzando il metodo dei volumi finiti (FVM). Tale modello è concepito per ricevere in ingresso una rappresentazione topografica del territorio organizzata secondo griglie non strutturate a maglia triangolare; presenta un'accuratezza del primo ordine nel tempo e nello spazio ed utilizza lo schema di *Roe* per il calcolo dei flussi intercella. La valutazione della pendenza del fondo è condotta a partire dall'equazione del piano, nello spazio R3, contenente la cella di calcolo; la resistenza al moto è valutata mediante un approccio semi-implicito per favorire la stabilità del metodo numerico.

Per i dettagli sulla discretizzazione del termine sorgente si rimanda a Costabile et al., 2015a, b; Costabile & Macchione, 2015.

Le soluzioni numeriche forniscono i livelli di superficie dell'acqua - calcolati nel baricentro di ciascuna cella di calcolo - e il campo di velocità.

In particolare, come condizioni al contorno, all'interno del dominio di calcolo sono state introdotte gli idrogrammi di piena nelle sezioni iniziali dei tratti dei fiumi Crati e Busento; per la sezione estrema di valle del tratto del corso d'acqua è stata utilizzata la disconnessione idraulica generata da una briglia.

Sono state utilizzate condizioni iniziali di alveo asciutto.

Per quanto riguarda la scabrezza, ad ogni cella è assegnato automaticamente un valore specifico del coefficiente di *Manning* in funzione del tipo di copertura del suolo, il quale diventa un attributo di ogni cella cui è assegnato uno specifico valore identificativo (Figura 3-18). I valori dei coefficienti di *Manning* usati per la simulazione sono riportati in Tabella 3-2.

<i>Copertura del terreno</i>	<i>n (s<sup>1/3</sup>/m)</i>
Alveo nudo	0.021
Incolto	0.046
Cespugli e arbusti	0.060
Bosco rado	0.036
Urbano fitto	0.120
Urbano rado	0.100

Tabella 3-2. Coefficienti di Manning per il modello 2-D in un particolare tratto del fiume Crati

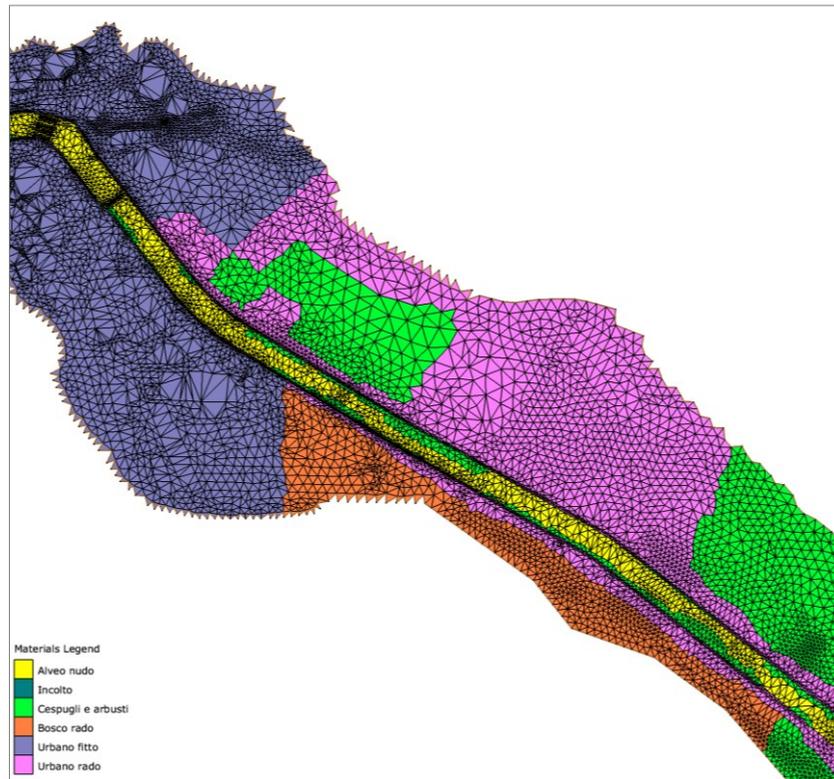
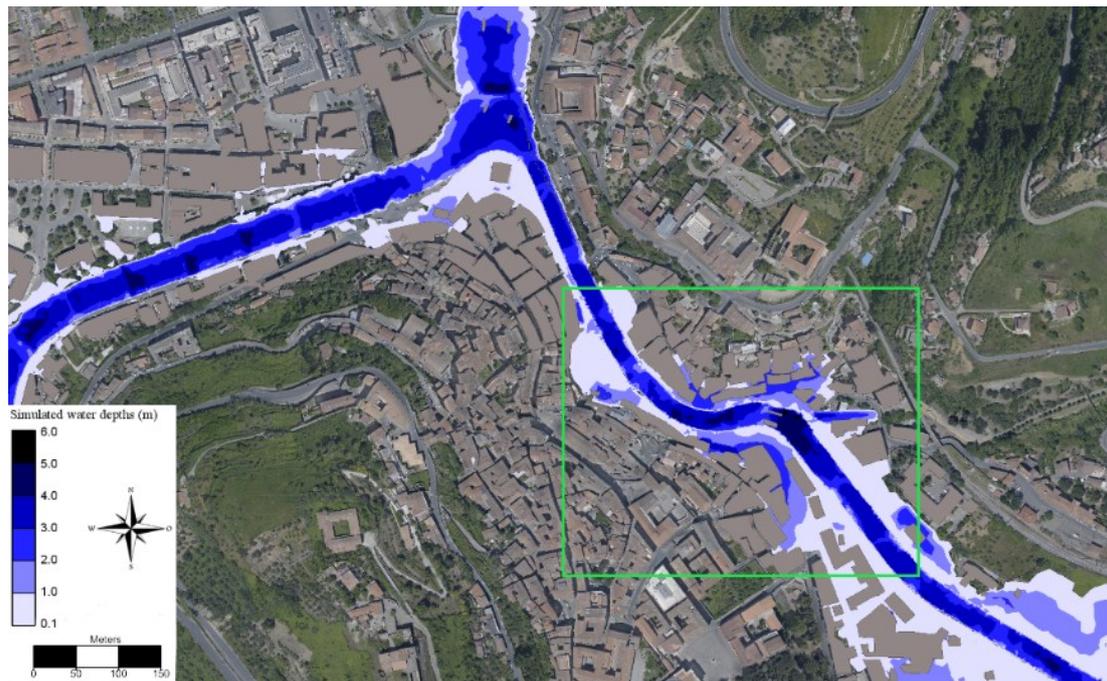


Figura 3-18. Codici identificativi per l'assegnazione automatica del coefficiente di Manning ad ogni cella di calcolo

#### 4.4. Analisi e discussione dei risultati

Come già ribadito più volte, la corretta rappresentazione del rischio di alluvione richiede l'utilizzo di una modellistica fisico-matematica accurata, basata su modelli 2-D completi delle SWEs (Teng et al., 2017). In ambito tecnico, i risultati forniti da questi modelli vengono utilizzati per la redazione delle mappe di pericolosità, che dovrebbero rappresentare, per diversi tempi di ritorno, l'estensione dell'area allagabile, le massime profondità idriche e, ove necessario, le velocità della corrente. La Figura 3-19 mostra, per il caso di studio analizzato, i risultati della simulazione in termini di massime altezze idriche. Le diverse profondità simulate dal modello bidimensionale sono descritte cromaticamente mediante una scala tonale di blu. Quando il *range* è molto grande, anche differenziando gli incrementi alle profondità basse a quelle profonde, il numero di colori diventa elevato e l'occhio non distingue facilmente una classe dall'altra. D'altra parte l'uso di differenti colori non rende più intuitiva la lettura.



*Figura 3-19. Restituzione, mediante la classica rappresentazione di una mappa di pericolosità, dei calcoli idraulici (estensione dell'area inondabile e massime altezze idriche simulate dal modello 2-D) In verde: parte del centro storico preso in esame per la messa a punto delle metodologie proposte nei capitoli successivi.*

## Capitolo 4 – Verso la mappatura 3-D per il miglioramento della comunicazione del rischio idraulico

### 1. Introduzione

Come già ribadito nel capitolo precedente, le tradizionali mappe di pericolosità non consentono un'immediata percezione del rischio ad un pubblico non esperto, in quanto esso non possiede un adeguato livello di consapevolezza dell'impatto di un'inondazione. Di conseguenza, esse possono risultare inefficaci quando si richiede la più larga partecipazione decisionale (Leskens et al., 2014). La comunicazione del rischio influisce anche sulla percezione del rischio (Hagemeyer-Klose & Wagner, 2009; Strathie et al., 2017), poiché essa ha l'obiettivo di sensibilizzare la popolazione esposta ad intraprendere azioni preventive per fronteggiare situazioni di emergenza. Il ruolo della percezione pubblica nello sviluppo di strategie di protezione e miglioramento della resilienza è stato recentemente esaminato in diversi studi (O'Sullivan et al., 2012; Bradford et al., Eiser et al., 2012; Kellens et al., 2013; Brennan et al., 2016; Roder et al. 2016).

La letteratura evidenzia una tendenza generale a sottostimare il rischio da alluvione, principalmente a causa del fatto che 1) le esistenti mappe di pericolosità idraulica o i Web GIS mancano ancora di un buon equilibrio tra semplicità e complessità e di un'adeguata leggibilità e usabilità per il pubblico (Hagemeyer-Klose e Wagner, 2009), 2) persone non esperte presentano difficoltà nella comprensione ed interpretazione dei concetti che sono alla base delle mappe, come il periodo di ritorno (O'Sullivan et al., 2012; Strathie et al., 2017), 3) chi non ha mai avuto un'esperienza diretta di un evento di piena trova difficile immaginare un'alluvione realmente avvenuta (Bradford et al., 2012; Botzen et al., 2009). Inoltre, spesso le mappe non soddisfano le esigenze degli utenti. Ad esempio, dallo studio di Rollason et al. (2018) è emerso che le persone vogliono informazioni relativi ai livelli idrici previsti e gli impatti che essi potrebbero avere su di essi e sulle loro proprietà, eventualmente in confronto agli eventi passati.

È stato anche osservato che gli individui tendono a percepire i pericoli naturali come inevitabili, ritenendo che le conseguenze non dipendano dalle azioni che possono attuare per fronteggiare o mitigare un rischio; in particolare, le persone temono maggiormente i rischi tecnologici (inquinamento ambientale e incidenti automobilistici) rispetto a quelli naturali, quali alluvioni e frane (Salvati et al., 2014). La percezione del rischio di alluvione è generalmente bassa, soprattutto da parte di chi possiede una scarsa conoscenza delle cause di inondazioni o che vivono in aree soggette alle piene non protette da dighe (Botzen et al., 2009 Bubeck et al., 2012).

Un contributo significativo nella comunicazione e percezione del rischio di alluvione può essere fornito da rappresentazioni tridimensionali di scenari di allagamento attraverso i formati emergenti della realtà virtuale, che offrono nuove piattaforme ai processi decisionali con gli *stakeholders* (Voinov et al., 2016). Gli ambienti virtuali possono essere definiti come "*spazi computerizzati da osservare, in cui partecipare e fare esperienza in prima persona*" (Lin et al., 2015). Tale approccio è generalmente inteso come una visualizzazione realistica che intende "*aggiungere drammaticità agli scenari salvaguardando una rappresentazione scientifica accurata*" (Kuser Olsen et al., 2016). La visualizzazione 3-D sta diventando un argomento di ricerca molto attuale in diversi contesti ambientali, rivelandosi efficace nel sostenere i decisori finali (Mendonça et al., 2006; Reda et al., 2013; Zhang et al., 2017) e nella pianificazione strategica ed operativa (Appleton et al., 2002; Palla, 2002; Tress et al., 2003). In particolare, diversi studi si sono incentrati sui processi di pianificazione del territorio e sul cambiamento climatico (Sheppard, 2005; Burch et al., 2010; Sheppard et al., 2011; Pettit et al., 2012), sulla gestione delle risorse marine (Rehr et al., 2014), sull'analisi delle inondazioni costiere (Wadey et al., 2015), sulla valutazione delle conseguenze degli incendi boschivi e sulla gestione degli incendi (Fiore et al., 2009), comunicazione del rischio vulcanico (Haynes et al., 2007).

Per quanto riguarda gli allagamenti urbani, un esperimento di laboratorio ha rivelato che i partecipanti esposti ad uno scenario di allagamento della loro residenza virtuale 3-D hanno avuto una risposta più efficace nella ricerca di informazioni, la motivazione all'evacuazione e all'acquisto di assicurazioni contro catastrofi naturali di questo tipo (Zaalberg e Midden, 2013). Gli ambienti virtuali tridimensionali migliorano l'interpretabilità dei dati ed i processi decisionali (Qui et al., 2017). Nonostante siano ancora limitati gli studi in questo ambito (Van Ackere et al., 2016), si sta iniziando a discutere in letteratura sul valore aggiunto dell'utilizzo degli ambienti virtuali ai fini della comunicazione del rischio da alluvioni (Lai et al., 2011; Zhang et al., 2011; Liang et al., 2015; Liu et al., 2016; Leskens et al., 2017). Ciò dimostra che questo approccio è visto sempre più come un potente strumento per il coinvolgimento di utenti esposti al rischio di inondazione, ed anche per lo sviluppo di *serious games* a scopo educativo (Breuer et al., 2017). Tuttavia, l'acquisizione di competenze nell'ambito delle visualizzazioni tecniche e della comunicazione visiva continua ad essere trascurata nella formazione degli scienziati (McInerny et al., 2014). L'integrazione delle scienze ambientali con la *computer graphics* è considerata necessaria a tal punto che in sta emergendo un nuovo filone di letteratura legato alla visualizzazione nell'assistere lo scienziato ambientale (Rink et al., 2014). Sono stati proposti anche *frameworks* per supportare gli scienziati

a sviluppare visualizzazioni efficaci all'interno di contesti professionali non scientifici (Grainger et al., 2016).

Le precedenti considerazioni acquistano importanza nella gestione del rischio di alluvione. La mancanza di studi in letteratura inerenti a questo aspetto evidenzia la necessità di un dibattito scientifico legato allo sviluppo di procedure pratiche e semplici, eventualmente basate su software libero e open-source, in grado di fornire rappresentazioni tridimensionali di inondazioni in ambienti virtuali con un ragionevole livello di dettaglio.

Tenendo conto dello stato dell'arte delineato finora, questo capitolo è incentrato sullo sviluppo di una *workflow* per rappresentare simulazioni idrauliche bidimensionali all'interno di un ambiente 3-D. La metodologia proposta è stata applicata per la visualizzazione di viste virtuali relative ad una potenziale inondazione del fiume Crati, nel centro storico di Cosenza. La rappresentazione 3-D dello scenario di allagamento urbano simulato è stata eseguita utilizzando il software open source Blender™.

### 2. Descrizione ed implementazione del *workflow*

Il *workflow* mira ad ottenere una rappresentazione di simulazioni idrauliche bidimensionali all'interno di un ambiente di realtà virtuale 3-D, in modo speditivo. La procedura di seguito descritta risulta di facile applicabilità per qualsiasi caso di studio ed è in grado di supportare ricercatori, tecnici e agenzie per la gestione dell'emergenza nella comunicazione del rischio di alluvione. A partire dalla realizzazione della griglia di calcolo e dalla simulazione numerica 2-D dell'evento di piena - già ampiamente descritti nel capitolo precedente - la visualizzazione dei risultati in un ambiente 3-D richiede due *step* principali:

1. ricostruzione e modellazione degli edifici in 3-D, al fine di ottenere una visualizzazione realistica;
2. miglioramento della qualità visiva dell'ambiente urbano virtuale e *rendering* finali.

La Figura 4-1 mostra le quattro fasi del *workflow* proposto ed i software utilizzati per la ricostruzione virtuale di un tratto fluviale prescelto, e include anche il calcolo idraulico.

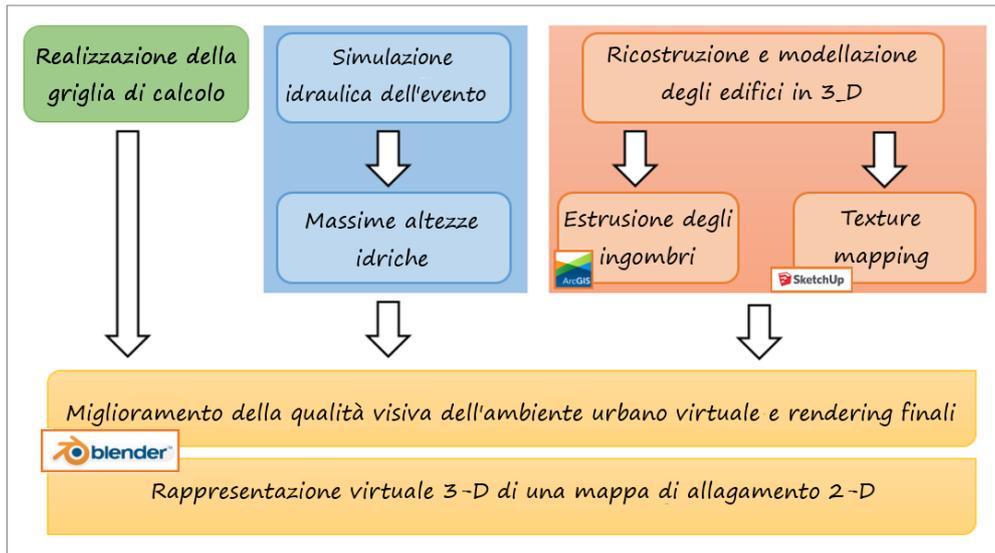


Figura 4-1. Fasi del workflow proposto

## 2.1. Costruzione e modellazione degli edifici

I modelli di città virtuali in 3D forniscono informazioni importanti per diversi aspetti della gestione del rischio (Kolbe et al., 2005). Diversi studi hanno sperimentato la ricostruzione automatica di modelli tridimensionali di edifici a partire da nuvole di punti acquisite attraverso la tecnologia LiDAR aerea (Cho et al. 2004; Vu et al. 2010; Chen et al. 2014), la quale fornisce accurate informazioni sull'altezza e l'ingombro volumetrico degli edifici. Innanzitutto, occorre definire il livello di dettaglio (*Level of Detail*, LOD) del modello 3-D, essendo un concetto importante nei modelli di città. Esso definisce il grado di astrazione di oggetti reali, a seconda della quantità di dettagli inseriti nell'oggetto virtuale in base alle esigenze dell'utente. Il modello di dati open standardizzato CityGML 2.0 definisce cinque differenti livelli standard di dettaglio per gli oggetti 3-D (LOD 0-4), differenziati principalmente dalla complessità delle geometrie. In questa fase di lavoro si è scelto di rappresentare modelli di edifici 3-D con livello di dettaglio LOD1 (Figura 4-2), definito come "il modello di blocchi che comprende edifici prismatici con strutture a tetto piano" (Open Geospatial Consortium, 2012).



Figura 4-2. I cinque LOD definiti da CityGML 2.0.

Il modello LOD1 non contiene informazioni semantiche sulle geometrie ed è coerente con la modellazione idraulica dell'evento di piena. Va ricordato che il modo più preciso di considerare l'influenza degli edifici in modelli basati sulle SWEs, è considerarli come condizioni al contorno interne (vedi, ad esempio, Schubert & Sanders 2012, Costabile & Macchione, 2015), con pareti solide insommergibili ad altezza infinita. Di conseguenza, nella modellazione idraulica non si verificano variazioni lungo lo sviluppo verticale della parete degli edifici. Inoltre, gli edifici vengono realizzati mediante estrusione dagli ingombri planimetrici in conformità alla nuvola di punti derivante da rilievo LiDAR aereo (Figura 4-3(a)); in particolare, si ricava un'altezza rappresentativa dell'edificio calcolando la media delle altezze dei punti LiDAR all'interno

dell'ingombro. Alcuni strumenti di geo-processing disponibili sul software ESRI ArcMAP® 10.3 vengono utilizzati per generare un set di punti campione casuali vincolati dal contorno dell'edificio (Figura 4-3(b)) e con un'elevazione derivata dal rilievo LiDAR. Quindi, il tetto di ciascun edificio è rappresentato da un piano orizzontale (Figura 4-3(c)).



Figura 4-3.(a) Nuvola di punti proveniente da rilievo LiDAR; (b) ingombri planimetrici degli edifici; (c) estrusione degli edifici a tetto piano.

Per fornire un confronto visivo tra livelli idrici e le facciate degli edifici e per dare un aspetto realistico al tessuto urbano, è stata utilizzata la tecnica della *texture mapping*, che ha consentito di proiettare immagini fotografiche delle facciate sulle superfici degli edifici. In questa fase del lavoro, è stato utilizzato il software Sketchup™, che consente di acquisire le immagini di Google Maps Street View, inserendo *texture* sulle facciate degli edifici (Figura 4-4). La *texture* fotografica non fa parte delle specifiche LOD, ma essa può rappresentare caratteristiche non acquisite geometricamente e semanticamente. Gli elementi di costruzione (porte, finestre, ecc.) anche se non presenti geometricamente, sono tuttavia visibili per misurazioni approssimate (Biljecki et al., 2014). La metodologia generale per la generazione di un modello fotorealistico di edificio 3-D mediante *texture mapping* è schematizzato in Figura 4-5).

Nei sistemi di realtà virtuale dunque, l'uso di modelli 3-D basati su Laser scanner ed il *texturing* apre nuove prospettive per la modellazione urbana (Sümer & Turker, 2017).



Figura 4-4. Proiezione di immagini fotografiche delle facciate sulle superfici degli edifici mediante tecnica di texture mapping

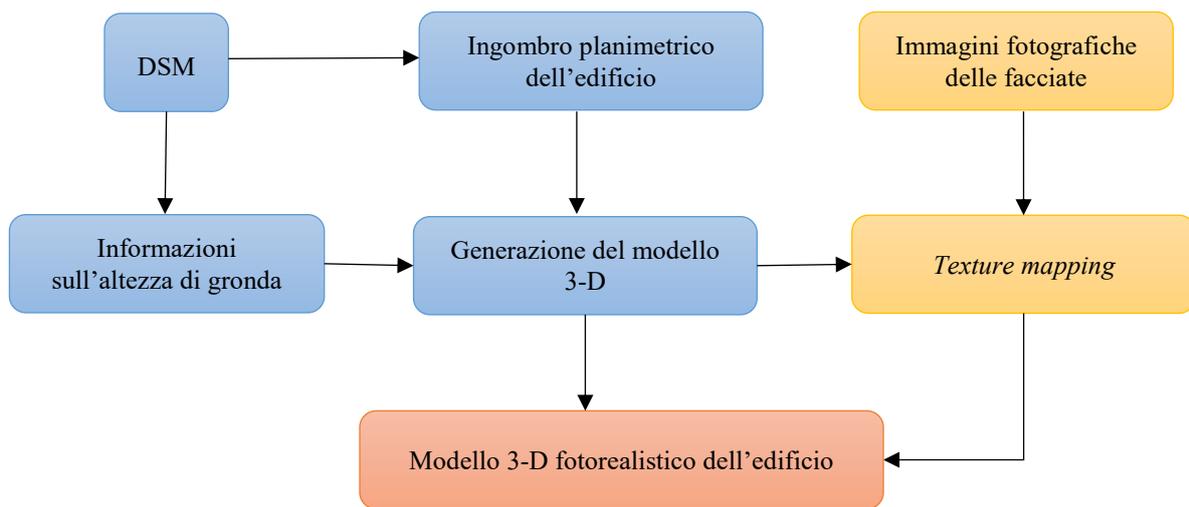


Figura 4-5. Metodologia generale per la generazione di un modello fotorealistico di edificio 3-D mediante texture mapping

## 2.2. Miglioramento della qualità visiva dell'ambiente urbano virtuale e rendering finali

Lo step finale è finalizzato alla realizzazione di realistiche viste virtuali delle zone allagate. Per fornire realismo all'ambiente virtuale, alla griglia computazionale ed alla superficie dell'acqua, occorre assegnare i materiali a ciascun oggetto ed impostare una camera e l'illuminazione della scena. Queste operazioni possono essere eseguite utilizzando un software di grafica 3-D che abbia un motore di *rendering*. Nel caso in esame, gli edifici e le griglie rappresentative del terreno e della superficie delle massime altezze d'acqua sono state importate nel software open-source Blender™. Tale software è di facile utilizzo e, grazie alla sua intuitiva interfaccia grafica (GUI), non richiede necessariamente una formazione specializzata. Uno degli obiettivi dello studio è quello di

diffondere in modo più diretto l'informazione, offrendo uno strumento efficace ai fini della comunicazione del rischio. Inoltre, una *community* internazionale attiva fornisce una grande quantità di materiale online per sviluppatori e utenti, come *tutorial*, video, articoli, *add-on* e *script*. Sebbene Blender™ sia stato inizialmente un software open source popolare per animatori ed artisti grafici, negli ultimi anni è diventato anche uno strumento per visualizzare i dati in diversi campi di ricerca (Andrei et al., 2012; Jorstad et al., 2015; García-Feal et al., 2016; Naiman 2016; Palomar-Vazquez et al. 2017). Su Internet (si veda ad esempio <https://www.youtube.com/watch?v=WgpXzwLuGDo>), ci sono video che mostrano inondazioni urbane provocate da tsunami, simulate con il simulatore di fluidi di basato sul Metodo *Lattice Boltzmann* (LBM). Come evidenzia il manuale di Blender™, il risolutore LBM non è adatto in termini di onere computazionale per domini di grandi dimensioni, bassa viscosità e alte velocità della corrente.

È importante ricordare che per questo studio non viene visualizzato il simulatore fisico di Blender™, ma solo il suo motore di *rendering*, per la rappresentazione di uno scenario di allagamento realizzato con il modello idraulico bidimensionale.

Blender™ ha due motori di *rendering* predefiniti, *Blender Internal* e *Cycles*. Il primo è un motore *biased*, ossia simula il comportamento della luce mediante un algoritmo semplice e facile da calcolare ed introduce artefatti, dando quindi risultati poco fotorealistici. *Cycles* è un motore di *rendering unbiased*, ossia utilizza un modello fisico e ottico molto più accurati e tiene conto delle interazioni luminose tra i diversi elementi della scena. Offre dunque un risultato più realistico, ma richiede chiaramente tempi di elaborazione più lunghi. Rispetto ad altri motori *unbiased*, *Cycles* può utilizzare una scheda grafica in modalità OpenCL (schede grafiche ATI) o CUDA (schede grafiche Nvidia), quindi è possibile ottenere una significativa accelerazione del calcolo (Blender™ Manual, Kent, 2015). In questo studio, è stato utilizzato *Cycles Render Engine*.

La fase pre-operativa consiste nell'importare edifici, terreno e superficie dell'acqua in Blender. Al fine di aumentare il livello di automazione dell'intera *pipeline*, è stato realizzato un *add-on* per importare i dati delle griglie (quote del terreno e superficie libera calcolata) in Blender™, utilizzando l'interfaccia API (*application-programming interface*) di Python.

Un *add-on*, detto anche estensione o componente aggiuntivo, è un modulo che integra il software di ulteriori funzionalità, accessibile direttamente dal menu del software.

Il modulo Python realizzato è il seguente:

```

bl_info = {
    "name": "2dm_mesh_Importer",
    "author": "Rosa De Santis",
    "version": (1, 0),
    "blender": (2, 78, 0),
    "location": "View3D > Add > Mesh > New Object",
    "description": "Adds a new Mesh Object from SMS Aquaveo .2dm grid",
    "warning": "",
    "wiki_url": "",
    "category": "Add Mesh",
}

import bpy
import bmesh
from bpy.types import Operator
from bpy.props import FloatVectorProperty
from bpy_extras.object_utils import AddObjectHelper, object_data_add
from mathutils import Vector

def add_object(context, filepath):
    verts_loc=[]
    faces=[]
    openfile= open(filepath,'r')
    prev=[]
    for line in openfile:
        l=line.split()

        #lettura connessione nodi griglia per la costruzione delle facce
        if l[0] == "E3T":
            n1 = int(l[2])-1
            n2 = int(l[3])-1
            n3 = int(l[4])-1
            face = (n1,n2,n3)
            faces.append(face)
            continue
        #lettura coordinate dei nodi
        if l[0] == "ND":
            x = l[2]
            x = float(x)

            y = l[3]
            y = float(y)

            z = l[4]
            z = float(z)

            vertex = (x,y,z)
            verts_loc.append(vertex)

    openfile.close()
    return verts_loc, faces

#costruzione della mesh
mesh = bpy.data.meshes.new(name="New Object Mesh")
mesh.from_pydata(verts, edges, faces)
object_data_add(context, mesh, operator=self)

from bpy_extras.io_utils import ImportHelper
from bpy.props import StringProperty, BoolProperty, EnumProperty, FloatVectorProperty,
FloatProperty
from bpy.types import Operator
class ImportSomeData(bpy.types.Operator, ImportHelper):
    """This appears in the tooltip of the operator and in the generated docs"""
    bl_idname = "import_test.some_data"

```

```

bl_label = "Import 2dm file"
bl_options = {'REGISTER', 'UNDO'}

width = FloatProperty(
    name="Width",
    description="Box Width",
    min=0.01, max=100.0,
    default=0.01,
)
height = FloatProperty(
    name="Height",
    description="Box Height",
    min=0.01, max=100.0,
    default=0.01,
)
depth = FloatProperty(
    name="Depth",
    description="Box Depth",
    min=0.01, max=100.0,
    default=0.01
)
scale = FloatVectorProperty(
    name="scale",
    default=(1.0, 1.0, 1.0),
    subtype='TRANSLATION',
    description="scaling",
)

# generic transform props
view_align = BoolProperty(
    name="Align to View",
    default=False,
)
location = FloatVectorProperty(
    name="Location",
    subtype='TRANSLATION',
)
rotation = FloatVectorProperty(
    name="Rotation",
    subtype='EULER',
)

filename_ext = ".2dm"
filter_glob = StringProperty(
    default="*.2dm",
    options={'HIDDEN'},
)

# List of operator properties, the attributes will be assigned
# to the class instance from the operator settings before calling.

def execute(self, context):
    verts, faces = add_object(context, self.filepath)
    edges = []
    mesh = bpy.data.meshes.new(name="2dm_mesh")
    mesh.from_pydata(verts, edges, faces)
    object_data_add(context, mesh, operator=self)

    return {'FINISHED'}

# Registration

def add_object_button(self, context):
    self.layout.operator(

```

```

OBJECT_OT_add_object.bl_idname,
text="2dm_mesh",
icon='PLUGIN')

# This allows you to right click on a button and link to the manual
def add_object_manual_map():
    url_manual_prefix = "https://docs.blender.org/manual/en/dev/"
    url_manual_mapping = (
        ("bpy.ops.mesh.add_object", "editors/3dview/object"),
    )
    return url_manual_prefix, url_manual_mapping

def register():
    bpy.utils.register_class(OBJECT_OT_add_object)
    bpy.utils.register_manual_map(add_object_manual_map)
    bpy.types.INFO_MT_mesh_add.append(add_object_button)

def unregister():
    bpy.utils.unregister_class(OBJECT_OT_add_object)
    bpy.utils.unregister_manual_map(add_object_manual_map)
    bpy.types.INFO_MT_mesh_add.remove(add_object_button)

if __name__ == "__main__":
    register()

```

Una volta inserito l'*add-on* nell'editor di testo di Blender, è possibile installarlo in modo da essere abilitato nelle preferenze dell'utente e caricato all'avvio (Figura 4-6). Ciò consente di migliorare il flusso di lavoro offrendo una flessibilità che non si trova facilmente in altri software.

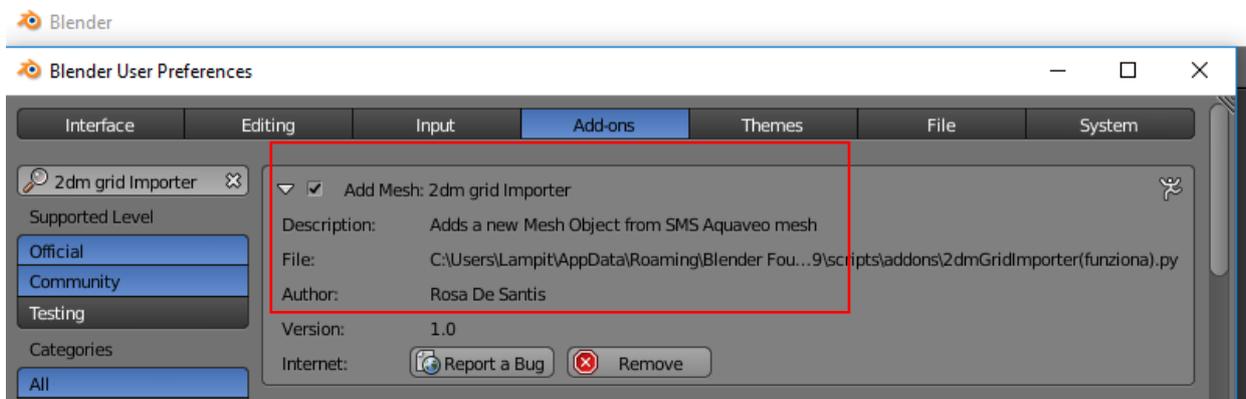


Figura 4-6. Installazione dell'*add-on* in Blender™

Quindi, i materiali e le *texture* vengono creati e assegnati all'ambiente, alla griglia computazionale e alla mesh dell'acqua. Materiali, luci e sfondo della scena sono ben definiti utilizzando una rete di nodi. Questi nodi producono *shader*, colori e ombre.

Sulla griglia del terreno è stata mappata un'ortofoto georeferenziata ad alta risoluzione (8001x8002 pixel, 300 dpi) opportunamente ritagliata nella zona di interesse.

Per la superficie idrica è stato creato un particolare materiale assimilabile ad acqua mista a fango, utilizzando una *texture* procedurale che fornisce un aspetto più increspato alla superficie delle correnti incanalate e più liscia per le aree allagate. A scopo illustrativo, nella Figura 4-7 è rappresentato lo schema dei nodi per la realizzazione di questo materiale.

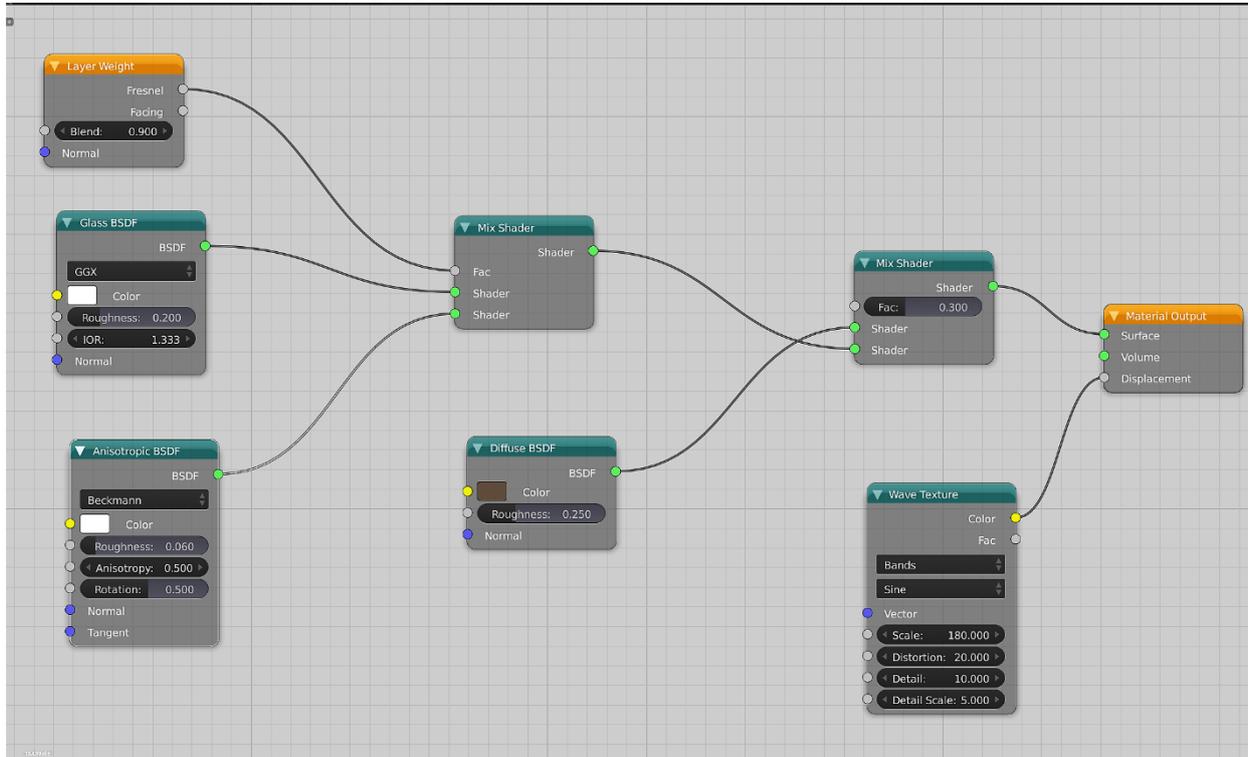


Figura 4-7. Schema di nodi per la realizzazione del materiale assimilabile ad acqua mista a fango.

Lo schema dei nodi consiste nel combinare tra loro gli *shader anisotropici BSDF* e *Glass BSDF* per creare riflessi e rugosità sulla superficie. Il nodo *Layer Weight* produce un effetto *Fresnel* (ossia differenti riflettività che si verificano ad angoli differenti) con il nodo *Mix Shader*. Un nodo *Diffuse BSDF* è usato per dare alla superficie il colore caratteristico dell'acqua fangosa. L'acronimo *BSDF* sta per *Bidirectional Scattering Distribution Function*, cioè funzione di distribuzione bidirezionale della dispersione, e definisce la probabilità che un raggio di luce venga riflesso ad un dato angolo. Il nodo *Wave Texture* riproduce un effetto di increspatura dell'acqua sulla superficie statica, aggiungendo bande procedurali con un profilo sinusoidale.

Poiché il modello bidimensionale non tiene conto di tutti i fenomeni tipici delle correnti torrentizie, l'utilizzo di *texture* per rappresentare la distribuzione del flusso è un artificio grafico adottato per superare tale limite.

### 3. Rappresentazione di uno scenario di allagamento in un ambiente 3-D: risultati

Di seguito si presentano alcuni risultati che mostrano parti della città con e senza allagamento, al fine di dare un'idea del livello di dettaglio che si può ottenere usando la procedura qui proposta. Quindi, la discussione che segue sostiene l'idea che gli output del *workflow* rappresentano un'utile integrazione delle classiche mappe di pericolosità, contribuendo a soddisfare le diverse esigenze che i diversi gruppi di utenti finali (dagli esperti di pianificazione strategica e di gestione dell'emergenza al pubblico) hanno per quanto riguarda le mappe delle inondazioni (Meyer et al., 2012).

Le immagini mostrate in Figura 4-8, Figura 4-9, Figura 4-10 sono tre esempi di una rappresentazione tridimensionale del contenuto informativo della Figura 3-19. In particolare, la Figura 4-8 si riferisce ad uno scenario che si verifica lungo la sponda sinistra del Crati, a monte del ponte San Lorenzo, nel quartiere dello Spirito Santo. La Figura 4-9 e la Figura 4-10 si riferiscono a via dei Martiri. Il contenuto informativo di queste immagini non è esattamente identico a quello della mappa di pericolosità, perché quest'ultima mostra l'inviluppo delle massime profondità, mentre nelle immagini 3-D sono rappresentate le profondità nell'istante delle massime altezze idriche. Tuttavia, a meno che non vi siano rilevanti fenomeni idraulici localizzati, per un'area di estensione limitata, come quella qui esaminata, si può presumere che i due tipi di rappresentazione siano equivalenti.

In ogni caso, si è preferito rappresentare la superficie in un dato istante, anziché l'inviluppo delle profondità massime, per dare un'immagine fisicamente congruente e, quindi, più realistica della superficie dell'acqua. Il confronto con l'immagine della stessa area senza allagamento, usando lo stesso punto di vista, aiuta l'occhio umano a realizzare le profondità dell'acqua nelle diverse posizioni. Le immagini della città senza allagamento sono state prese da Google Earth, nella vista 3D. Le frecce bianche aiutano a localizzare gli stessi oggetti nella figura per facilitarne il confronto. Più in dettaglio, il punto di vista mostrato in Figura 4-9 aiuta a percepire il livello raggiunto dall'acqua e, in relazione alle facciate degli edifici, a comprendere facilmente che l'acqua arriva

quasi al soffitto del piano terra. La Figura 4-8 aiuta a cogliere "a colpo d'occhio" lo stato della corrente del fiume quando inonda le strade adiacenti.

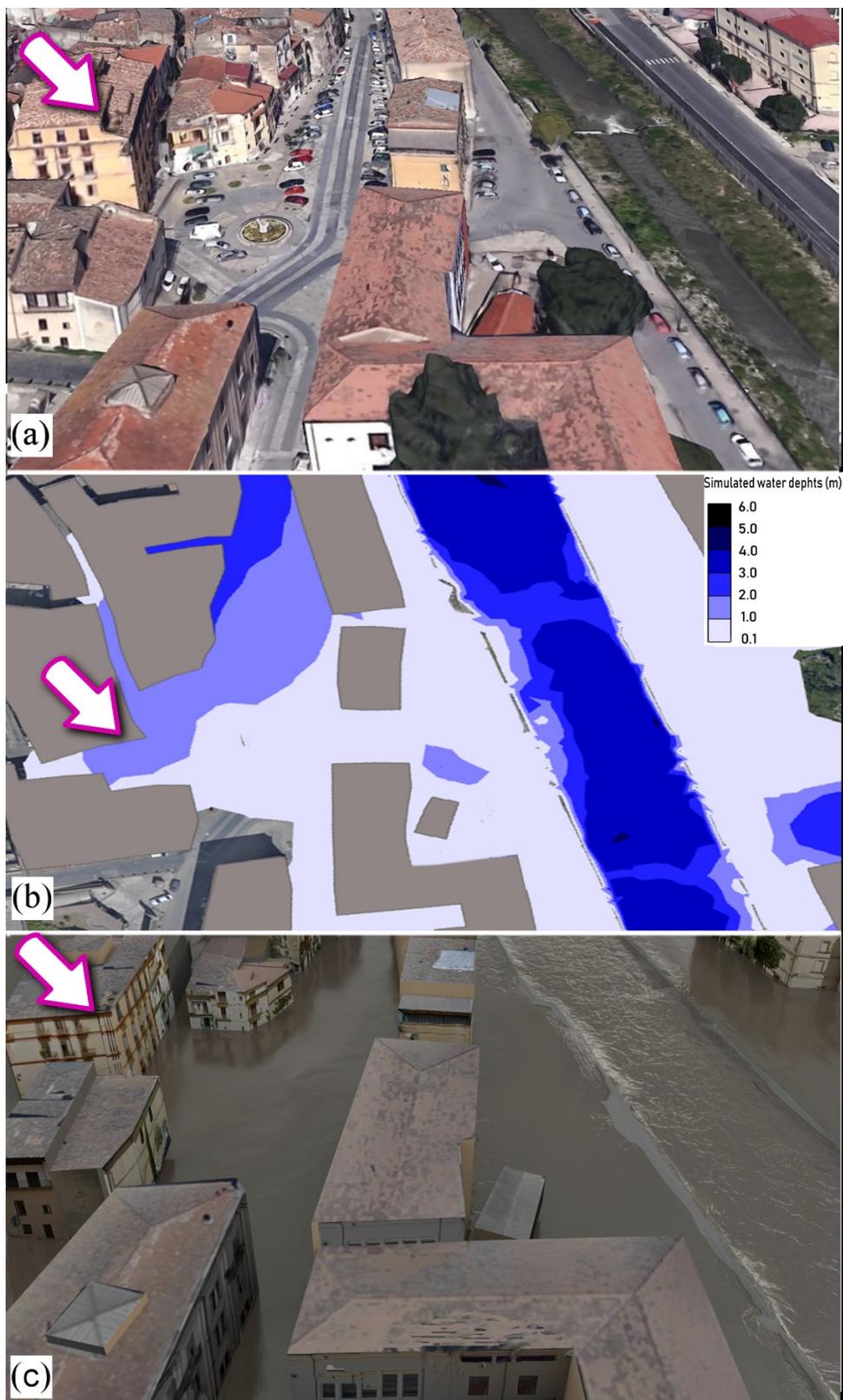


Figura 4-8. Visualizzazione di Google Earth 3D (a), mappa classica (b) ed immagine 3-D (c) per il quartiere Spirito Santo

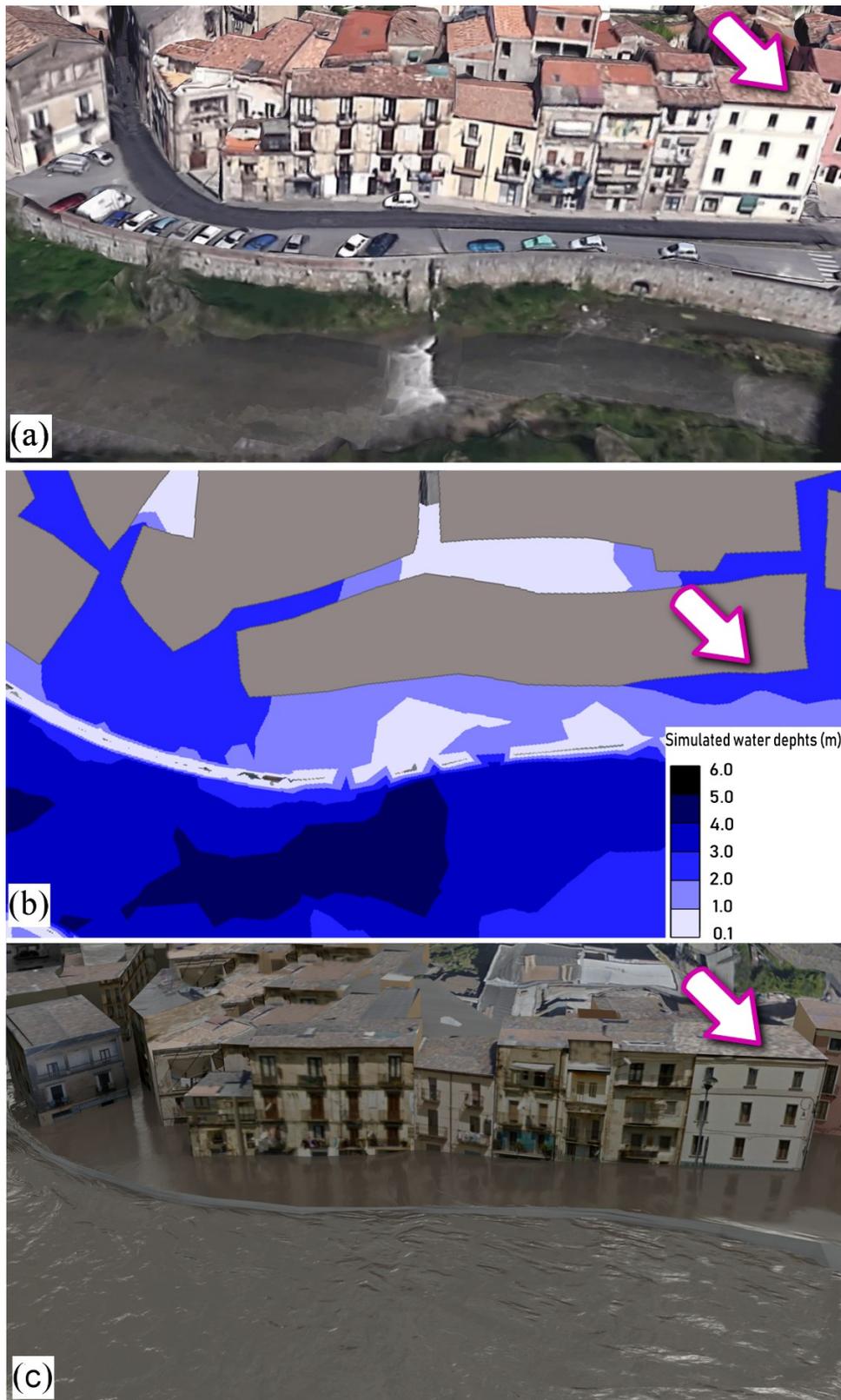


Figura 4-9. Visualizzazione di Google Earth 3D (a), mappa classica (b) ed immagine 3-D (c) per Via dei Martiri

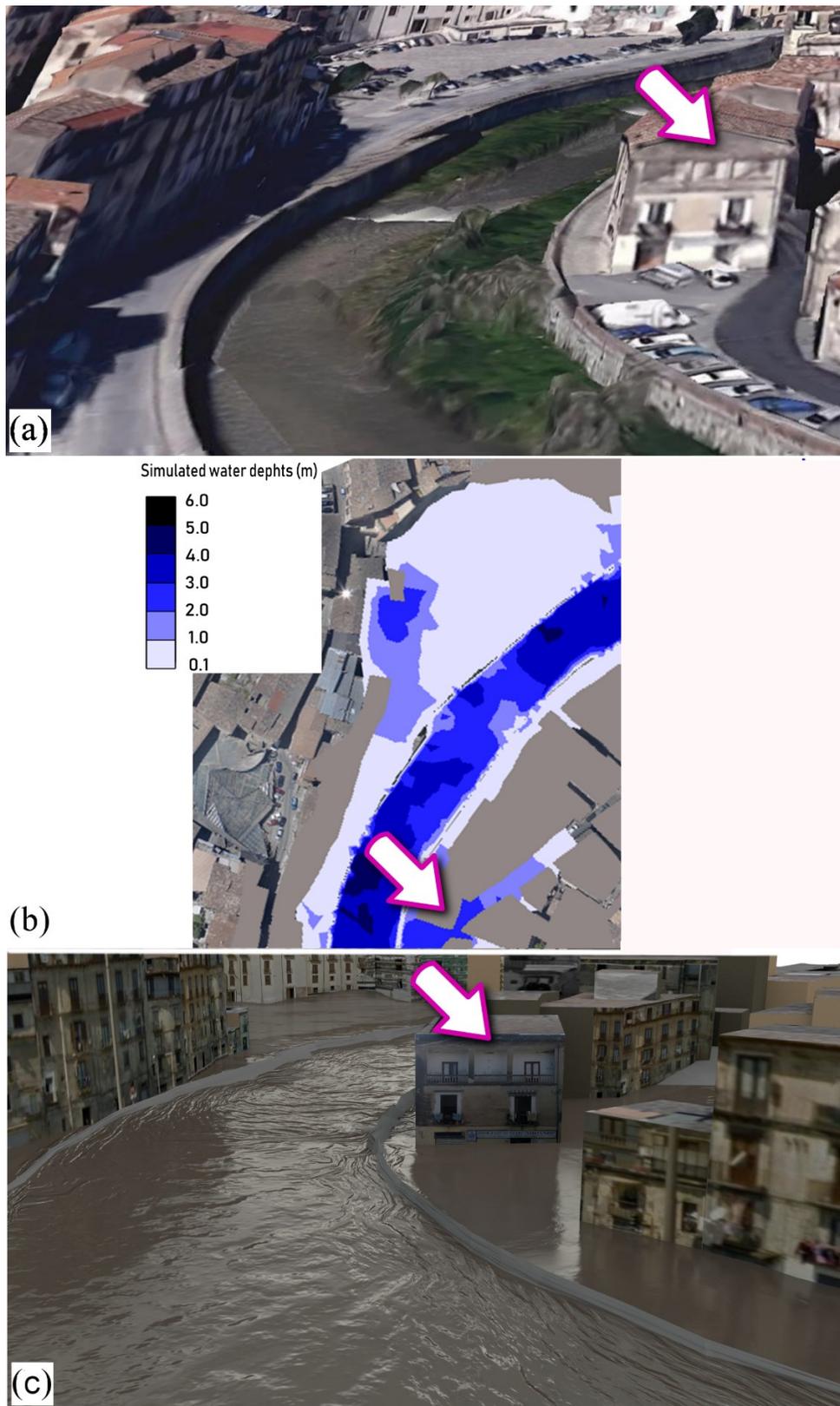


Figura 4-10. Punto di vista diverso della stessa strada rappresentata in Figura 4-9; visualizzazione di Google Earth 3D (a), mappa classica (b) ed immagine 3-D (c)

Questo tipo di immagine può rappresentare una situazione inedita per le persone che non hanno esperienza diretta con le precedenti alluvioni del fiume Crati; esse potrebbero acquisire un maggiore livello di consapevolezza del rischio presente nella zona interessata.

Il *rendering* dell'area urbana ottenuta con questa applicazione è caratterizzato da un livello di dettaglio simile a quello riprodotto da Google Earth per Cosenza. In alcuni casi (si veda la Figura 4-10c), le facciate degli edifici sono presentate con più definizione e meno distorsione rispetto a Google Earth.

#### 4. Considerazioni sul *workflow* proposto

I principali punti di forza della procedura possono essere riassunti in quanto segue:

- diverse fasi del *workflow* sono basate su software libero e open-source. Questi software offrono pieno accesso ai codici sorgente, che sono liberamente modificabili in base ai propri interessi. Ad esempio, Blender™ può essere personalizzato utilizzando Python™ per soddisfare le esigenze dell'utente;
- il *workflow* è caratterizzato da un certo grado di automazione; in particolare, i passaggi completamente automatizzati riguardano a) l'uso di script Python™ per l'importazione in Blender™ dei file che descrivono la griglia che rappresenta la topografia e le superfici libere simulate e b) la generazione degli ingombri degli edifici in ambiente GIS a partire da dati provenienti un rilievo LiDAR aereo;
- l'uso di *texture* consente all'utente di migliorare il livello di realismo senza aumentare la complessità della modellazione dell'edificio. Tuttavia, questo aspetto mostra alcuni inconvenienti, come spiegato in seguito;
- la procedura è relativamente facile da replicare per altri casi di studio e semplice da implementare in tutte le sue fasi, dalla modellazione dell'edificio, alle connessioni tra calcoli idraulici e ambienti 3-D e al *rendering* finale. Non è richiesta alcuna conoscenza specifica in computer grafica;
- il modello urbano e le superfici idriche non richiedono risorse di memoria particolarmente grandi perché la mole dei dati non è onerosa. Ciò consente analisi e gestione rapide dell'ambiente virtuale.

Tuttavia, occorre evidenziare che:

- le facciate degli edifici sono rappresentate da poligoni planari. Questo approccio di modellazione è soddisfacente per le viste ortogonali. Per le viste oblique, le differenze tra il modello 3-D e la reale geometria della facciata riprodotta nelle *texture* fotografiche sono evidenti, soprattutto in presenza di balconi, archi, mensole ed altri elementi aggettanti. L'assenza di parallasse indica la planarità della superficie;
- l'uso di foto non calibrate (cioè senza informazioni sulla posizione della telecamera) comporta problemi di allungamento e distorsione nelle facciate. Le distorsioni dovute alla proiezione prospettica appaiono più evidenti quando l'immagine di una facciata non rettangolare viene proiettata su un piano del parallelepipedo. Ciò deve essere considerato attentamente quando si cerca di zoomare l'immagine al livello del singolo edificio per valutare in dettaglio il livello dell'acqua in prossimità ad esso. In questo caso, potrebbe essere utile eseguire delle scansioni con LIDAR terrestre per realizzare mesh 3-D fotorealistiche degli edifici e degli ambienti (Risse et al., 2018);
- le *texture* fotografiche potrebbero presentare ombre fittizie indotte da oggetti non riprodotti nel modello 3-D;
- la qualità delle *texture* fotografiche è dipende dalla risoluzione della fotocamera utilizzata e dalla posizione dello scatto; in strade strette o trafficate, c'è il rischio di scattare la foto di una facciata con veicoli, vegetazione o pedoni, che vengono così “appiattiti” su di essa;
- l'incapacità delle *SWEs* di simulare ondulazioni secondarie della superficie dell'acqua rende le superfici idriche visualizzate più “lisce” di quanto non lo siano in realtà. Per lo stesso motivo, non si possono visualizzare fenomeni estremamente localizzati con componenti verticali significative di velocità (getti d'acqua o schizzi). Tuttavia, per rendere l'effetto del movimento dell'acqua più realistico, sono state utilizzate *texture* procedurali. In particolare, è stata utilizzata una *texture* più increspata per rappresentare la corrente in alveo, mentre per le aree allagate è stata utilizzata una *texture* che desse l'idea di una corrente con velocità più basse.

Pertanto, la realizzazione del materiale e della *texture* da assegnare all'acqua deve sempre essere finalizzata alla comunicazione dei valori di velocità della corrente e, perlomeno, della torbidità. Ad esempio, se l'acqua è stagnante in una zona allagata, dovrebbe essere visualizzata una superficie idrica più liscia e più riflettente, come mostrato nella Figura 4-10c e nella Figura 4-11b. Tuttavia, al fine di comunicare come in una stessa area potrebbero cambiare le velocità della corrente (ad

esempio in caso di tracimazione di un argine), potrebbe essere prodotta un'altra immagine, che mostra l'arrivo del fronte d'onda usando una *texture* molto più increspata, per dare l'idea che è in atto una fuoriuscita delle acque dall'alveo. Il confronto tra fotogrammi relativi a passi temporali consecutivi aiuterebbe le persone a percepire meglio l'arrivo rapido ed improvviso del flusso che potrebbe portare a una situazione caratterizzata, per qualche tempo, dall'acqua stagnante e quindi da una strada inaccessibile. In questo senso, le immagini ben costruite possono fornire informazioni aggiuntive rispetto alla classica mappa di pericolosità.



Figura 4-11. Punto di vista diverso del quartiere Spirito Santo: confronto tra l'immagine di Google Earth 3D (a) e la vista 3-D (b)

Trovare un metodo migliore per visualizzare le simulazioni delle acque basse in base rappresenta una sfida importante.

I metodi di *texture advection* (Jobard et al., 2000; van Hoesel, 2011; Liang et al., 2015) sono ampiamente utilizzati per la visualizzazione del campo di flusso, in quanto è possibile ricostruire le onde ad alta frequenza che si conformano alle direzioni del flusso simulato. Tuttavia, tali metodi non sono stati trattati in questo studio.

### **5. Prospettive: in che modo le rappresentazioni 3-D possono integrare le mappe di rischio di alluvione per soddisfare le esigenze di diversi gruppi di utenti finali nella gestione del rischio**

Prima di concentrarsi sulle potenzialità che la metodologia potrebbe avere per gli *stakeholders* e per la popolazione, è importante chiarire che le viste virtuali prodotte non possono sostituire le mappe di pericolosità, poiché queste ultime riportano l'involuppo di risultati numerici, mentre le immagini 3-D rappresentano la situazione in un singolo istante temporale, in prossimità del picco. Ovviamente, non è detto che le due cose necessariamente coincidano. Tuttavia, questo limite potrebbe essere superato utilizzando vari *frames*, in diversi intervalli di tempo della simulazione, che possono essere utilizzati per la realizzazione di un filmato mostrante l'evoluzione della piena. Tenendo presente le considerazioni esposte nel paragrafo precedente, il valore aggiunto delle visualizzazioni 3-D ottenuti applicando il *workflow* qui proposto può essere riassunto come segue.

#### ❖ *Catturare l'attenzione delle persone*

L'analisi delle figure 4-8, 4-9, 4-10 consente di sottolineare diversi vantaggi associati all'uso della visualizzazione 3-D e, in particolare, di fornire una risposta su come catturare l'attenzione delle persone (Maidl & Buchecker, 2015).

Poiché non ci sono foto storiche che possano documentare lo scenario che potrebbe verificarsi in quest'area durante un evento di alluvione, queste visualizzazioni tridimensionali sono in grado di rappresentare le conseguenze di un evento di alluvione a tutte le generazioni, soprattutto a quelle che non hanno vissuto un evento di questo tipo. In tale contesto, la comunicazione visiva del rischio basata sulla grafica 3-D è uno strumento efficace per l'esperienza personale in aree a rischio raramente colpite da pericoli, come ritenuto necessario in letteratura (si veda ad esempio Lindell & Perry, 2003).

#### ❖ *Percezione del rischio*

I benefici della rappresentazione visiva tridimensionale possono essere ulteriormente apprezzati nei due dettagli mostrati in Figura 4-12 e in Figura 4-13 (per il punto di vista, si veda la Figura

4-9), riferiti a Via dei Martiri. In particolare, le figure di cui sopra si riferiscono alle facciate mostrate alle estremità sinistra e destra, rispettivamente, della Figura 4-9.



Figura 4-12. Dettaglio della visualizzazione 3-D lungo via dei Martiri (vedere l'estremità sinistra della Figura 4-9(a) e lo stesso dettaglio sulla classica mappa 4-9(b)).



Figura 4-13. Dettaglio della visualizzazione 3-D lungo via dei Martiri (vedere l'estremità destra della Figura 4-9(a) e lo stesso dettaglio sulla classica mappa 4-9(b)).

Sebbene vi siano degli inconvenienti associati all'uso di questa procedura per la rappresentazione accurata dei livelli dell'acqua a ridosso degli edifici, come descritto nel paragrafo precedente, è chiaro che le figure 4-11 e 4-12, rispetto alla mappa della pericolosità mostrata in Figura 3-19, potrebbero aggiungere ulteriori informazioni sull'interazione tra livello idrico e beni pubblici-privati e meglio comunicare l'entità dell'allagamento in quell'area. Ad esempio, le persone che vivono in quegli edifici possono rendersi approssimativamente conto se il livello massimo di allagamento può raggiungere i balconi o se è semplicemente limitato al piano terra. Inoltre, la percezione della praticabilità dell'ingresso dell'edificio, delle strade e dei vicoli che circondano l'edificio è immediata. Considerando questi benefici in termini di una migliore comprensione dei problemi legati alle inondazioni, le tecniche di visualizzazione proposte potrebbero essere annidate in sistemi di informazione sulle piene in cui il modulo di visualizzazione è l'elemento chiave per rendere i dati più accessibili e comprensibili per il pubblico (Demir & Krajewski, 2013). Va notato, tuttavia, che le due immagini si riferiscono ad aree allagate al di fuori dell'alveo e la percezione che si ottiene è quella di acqua quasi stagnante. Più problematica sarebbe stata la visualizzazione di una corrente che interagisce con alte velocità sulle facciate dell'edificio.

❖ *Pianificazione e preparazione dell'emergenza*

Le immagini precedenti mostrano come Cosenza potrebbe trasformarsi durante un evento di inondazione, evidenziando che tutte le strade vicino al fiume sono impraticabili, con livelli idrici che arrivano fino ai piani terra degli edifici. Pertanto, questo tipo di comunicazione visiva del rischio di alluvione contribuisce allo sviluppo di una migliore pianificazione di emergenza anche perché facilita l'identificazione delle vie di evacuazione, dei punti di raccolta, del numero di persone che dovrebbero essere evacuate e così via. Questo tipo di output può essere integrato nei modelli di simulazione numerica, in modelli di valutazione delle infrastrutture e nei modelli di pianificazione dell'evacuazione in un unico sistema che porta a uno schema completamente automatizzato per la preparazione alle emergenze, come mostrato da Akbar et al. (2013), che hanno utilizzato l'output del modello salvato in formato *KML* visualizzabile in Google Earth come supporto nei sistemi di decisione.

Inoltre, figure come queste aiutano il pubblico a rendersi conto del comportamento da adottare in caso di alluvione: per sopravvivere al primo piano o sul tetto, per esempio, o se è necessaria o praticabile l'evacuazione. Questo aspetto è essenziale perché è stato dimostrato che in molti casi le persone sembrano essere consapevoli del rischio a cui sono sottoposte, ma non si comportano secondo tali percezioni e preoccupazioni (Mysiak et al., 2013). Pertanto, il *workflow* qui discusso potrebbe fornire indicazioni importanti su come i cittadini dovrebbero comportarsi in caso di alluvione.

### ❖ *Supportare la stima del danno alluvionale*

La stima delle conseguenze associate all'evoluzione dell'inondazione è più facile perché l'immagine è vivida e realistica. In particolare, le visualizzazioni 3-D come queste possono essere particolarmente utili per la stima del danno (Liu et al., 2017). Inoltre, tali dati potrebbero favorire un approccio di validazione dei risultati della simulazione di inondazione 2-D concentrandosi sull'esposizione alle alluvioni e sulle analisi delle perdite a scala di singolo edificio (Zischg et al., 2018). Come è noto (Messner et al., 2007), queste analisi possono essere eseguite a diverse scale: macro-scala, meso-scala, micro-scala. Nell'ultimo di questi casi, ad esempio, i danni vengono calcolati per singole proprietà mentre l'analisi alla meso-scala considera aree per diverse destinazioni d'uso (aree residenziali, aree industriali e così via) e vengono utilizzate le curve di profondità-danno (si veda ad esempio Garrote et al., 2016). È abbastanza ovvio che le immagini mostrate nelle figure 4-8 – 4-12 potrebbero fornire ulteriori elementi di valutazione poiché mostrano approssimativamente i livelli massimi dell'acqua in relazione sia ai locali commerciali o ai magazzini, principalmente situati al piano terra, che agli appartamenti privati ai piani superiori.

Sebbene queste immagini possano fornire informazioni aggiuntive per un'analisi caso per caso, è possibile ottenere una stima migliore dei danni da alluvione solo utilizzando una rappresentazione digitale tridimensionale e geometrica di tutti gli aspetti di un edificio in un singolo modello di informazioni, utilizzando, ad esempio, il cosiddetto modello BIM (*Building Information Model*) dell'edificio, come recentemente dimostrato da Amirebrahimi et al. (2016).

### 6. Conclusioni

Oggi, vi è una crescente necessità di presentare i risultati delle simulazioni idrauliche di eventi di piena in un formato che aumenti la percezione del rischio, al fine di sensibilizzare ed incoraggiare la popolazione esposta ad attuare azioni preventive e ad essere preparata per le situazioni di emergenza. A tale scopo, l'uso di rappresentazioni tridimensionali di alluvioni attraverso gli scenari virtuali sembra essere un'utile integrazione delle classiche mappe di pericolosità da inondazione, perché consentono al pubblico, ai professionisti e ai decisori finali di analizzare visivamente le conseguenze di un allagamento. Per questo motivo, una competenza di base nelle tecniche di visualizzazione 3-D per la comunicazione del rischio idraulico sembra non essere più evitabile per chiunque lavori nel campo dell'analisi del rischio di alluvione.

In questo capitolo è emerso un nuovo problema di ricerca relativo agli standard minimi di visualizzazione 3-D in termini di un ragionevole equilibrio tra la complessità intrinseca dell'informatica della realtà virtuale e la necessità di arrivare a un livello di rappresentazione virtuale dei risultati delle simulazioni che sia sufficiente a dare una corretta percezione di ciò che può accadere.

Il presente capitolo illustra la prima fase dell'attività di ricerca, che non punta a simulare la dinamica dell'acqua con simulatori di fluidi integrati nei *render engines* (si veda ad esempio Winkler et al., 2018), ma punta a rappresentare i classici risultati che sono conseguiti dagli ingegneri idraulici in un ambiente virtuale 3-D. Il risultato a cui mira la ricerca non è la realizzazione di immagini suggestive tipiche dei *video games*, piuttosto all'immediatezza dell'informazione comunicata con le immagini qui presentate e alla correttezza idraulica della rappresentazione 3-D dei risultati dei calcoli ottenuti con le *Shallow Water Equations*, perché sono lo strumento che gli ingegneri utilizzano per l'*assessment* del rischio alluvionale. Ovviamente, si è tentato comunque di rendere quanto più realistica la rappresentazione del risultato.

La novità della ricerca sta dunque nella rappresentazione 3-D dei risultati di questo tipo di calcoli. È infatti con le equazioni 2-D che gli ingegneri idraulici calcolano le massime profondità, che vengono poi rappresentati nelle classiche mappe di pericolosità. Tuttavia, dalla letteratura è emerso

che la mappa tradizionale può rivelarsi uno strumento poco intuitivo e non immediato per la comprensione dei risultati numerici. Di qui la novità di questo lavoro: trasformare le classiche mappe 2-D in rappresentazioni 3-D.

In particolare, è stata utilizzata un'ipotetica inondazione del centro storico di Cosenza come caso di studio.

Per quanto riguarda la visualizzazione tridimensionale dei risultati idraulici, il *workflow* qui proposto si basa sull'utilizzo di diversi software e un *add-on* realizzato in linguaggio Python, consentendo un certo grado di automatizzazione della procedura. In particolare, ArcGIS™ è stato utilizzato per l'estrazione di poligoni 3-D da dati LIDAR, mentre Sketchup™ è stato utilizzato per migliorare il realismo delle facciate del modello di edificio attraverso la tecnica della *texture mapping*. Il cuore della procedura per migliorare la qualità della visualizzazione è l'uso del software open-source Blender™, che non è mai stato usato prima per la visualizzazione scientifica delle inondazioni simulate attraverso le equazioni complete delle acque basse.

I risultati mostrati evidenziano un significativo grado di realismo. Il *rendering* del modello di città realizzato con questo approccio ha dimostrato la stessa qualità che è attualmente possibile ottenere con Google Earth per la città di Cosenza.

Gli output di visualizzazione 3-D ottenuti utilizzando il *workflow* possono supportare mappe classiche per soddisfare le esigenze di diversi gruppi di utenti finali nella gestione del rischio di alluvione, con riferimento alla stima del danno da inondazione, alla percezione del rischio, alla pianificazione e alla preparazione dell'emergenza.

I principali punti di forza del *workflow* sono legati all'uso di software libero e open-source e alla presenza di passaggi completamente automatici nella procedura. Inoltre, non sono richieste particolari conoscenze della *computer graphics* o risorse significative della memoria del computer. L'idoneità della procedura per rappresentare in dettaglio i particolari delle superfici d'acqua a livello dei singoli edifici dipende dalla risoluzione delle *textures* utilizzate per gli edifici, dalle dimensioni delle celle della griglia di calcolo e dall'interpolazione dei risultati numerici calcolati per ciascuna cella. Le celle dei risultati numerici, se non particolarmente infittite, generano incoerenze se si tenta di ingrandire l'immagine fino al livello del singolo edificio.

## Capitolo 5 – Trattamento ed utilizzo di dati laser a scansione terrestre per la costruzione di modelli urbani 3-D realistici

### 1. Introduzione

Come già emerso nel capitolo precedente, l'utilizzo delle visualizzazioni 3-D può avere un ruolo importante non solo in termini di percezione, pianificazione e gestione dell'emergenza, ma anche nell'ambito del *Flood Damage Assessment* (FDA), come evidenziato da Amirebrahimi et al. (2016) e Zhou et al. (2016).

I benefici della FDA possono estendersi ad un'ampia gamma di applicazioni, tra cui la mappatura del rischio, la valutazione della vulnerabilità, la valutazione finanziaria del danno, ecc. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, i diversi modelli di valutazione del danno (Merz et al., 2010) mettono un forte accento sugli edifici, data la loro importanza sia da un punto di vista economico sia per i requisiti di integrità strutturale richiesti per la sicurezza umana (Van de Lindt & Taggart, 2009).

Le curve di danno forniscono un metodo efficace per applicazioni su larga scala (Merz et al., 2004) ma sono ritenute non idonee alla micro-scala ed in particolare laddove è richiesta una valutazione caso per caso dell'impatto dell'alluvione sui singoli edifici (Pistrika & Jonkman, 2010). Questa limitazione è principalmente dovuta all'inefficacia di questi metodi nel catturare e incorporare una rappresentazione completa di ciascun edificio e sulla mancanza di dettagli sulle parti strutturali interessate dal danno o sulla sua posizione a livello di edificio. Tali informazioni giocano un ruolo importante nel rivelare le fonti di rischio per un edificio. Anche in questo contesto, le visualizzazioni basate sulla realtà virtuale potrebbero dare un contributo concreto nella rapida risposta scientifica ai futuri disastri naturali (Cowgill et al., 2012) consentendo di esaminare rapidamente l'area di interesse in maniera virtuale, senza incorrere a costi significativi.

Nell'ultimo decennio, i metodi di telerilevamento sono stati sempre più utilizzati ai fini della valutazione dei danni. Per ottenere una descrizione tridimensionale e geometrica dell'ambiente di interesse, la tecnologia a scansione laser è emersa negli ultimi anni come fonte principale per l'acquisizione automatizzata di edifici, vegetazione, terreno, ecc. per la possibilità di effettuare misurazioni dirette della topografia superficiale. I tipi di dati utili per tale valutazione includono immagini fotografiche e dati provenienti da LiDAR aerei e satellitari (Li et al., 2008; Womble et al. 2008; Eguchi et al. 2010; Kashani et al. 2014a, b). Tuttavia, a causa della limitata risoluzione ottenibile, gli ambienti virtuali creati utilizzando questi dati possono solo supportare un'indagine topografica su larga scala.

Per analisi a scala locale occorre utilizzare strumenti di telerilevamento ad alta risoluzione ed il laser scanner terrestre è una tecnologia rappresentativa molto sperimentata in letteratura (Olsen et al., 2010; Nettley et al., 2011; Gong & Lin, 2013; Olsen & Kayen 2013; Yim et al., 2014; Chock et al., 2013). Tali studi hanno evidenziato le potenzialità dell'utilizzo dei dati LIDAR ad alta risoluzione per la realizzazione di ambienti virtuali ai fini dell'*assessment*.

Di fatto, la ricostruzione 3-D dell'ambiente con dati LiDAR terrestri sta assumendo un ruolo centrale in un numero crescente di applicazioni che vanno dalla salvaguardia del patrimonio culturale (Remondino & Rizzi, 2010), alla pianificazione urbana, alla valutazione dell'impatto ambientale (Maragkogiannis et al., 2014; Wallace et. Al, 2016), alla preparazione alle catastrofi (Bui et al., 2015) e alla gestione delle emergenze. Il suo utilizzo negli studi sulle inondazioni urbane ad alta risoluzione sarebbe di particolare utilità nei modelli numerici di simulazione delle piene in contesti urbani (de Almeida et al., 2018; Papaioannou et al., 2017; Papaioannou et al. 2016; Thatcher et al., 2016; Sampson et al., 2012; Fewtrell et al., 2011).

Inoltre, la tecnologia scanner laser terrestre è in grado di fornire una rapida ricostruzione degli oggetti scansionati, con migliore qualità e precisione.

Tuttavia, occorre evidenziare che i sistemi a scansione laser terrestre registrano le informazioni dalle facciate degli edifici, ma difficilmente possono raggiungere i tetti degli stessi. A seconda dello scopo del prodotto da implementare, è possibile integrare i dati da acquisizioni aeree e terrestri.

Il presente capitolo propone una seconda tecnica per la realizzazione di un ambiente virtuale 3-D utilizzando nuvole di punti acquisite mediante laser scanner terrestre, in cui visualizzare i risultati di simulazioni idrauliche bidimensionali. Anche in questo caso, è stata considerata un'ipotetica inondazione del fiume Crati, nel centro storico di Cosenza. Questo approccio, più oneroso e complesso rispetto a quello descritto nel capitolo precedente, ha migliorato la generazione di prodotti geometrici 3-D, poiché ha consentito di acquisire tutti i dettagli topografici per generare un modello di città spazialmente accurato e visivamente realistico, che presenta maggiori potenzialità nelle strategie di coinvolgimento dei diversi utenti finali, rispetto al prodotto 3-D descritto nel capitolo precedente.

Il flusso di lavoro è stato sviluppato con l'intenzione che questo metodo possa essere trasferito ad altri casi di studio.

Particolare enfasi è stata posta sulle questioni relative all'acquisizione, alla gestione e all'elaborazione dei dati per la costruzione di un ambiente virtuale geometricamente valido e realistico.

Inoltre, si illustrerà un ambiente interattivo, basato sulla tecnologia *Web-GL rendering*, per la visualizzazione di scenari di inondazione utilizzando nuvole di punti di grandi dimensioni.

Seguirà un'analisi comparativa di prodotti 3-D ottenuti mediante le tecniche proposte in questo studio.

## 2. Acquisizione dei dati

### 2.1. Il Laser Scanner Terrestre e la campagna di acquisizione

Un sistema laser scanner terrestre (*Terrestrial Laser Scanner, TLS*) è un "qualsiasi dispositivo posizionato al suolo che utilizza un raggio laser per misurare automaticamente le coordinate 3-D di una determinata regione della superficie di un oggetto, in un ordine sistematico e ad elevata velocità in tempo quasi reale" (Mills & Barber, 2003). I dati raccolti sono più comunemente noti come nuvola di punti, un insieme di coordinate XYZ in un sistema di riferimento comune che fornisce all'utilizzatore una rappresentazione tridimensionale della superficie rilevata. Essa può contenere informazioni aggiuntive quali l'intensità e/o il colore in formato RGB (Red-Green-Blue).

In generale, la procedura di scansione laser terrestre richiede alcuni passaggi, tra cui: pianificazione del rilievo, scansione, registrazione/georeferenziazione, filtraggio e visualizzazione dei dati.

Prima di effettuare la campagna di rilevamento, è necessario stabilire le varie posizioni di scansione del TLS effettuando una visita preliminare in loco, in modo da catturare i dati su un'estensione spaziale più ampia possibile.

L'acquisizione dei dati è stata eseguita utilizzando lo scanner laser Leica ScanStation P20 (Figura 5-2b). Nella

Tabella 5-1 sono riportati alcuni dettagli sullo strumento e sul modo in cui è stato utilizzato.

<b>Tipologia di ricevitore</b>	Tempo di volo con tecnologia di digitalizzazione della forma d'onda (DFD) ad Ultra-alta velocità				
<b>Precisione di posizione 3-D</b>	6 mm @ 100 m				
<b>Portata</b>	Fino a 120 m; 18% riflettività (range minimo 0.4 m)				
<b>Campo visivo</b>	Orizzontale 360°, verticale 270°; zoom video integrato senza parallasse				
<b>Tempi di scansione e risoluzione (hh:mm:ss)</b>	7 spaziature preimpostate (mm at 10 m)				
	Spaziatura	Livello di Qualità			
	mm	1	2	3	4
	50	00:20	00:20	00:28	----
	25	00:33	00:33	00:53	01:43
	12.5	00:58	01:44	03:24	06:46
	6.3	01:49	03:25	06:46	13:30
	3.1	03:30	06:47	13:30	26:59
1.6	13:33	27:04	54:07	----	
0.8	54:07	1:48:13	----	----	
<b>Camera</b>	Fotocamera digitale ad alta risoluzione integrata con auto-regolazione e zoom video				
<b>Peso</b>	11.9 kg, nominale (senza batterie)				

Tabella 5-1. Riepilogo delle principali caratteristiche tecniche di Leica ScanStation P20 riportate nei documenti del fornitore.

La campagna di rilevamento è avvenuta in due giorni e sono state scelte dieci posizioni di scansione (Figura 5-1) nella zona di interesse. In ciascuna posizione, sono state eseguite una o due scansioni; questi includevano rotazioni orizzontali a 360° dello scanner con angoli verticali diversi. La scelta dei punti di stazionamento dello strumento è stata condotta a seguito di una valutazione della giusta strategia di acquisizione alla luce, della tipologia dell'oggetto da rilevare (nel caso in esame facciate di edifici, strade e argini): trattandosi per lo più di oggetti "aperti", è stato necessario spostarsi parallelamente ad essi per assicurare un'efficace sovrapposizione fra le prese ed acquisire la completa geometria degli oggetti stessi. Sono stati acquisiti un totale di oltre duecento milioni di punti.

L'intervallo medio per tutte le misurazioni era inferiore a 10 m, e in base alle specifiche del prodotto, si può presumere che la precisione sia stata mantenuta al di sotto di 6 mm per i punti registrati all'interno di questo intervallo. Occorre comunque sottolineare che la fase di acquisizione è stata abbastanza condizionata dagli spazi limitati, dalle non ottimali condizioni del traffico veicolare e dalla stretta ubicazione degli edifici.



Figura 5-1. Posizione delle scansioni

## 2.2. Processing dei dati

Le scansioni sono caratterizzate da nuvole di punti che vengono trasferite dalla memoria dello scanner ad un computer per poter essere processate e registrate tra loro. In fase preliminare, generalmente si procede con la pulitura delle stesse, ossia un filtraggio del rumore presente, eliminando dati spuri o legati al disturbo (ad esempio dovuti al traffico veicolare). Ciascuna scansione è caratterizzata da un proprio sistema di riferimento, solidale alla testa dello scanner.

Il processo di scansione si serve del contributo del *software* che assume un ruolo centrale per la realizzazione di prodotti geometrici misurabili. Non è più necessario ricorrere a tecniche di *texturing* manuale, poiché la texturizzazione fotografica e materica è integrata con la geometria acquisita, grazie all'acquisizione diretta di nuvole di punti colorati.

Le diverse fasi di *processing* sono state eseguite con il software commerciale Leica Geosystems HDS Cyclone, che consente di registrare ed operare con nuvole di punti acquisite da alcuni tra gli scanner laser più utilizzati in un unico modello dell'intero sito.

Per permettere la ricostruzione della nuvola di punti globale generata dall'unione di tutte le acquisizioni eseguite, è stato necessario il supporto topografico, ossia sono stati installati dei *target* all'interno dell'area di vista del laser scanner e localizzati tramite un sistema di posizionamento e orientamento satellitare (GNSS). Il sistema di posizionamento satellitare utilizza dati di correzione (misure di codice o fase) per la localizzazione differenziale del sensore di rilevamento, con precisione XYZ di tipo centimetrico (s.q.m. al 95%).



Figura 5-2. Ricevitore GNSS Leica GS15 (a) e Laser scanner terrestre Leica ScanStation P20 (b)

A tal fine è stato utilizzato un ricevitore GNSS Leica GS15 (Figura 5-2b). Tale strumento, inoltre, ha consentito la geo-referenziazione in un sistema di riferimento univoco (nel caso in esame WGS84, conforme al sistema di riferimento del dominio di calcolo utilizzato per la simulazione idraulica). L'allineamento delle scansioni è avvenuto mediante il riconoscimento di *target* battuti dal ricevitore. Soprattutto in aree fortemente antropizzate, la geo-referenziazione diretta è molto importante e l'utilizzo dei sensori satellitari per il collegamento diretto delle nuvole, rappresenta un valore aggiunto del processo di rilevamento territoriale, seppure più oneroso.

La figura 5-3 mostra le diverse fasi operative della metodologia proposta.



Figura 5-3. Fasi operative della metodologia proposta

### 2.3. Visualizzazione dell'ambiente 3-D

La visualizzazione è finalizzata a *"esplorare dati e informazioni in modo tale da comprendere ed intuire dei dati [...] e promuovere nuove conoscenze sui processi sottostanti, basandosi sulla potente capacità degli esseri umani di interpretare"* (Earnshaw & Wiseman, 1992). Dunque, una visualizzazione dovrebbe contenere tutte le informazioni necessarie, senza bisogno di ulteriori spiegazioni. Pertanto, il modo in cui i dati spaziali sono visualizzati è fondamentale per il modo in cui essi vengono utilizzati in un contesto sociale.

La Figura 5-4 mostra il modello 3-D a punti nell'area di studio; esso offre la possibilità di effettuare elaborazioni sfruttando la tridimensionalità a diversi gradi di visualizzazione e le informazioni cromatiche dell'oggetto, al fine di individuarne e mapparne le caratteristiche di maggiore interesse. Il modello è inoltre esportabile in diversi formati (ad esempio *.obj*, *.ply*, *.stl*), molti dei quali visualizzabili e interrogabili mediante *software* open-source. Ciò ha il duplice vantaggio di consentire lo scambio dei prodotti realizzati da soggetti diversi e di contribuire concretamente alla comunicazione del risultato finale. La possibilità di avere il modello tridimensionale in diversi formati consente, inoltre, di integrare lo stesso con altri prodotti derivati da rilievi effettuati in momenti e con strumentazioni diverse (ad es. con dati acquisiti da laser scanner aviotrasportato o mobile).



Figura 5-4. Vista 3-D del modello di punti dell'area oggetto di studio

### 3. Fusione dei dati LiDAR provenienti da piattaforma aerea e terrestre

I sistemi LiDAR terrestri forniscono misure di elevazione più precise rispetto a quelli aerei, a causa di una maggiore densità di punti di campionamento e dell'accuratezza posizionale (Lim et al., 2013; Young, 2010). Questo aspetto è da non sottovalutare nella costruzione dei modelli digitali del terreno, utilizzati nella modellazione idraulica. Ad esempio, laddove vi sono elementi topografici difficilmente riproducibili con i dati ALS, per avere dati di elevazione ad alta precisione potrebbe essere necessario avere un DEM derivato dalla fusione di dati provenienti da LiDAR aereo e terrestre (Tatcher et al., 2016).

Il problema riscontrato in questo studio riguardava la corretta descrizione geometrica dell'argine lungo l'alveo da parte dei dati acquisiti con ALS: come si evince dalla Figura 5-6 a,b, a seguito delle operazioni di interpolazione per la generazione del DEM, l'argine assume forma triangolare in quanto il LiDAR aereo è riuscito ad acquisire un solo punto in sommità dello stesso, per cui è stato necessario fondere i dati acquisiti con le diverse strumentazioni.

I metodi applicabili per fondere i dati da piattaforma aerea e terrestre sono sostanzialmente due: georeferenziando sia i dati da terra sia quelli e aerei in modo separato, oppure utilizzando una scansione come *reference* e rototraslando l'altra rispetto a quest'ultima (Conforti Andreoni et al., 2003). Il sistema elitrasportato fornisce automaticamente dei dati georeferenziati grazie al GPS a bordo; la georeferenziazione di punti rilevati con laser terrestre presuppone, invece, la predisposizione di target artificiali che devono essere rilevati anche con metodi tradizionali ed inquadrati nel detto sistema di riferimento.

L'allineamento delle differenti scansioni è stato eseguito utilizzando l'algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP), proposto da Besl & McKay (1992). Esso si basa su un metodo iterativo, di impostazione puramente numerica, che individua dei punti omologhi presenti in entrambe le nuvole di punti, usando come scansione di riferimento quella aerea (Figura 5-5b). Un'attenta analisi è stata rivolta alle aree di sovrapposizione tra scansione aerea e terrestre. La maggior difficoltà riscontrata ha riguardato l'identificazione di un numero sufficiente di punti ridondanti di sovrapposizione per completare l'allineamento. Per valutare la bontà dell'allineamento è stato utilizzato l'algoritmo differenza punto – punto (*Cloud to Cloud, C2C*), metodo semplice e rapido per la comparazione di nuvole di punti 3-D, che non richiede mesh o raster né il calcolo delle normali alle superfici (Girardeau-Montaut et al., 2005). Nella sua versione più semplice la differenza di superficie è data come la distanza assoluta tra due punti (Figura 5-5a).

L'integrazione dei dati effettuata in questo studio è stata necessaria soprattutto per questioni di visualizzazione. Al fine di non incorrere a visualizzazioni fisicamente inconsistenti, è stato necessario effettuare la simulazione idraulica bidimensionale (con le stesse modalità e criteri esposti nel terzo capitolo) utilizzando un DEM che riproducesse l'esatta forma e dimensione dell'arginatura lungo il fiume acquisita dal LiDAR terrestre, altrimenti la superficie libera calcolata avrebbe "tagliato" l'argine (Figura 5-6 a, c).

Il prodotto finale è un modello digitale del terreno generato dalla fusione di dati aerei e terrestri: esso rappresenta un'ottima integrazione per il rilievo in ambito urbano ed in particolare nella zona di interesse, dove sono presenti elementi topografici difficilmente riproducibili con i dati provenienti dalla piattaforma aerea per via della loro densità di campionamento, ottenendo così un completo, accurato e denso set di dati dell'area.

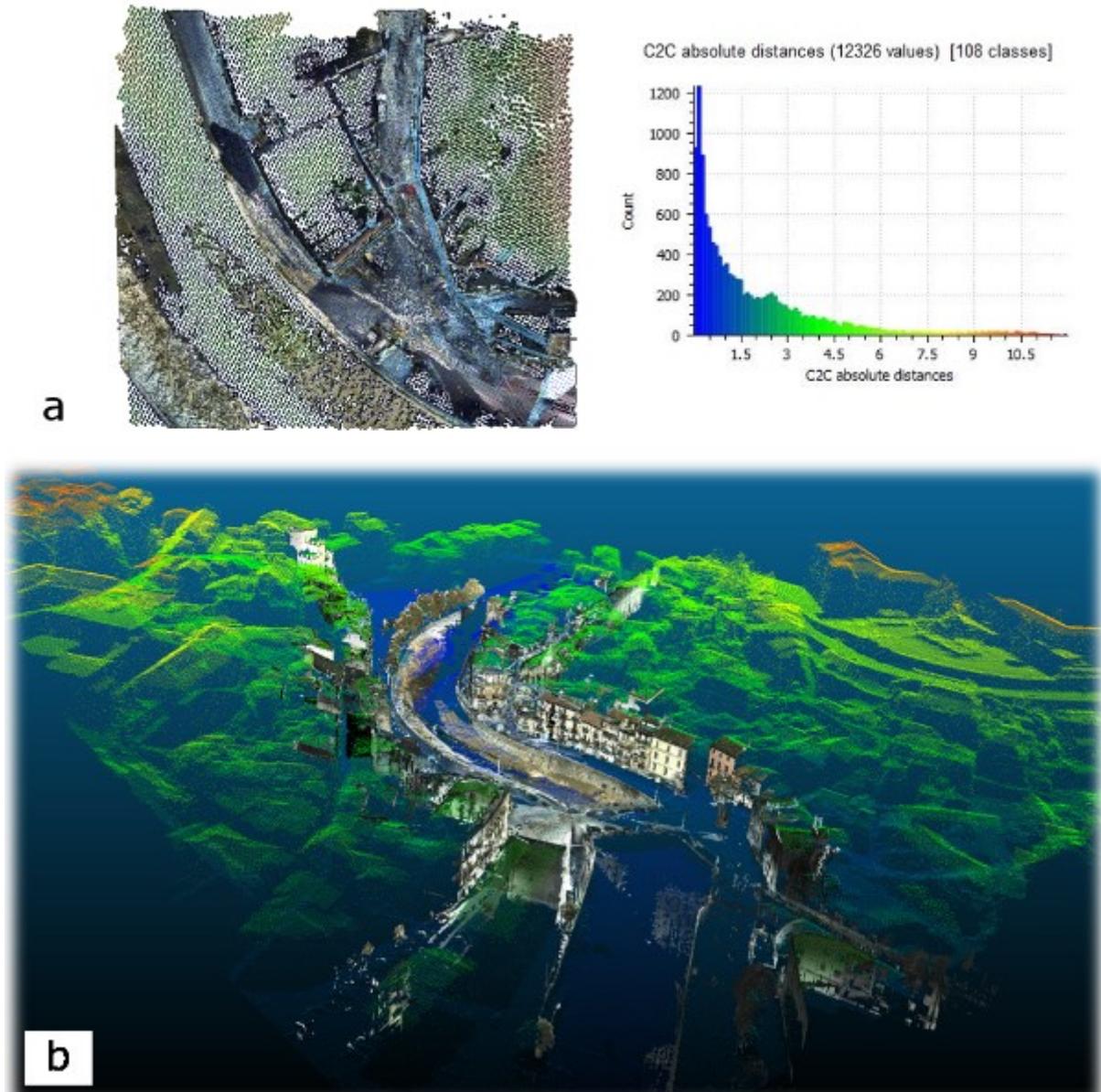


Figura 5-5. Integrazione dei dati provenienti da LiDAR aereo con la nuvola dei punti acquisita con tecnica TLS

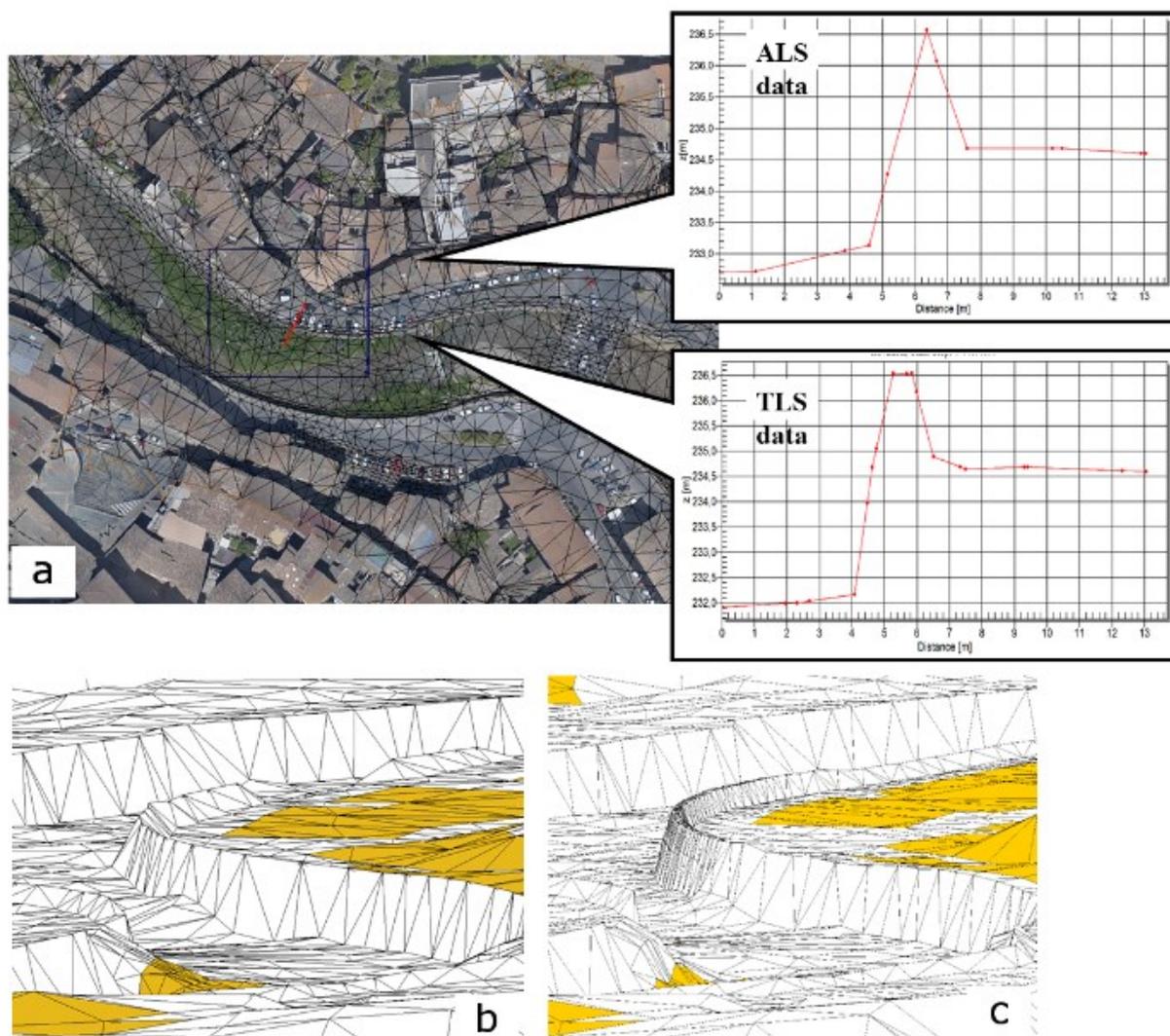


Figura 5-6. Esempio di modello digitale del terreno derivato da dati LIDAR aerei localmente integrato con dati provenienti dal rilievo TLS per la ricostruzione degli argini (a);

#### 4. Il ruolo dei dati LiDAR terrestri per la mappatura della pericolosità idraulica e la comunicazione del rischio

Un primo livello di screening sull'usabilità delle indagini LiDAR terrestri per scopi di comunicazione del rischio di alluvione è stato condotto direttamente nel software open-source di elaborazione della nuvola di punti 3-D *CloudCompare*. All'interno di esso sono stati importati il modello 3-D di punti della Figura 5-4 e la superficie libera calcolata in prossimità del colmo.

La Figura 5-7a mostra le potenzialità dell'ambiente 3-D realizzato con dati TLS in cui visualizzare le profondità idriche simulate, qui rappresentate in pseudo-colore a banda singola.

L'utente può determinare localmente l'altezza idrica in prossimità dell'edificio selezionando i punti sulla facciata, per visualizzare la corrispondente coordinata z locale (Figura 5-7b).

Inoltre, si vuole evidenziare che viste virtuali di questo tipo consentono una migliore analisi e comprensione delle situazioni di livelli dell'acqua intorno agli edifici, evidenziando che possono essere variabili lungo tutto l'edificio e denotando un comportamento non orizzontale della superficie libera in corrispondenza degli stessi.

La rappresentazione tridimensionale basata su dati LiDAR terrestri può consentire agli *stakeholder* di valutare le migliori strategie di protezione contro le inondazioni su larga scala e promuovere le discussioni tra professionisti e gestori dell'emergenza nello sviluppo di efficienti piani di evacuazione.

La superficie libera non viene proiettata realisticamente in questa visualizzazione 3-D, perché il software utilizzato non ha un motore di *rendering*. Inoltre, sparsità dei punti diventa evidente aumentando lo zoom.

Questo approccio potrebbe essere migliorato in due modi. Il primo consiste in uno sviluppo del sistema di *rendering* come soluzione che combina dati LiDAR su larga scala e visualizzazioni realistiche dell'acqua (Leskens et al., 2017). Il secondo prevede l'utilizzo di software capaci di estrarre precisi modelli *mesh* di ambienti urbani da nuvole di punti (Risse et al., 2018).

Facendo un'analisi comparativa tra l'ambiente 3-D realizzato con la *texture mapping* e descritto nel quarto capitolo e il modello urbano derivato da acquisizione laser scanner terrestre, il primo è stato realizzato proponendo un *workflow* rapido e semplice, non richiede particolari sforzi nelle fasi di pre e post-elaborazione e consente di ottenere scene realistiche, grazie al motore di *rendering* di Blender™. Viceversa, questo approccio può produrre edifici che presentano facciate con diverse distorsioni legate alla qualità delle foto e problemi di allungamento e stiramento nelle facciate. Questo aspetto deve essere considerato attentamente nella valutazione quantitativa del livello dell'acqua in corrispondenza degli edifici. Questo aspetto non potrebbe essere fondamentale se l'intento è quello di fornire un'indicazione generale alla popolazione sul possibile scenario associato all'alluvione, ma sarebbe essenziale per valutare i livelli raggiunti dall'acqua alla scala della singola facciata.

La seconda procedura fa un passo avanti, proponendo un modello 3-D che integra la descrizione geometrica dell'edificio. A partire dai dati della nuvola di punti, infatti, è possibile non solo evitare i problemi di distorsione descritti dinanzi, ma anche ottenere informazioni idrauliche sulle profondità dell'acqua attorno agli edifici. Nuvole di punti molto dense possono richiedere notevoli sforzi computazionali; pertanto, questa procedura è preferibile per una valutazione dettagliata dei livelli di piena in aree urbane densamente popolate.

È bene osservare che il valore del dato LiDAR va oltre la semplice precisione topografica, metrica e visiva. Esso può fornire informazioni sui materiali strutturali delle facciate, molto utili per lo studio del rischio di collasso degli edifici, in correlazione con la velocità del flusso.

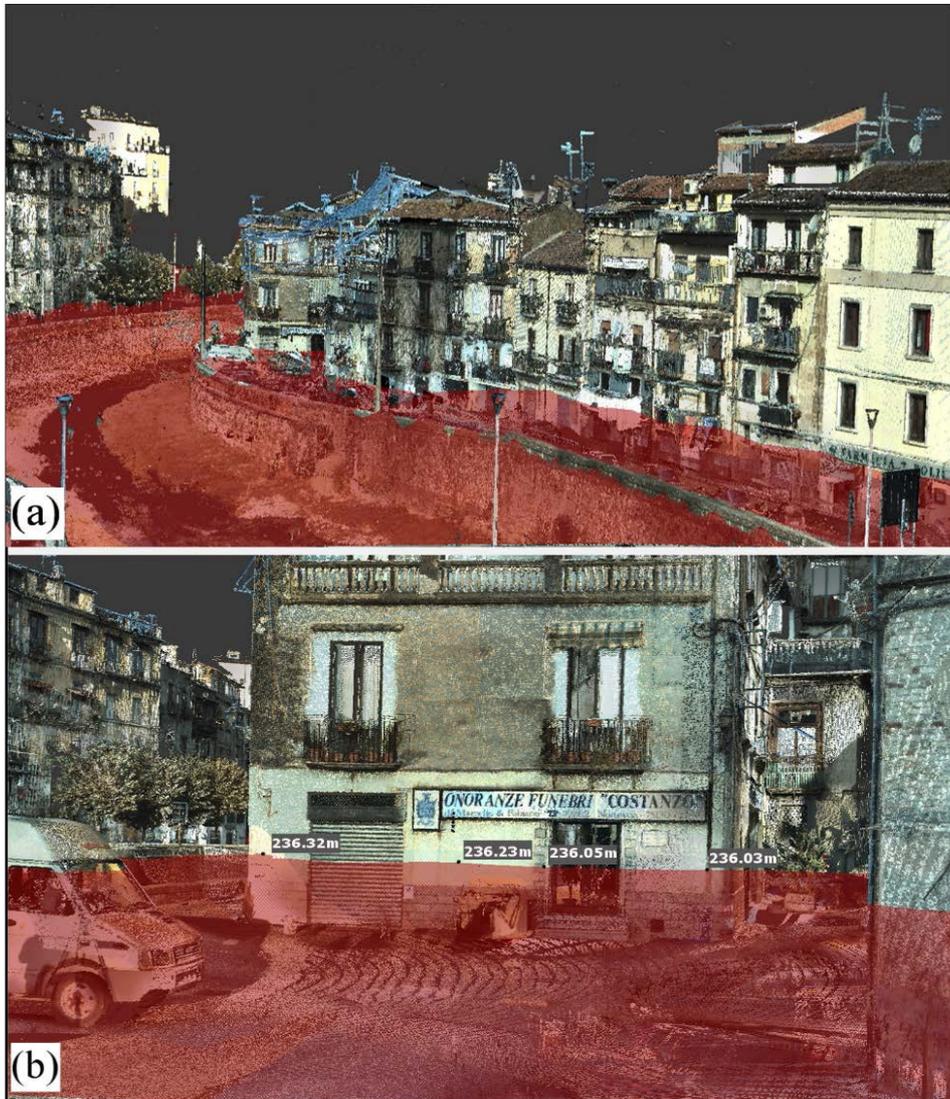


Figura 5-7. Esempio di rappresentazione 3-D di uno scenario di allagamento utilizzando i dati TLS (a); dettaglio della visualizzazione dell'interazione tra superficie idrica (in rosso) e facciata dell'edificio (b).

### 5. *Web-based rendering* di nuvole di punti per la rappresentazione interattiva di inondazioni urbane

Il rilevamento tridimensionale sta diventando ormai la tecnologia più assodata nella maggior parte delle attività di rilievo. Tuttavia, i dati acquisiti con tale tecnologia risultano ancora poco fruibili sia per la comunità scientifica sia per il pubblico in generale (Bianchini et al., 2011). Ciò è sostanzialmente legato alle difficoltà che possono riscontrarsi nell'elaborazione e nella gestione delle nuvole di punti 3-D da parte di chi non ha competenze tecniche specifiche in quest'ambito,

ma anche per la mancanza di *software user-friendly* che permettano anche ad un target di persone non esperte di poter almeno effettuare semplici operazioni di visualizzazione, esplorazione interattive e misura del dato. Inoltre, fino a qualche anno il processo di divulgazione presentava dei limiti legati alla bassa velocità di trasmissione delle grandi moli di dati 3-D. Alta velocità offerta oggi dalle efficienti reti infrastrutturali e di comunicazione ha consentito di superare questo limite, dando una spinta importante nello sviluppo di piattaforme *web-oriented*, capaci di accedere in tempo reale a moli di dati di dati che fino a qualche tempo fa era impensabile gestire in rete.

La sfida dei *browser web* va oltre l'ottimizzazione della trasmissione dei dati 3-D, ma si concentra soprattutto sullo sviluppo di approcci che ottimizzino l'interazione utente/informazioni, proponendo siti che abbiano *plug-in* orientati alla visualizzazione di nuvole di punti 3-D, cosicché la disseminazione e la visualizzazione siano interconnesse (Kehl, 2015).

Proprio per promuovere questo aspetto, si propone un *rendering* preliminare basato sul web di nuvole di punti per la visualizzazione di scenari di inondazione.

Uno dei principali vantaggi della visualizzazione Web 3D è consentire agli utenti finali di esplorare in modo interattivo i risultati della modellazione idraulica, utilizzando un *browser* standard senza applicazioni di terze parti. Un utente può facilmente esplorare lo spazio 3-D e visualizzare nel dettaglio l'impatto che un evento di piena può avere su un singolo edificio e nell'area di interesse. Chi si occupa di gestione del rischio ha così uno strumento per informare in modo più efficace circa l'impatto delle inondazioni agli *stakeholder*. Ciò migliorerà la comunicazione del rischio le diverse figure coinvolte nei processi decisionali, in modo tale da sviluppare, valutare e visualizzare le migliori strategie di adattamento possano essere sviluppate (Chen et al., 2018).

L'implementazione del *renderer* presentata qui si basa su Potree ([www.potree.org](http://www.potree.org)), sviluppato dall'Institute of Computer Graphics and Algorithms, TU Wien (Schütz, 2016) che utilizza tecnologie web standard, come le librerie grafiche *Web-GL*, *three.js* ed il linguaggio *Javascript* e non richiede applicazione di terze parti. Potree fa affidamento alla riorganizzazione dei dati della nuvola di punti in una struttura di dati a tre livelli multi-risoluzione e convalida i dati delle nuvole di punti grezzi senza la necessità di un passaggio di creazione della mesh, operazione dispendiosa in termini di onere computazionale. La varietà di strumenti di misurazione consente inoltre agli utenti di analizzare potenzialmente le profondità dell'acqua come attributo vertice dei punti.

Questo strumento potrebbe avere molti vantaggi, specialmente per l'analisi visiva dei percorsi di evacuazione.

La Figura 5-8 mostra il file in formato *.html* Potree aperto in un server Web locale. In questa fase preliminare, le profondità idriche non vengono ancora visualizzate nell'interfaccia utente perché l'analisi del visualizzatore di Potree è stata limitata alla valutazione del *web rendering* della nuvola di punti.

Ovviamente, l'obiettivo futuro è creare un prodotto simile a quello mostrato nella Figura 5-7, ma riproducendo una resa realistica della superficie dell'acqua ed introducendo anche informazioni relative alla velocità della corrente, al fine di generare un prodotto web realistico, accessibile e utilizzabile da pianificatori, gestori dell'emergenza, utile per lo sviluppo, la valutazione e la visualizzazione di strategie di adattamento a supporto delle decisioni per rafforzare la resilienza alle inondazioni.



Figura 5-8. File di potree in *.html* file visualizzato nel browser.

## 6. Conclusioni

Il presente capitolo ha illustrato una procedura per la realizzazione di un ambiente virtuale 3-D, ottenuto utilizzando nuvole di punti acquisite mediante laser scanner terrestre, al fine di visualizzare i risultati di simulazioni idrauliche bidimensionali. Il prodotto risultante presenta delle potenzialità aggiuntive rispetto al modello 3-D descritto nel capitolo precedente, in termini di precisione geometrica e possibilità di navigazione ed esplorazione interattiva.

I livelli idrici possono essere esaminati senza bisogno di ricorrere a una legenda, ma cliccando direttamente sul punto di interesse, il quale ha come attributi la coordinate topografiche.

Si vuole evidenziare che, nonostante la complessità dei modelli e la dimensione dei set di dati coinvolti, l'ambiente 3-D realizzato è accessibile all'utente, utilizzando *renderer open-source* che sfruttano la tecnologia Web-GL, come ad esempio Potree.

Ciò consentirebbe di effettuare analisi di dettaglio e di esplorare complessi scenari di inondazione. Inoltre, prodotti di questo tipo assumerebbero un ruolo rilevante anche nell'ambito del *Flood Damage Assessment* e in particolare nella valutazione del danno alla micro-scala, dove è richiesta una valutazione caso per caso dell'impatto dell'alluvione sui singoli edifici.

La sfida della ricerca qui illustrata è quella di fornire una rapida visualizzazione, manipolazione e analisi di scene complesse di ambienti 3-D su larga scala ed implementare un *framework* di calcolo, basato su tecnologie di *rendering* Web-GL, che integri i modelli di simulazione delle acque basse con il *rendering* in tempo reale delle superfici idriche calcolate.

## Capitolo 6 – Considerazioni generali e prospettive future

Le potenzialità delle tecniche di realtà virtuali sono ancora oggi non utilizzate appieno nell'ambito dell'idraulica territoriale. Spesso sono usate semplicemente per creare effetti visivi fini a sé stessi. La comunicazione del rischio di alluvione è ancora agli strumenti canonici della rappresentazione della pericolosità, ossia le tradizionali mappe di allagamento.

In questo contesto, si è visto che i risultati dei calcoli idraulici, se eseguiti utilizzando le SWE nella formulazione conservativa e facendo ricorso agli schemi *shock capturing*, hanno un contenuto informativo di tipo idraulico che va ben al di là di quello che si può visualizzare con le classiche mappe. In questa tesi si è mostrato che tale contenuto è idoneo per poter costruire scenari virtuali tridimensionali sufficientemente realistici. Il presente lavoro ha utilizzato come campo di sperimentazione il centro storico di Cosenza. Si è mostrato come la storia di questa città si sia intersecata più volte con le esondazioni del fiume Crati e del suo affluente Busento. La mancanza di immagini storiche sull'alluvione in corso rende difficile immaginare cosa accadrebbe al centro storico se un evento di questo tipo si ripetesse. La realizzazione di immagini (e, in prospettiva, di video) può colmare questa lacuna conoscitiva e può contribuire così a soddisfare le esigenze di *risk communication*.

Più in generale l'attività di ricerca mostrata in questa tesi ha inteso proporre soluzioni di visualizzazione dei risultati in grado di trasferire ai portatori di interesse informazioni locali dettagliate, per una maggiore consapevolezza delle condizioni di reale pericolosità associate al realizzarsi di un determinato evento alluvionale sul territorio. Nel futuro si spera di poter avvicinare il mondo della ricerca idraulica a quello della *computer graphics*, al fine di ottenere quell'esperienza immersiva di cui le immagini sono solo un preliminare risultato.

Al fine di promuovere l'accessibilità all'informazione e la divulgazione dei risultati scientifici, l'obiettivo futuro è quello di valutare l'efficacia dei prodotti di *virtual reality* (VR) qui proposti per diverse tipologie di *stakeholder*, nell'ambito del *flood risk management*. A tal fine, l'intento è quello di realizzare ambienti immersivi all'interno dei quali l'utente può muoversi liberamente, attraverso la combinazione di *software* e *hardware* adatti alle visualizzazioni VR (Dome, Visori VR, controller, sensori di movimento, ecc).

Un altro obiettivo futuro riguarda la realizzazione di *app* per dispositivi mobili (tablet e smartphone) pensate per le generazioni che non hanno avuto esperienza sull'impatto di un evento

di piena in un contesto urbano: puntando la webcam del proprio dispositivo su un punto di interesse, l'utente può esplorare in maniera interattiva, tramite la realtà aumentata e la realtà virtuale, foto storiche di eventi alluvionali relative a quella zona e gli scenari di allagamento all'interno degli ambienti virtuali 3-D realizzati.

Le considerazioni sui benefici delle visualizzazioni 3-D nell'ambito della comunicazione del rischio sono state fatte alla luce degli studi disponibili in letteratura. Si prevede in futuro la somministrazione dei questionari rivolti al pubblico, ai portatori di interesse e ai decisori finali, per testare l'efficacia delle visualizzazioni VR rispetto alle classiche mappe di pericolosità, ai fini della percezione del rischio di alluvione.

## Bibliografia

Abbot, M.B. (1979) *Computational Hydraulics*. Pitman Publishing limited, London.

Abt, S.R., Wittler, R.J., Taylor, A., Love, D.J. (1989) *Human stability in a high flood hazard zone*. AWRA Water Resour Bull 25(4), 881–890.

Akbar, M., Alibadi, S., Patel, R., Watts, M. (2013) *A fully automated and integrated multi-scale forecasting scheme for emergency preparedness*. Environ. Modell. Soft. 39, 24-38.

Alcrudo, F. & García Navarro, P. (1994) *Computing two dimensional flood propagation with a high resolution extension of McCormack's method*. In Molinaro, P. e Natale, L. (eds.), *Modelling of flood propagation over initially dry areas*, New York, ASCE, 3-17.

Amirebrahimi, S, Rajabifard, A., Mendis, P, Ngo, T. (2016). *A framework for a microscale flood damage assessment and visualization for a building using BIM-GIS integration*. Int. J. Digit Earth 9(4), 363-386.

Andrei, R. M., Callieri, M., Zini, M. F., Loni, T., Maraziti, G., Pan, M. C., & Zoppè, M. (2012) *Intuitive representation of surface properties of biomolecules using BioBlender*. BMC bioinformatics, 13(4), S16.

Appleton, K., Lovett, A., Sünnerberg, G., Dockerty, T. (2002) *Rural landscape visualization from GIS databases: a comparison of approaches, options and problems*. Comput. Environ Urban Syst. 26, 141-162.

Archivio di Stato di Cosenza, Fondo Demanio Silano, b. 72, fasc.415.

Archivio di Stato di Cosenza, Fondo Genio Civile - Danni alluvionali, b.20, fasc.162; b. 51, fasc. 557; b. 52, fasc. 574; b. 73, fasc. 778 – 779.

Archivio di Stato di Cosenza, Fondo Intendenza Calabria Citra - Opere pubbliche comunali, b.13 fasc. 289.

Archivio di Stato di Cosenza, Fondo Prefettura – Affari generali, Alluvioni e terremoti, b. 1524, 1530, 1547.

Archivio di Stato di Cosenza, Fondo Prefettura – Gabinetto, b. 149, fasc. 10.

Archivio di Stato di Cosenza, Fondo Prefettura – Opere pubbliche comunali, b. 8, fasc. 271, 272, 285.

Archivio di Stato di Cosenza, Notaio Casini Giovanni, Cosenza, n.299, 1800, c.2 (allegato all'atto del 18 giugno 1800).

Arciniegas, G., Janssen, R., Rietveld, P. (2013). *Effectiveness of collaborative map-based decision support tools: results of an experiment*. Environ. Modell. Soft. 39, 159-175.

- Argent, R.M., Sojda, R.S., Giupponi, C., McIntosh, B., Voinov, A.A., Maier, H.R. (2016) *Best practices for conceptual modelling in environmental planning and management*. Environ. Model. Soft. 80, 113–121.
- Aureli, F., Mignosa, P., Tomirotti, M. (2000) *Numerical-Simulation and Experimental-Verification of Dam-Break Flows with Shocks*. Journal of Hydraulic Research, 38(3), 197-206.
- Ball, J. (2002) *Towards a methodology for mapping 'regions for sustainability' using PPGIS*. Prog. Plann. 58, 81-140.
- Barnaud, C., Le Page, C., Dumrongrojwatthana, P., Trébuil, G. (2013) *Spatial representations are not neutral: Lessons from a participatory agent-based modelling process in a land-use conflict*. Environ. Modell. Soft. 45, 150-159.
- Bell, H., Tobin, G. (2007) *Efficient and effective? The 100 year flood in the communication and perception of flood risk*. Environ. Hazards, 302–311.
- Besl, P.J., McKay, N.D. (1992) *A Method for Registration of 3-D Shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14, 239-256.
- Bianchini, C., Senatore, L. J. (2011). *Metodi speditivi per la visualizzazione ed esplorazione interattiva di nuvole di punti*. In: Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città, Ricerca PRIN. Roma: Gangemi.
- Biblioteca Nazionale di Cosenza (2001) *Crati e Busento dal mito alla storia: Documenti, immagini, progetti*. Luigi Pellegrini Editore – Cosenza.
- Biljecki, F., Ledoux, H., Stoter, J., Zhao, J. (2014) *Formalisation of the level of detail in 3D city modelling*. Comput. Environ Urban Syst. 48, 1-15.
- Bolkas, D., Fotopoulos, G., Glennie, C. (2016) *On the impact of a refined stochastic model for airborne LiDAR measurements*. Journal of Applied Geodesy, 10 (3), 185-196.
- Bosco S., Cannataro F. (2009), *Krhatís – Letteratura e storia*. Le Nuvole – Cosenza.
- Botzen, W.J.W., Aerts, J.C.J.H. van den Bergh, J.C.J.M. (2009) *Dependence of flood risk perceptions on socioeconomic and objective risk factors*. Water Resour Res 45, W10440.
- Bradford R.A., O'Sullivan J.J., van der Craats I.M., Krywkow J., Rotko P., Aaltonen J., Bonaiuto M., De Dominicis S., Waylen K., Schelfaut K. (2012). *Risk perception - issues for flood management in Europe*. Nat. Hazard Earth Sys. 12, 2299-2309.
- Brennan, M., O'Neill, E., Brereton, F., Dreoni, I., Shahumyan, H. (2016). *Exploring the spatial dimension of community-level flood risk perception: a cognitive mapping approach*. Environmental Hazards 15(4), 279-310.
- Breuer, R., Sewilam, H., Nacken, H., Pyka, C. (2017) *Exploring the application of a flood risk management Serious Game platform*. Environ. Earth Sci. 76(2), 76-93.

Bubek, P., Botzen, W.J.W, Aerts, J.C.J.H. (2012) *A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior*. Risk Anal. 32(9), 1481-1495.

Bui, G., Calyam, P., Morago, B., Antequera, R. B., Nguyen, T., & Duan, Y. (2015) *LiDAR-based virtual environment study for disaster response scenarios*. In Integrated Network Management (IM), 2015 IFIP/IEEE International Symposium on (pp. 790-793). IEEE.

Burch, S., Sheppard, S.R.J., Shaw, A. and Flanders, D. (2010) *Planning for climate change in a flood prone community: municipal barriers to policy action and the use of visualizations as decision-support tools*. J. Flood Risk Manag. 3, 126-139.

Burningham, K., Fielding, J., Thrush, D. (2008) *"It'll never happen to me": understanding public awareness of local flood risk*. Disasters 32, 216–238.

CADAM (1998) *Concerted Action on Dam Break Modelling*. Proceedings of the Wallingford Meeting, Wallingford, UK, 2-3 March, 1998, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Caloiero D., Mercuri T. (1980) *Le alluvioni in Calabria dal 1921 al 1970*. Cosenza: C.N.R., Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica.

Camposano F. (1905) *La inalveazione urbana dei torrenti Crati e Busento considerata nei rapporti all'abitato di Cosenza: studi e proposte dell'ingegnere Francesco Camposano direttore dell'ufficio tecnico municipale / Municipio di Cosenza*. Tip. Lit. Luigi Aprea Librato Editore - Cosenza

Carmona, G., Varela-Ortega, C., Bromley, J. (2013) *Supporting decision making under uncertainty: Development of a participatory integrated model for water management in the middle Guadiana river basin*. Environ. Modell. Soft. 50, 144-157.

Casas, A., Benito, G., Thorndycraft, V. R., & Rico, M. (2006) *The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling*. Earth Surface Processes and Landforms 31(4), 444-456.

Castagnino S. (2014) *Ricostruzione idraulica dell'alluvione di Cosenza del 24 Novembre 1959*. Tesi di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Università della Calabria.

Cea, L, Bladé, E. (2015) *A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications*. Water Resour Res 51, 5464-5486.

Chen, A. S., Khoury, M., Vamvakeridou-Lyroudia, L., Stewart, D., Wood, M., Savic, D. A., Djordjevic, S. (2018) *3D visualisation tool for improving the resilience to urban and coastal flooding in Torbay, UK*. Procedia Eng 212, 809-815.

Chen, G., Li, X., Chen, W., Cheng, X., Zhang, Y., Liu, S. (2014) *Extraction and application analysis of landslide influential factors based on LiDAR DEM: a case study in the Three Gorges area, China*. Nat hazards 74, 509–526.

Cho, W., Jwa, Y.-S., Chang, H.-J., Lee, S.-H. (2004) *Pseudo-grid based building extraction using airborne LIDAR data*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens 35, 378–381.

Chock, G., Carden, L., Robertson, I., Olsen, M., Yu, G. (2013) *Tohoku Tsunami-induced building failure analysis with implications for US tsunami and seismic design codes*. Earthquake Spec. 29(s1), S99–S126.

Chow, T.V. (1959) *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York.

Comune di Cosenza, Assessorato alle politiche scolastiche (2004) *Raccontiamoci la città: Cosenza tra storia, miti, leggende (parte seconda)*. Le Nuvole – Cosenza.

Conforti Andreoni, D., Massari, G., Potleca, M. (2003). *Generazione di modelli digitali del terreno dalla combinazione di dati lidar da piattaforma aerea e terrestri*.

Costabile P., Costanzo C., De Lorenzo G., Macchione F., Sangiacomo W. G. (2011) *Criteri di costruzione dei domini di calcolo per la perimetrazione delle aree inondabili*. In *Tecniche per la difesa dall'inquinamento*, Frega G. (a cura di), Cosenza: EdiBios, 493-507.

Costabile, P., Costanzo, C., Macchione F. (2017). *Performances and limitations of the diffusive approximation of the 2-D shallow water equations for simulation in urban and rural areas*. Appl. Numer. Math. 116, 141-156.

Costabile, P., Macchione, F. (2015). *Enhancing river model set-up for the 2-D dynamic flood modeling*. Environ. Modell. Soft. 67, 89-107.

Costabile, P., Macchione, F., Natale, L., Petaccia, G. (2015a) *Flood mapping using LIDAR DEM. Limitations of the 1-D modeling highlighted by the 2-D approach*. Nat Hazards 77(1), 181-204.

Costabile, P., Macchione, F., Natale, L., Petaccia, G. (2015b) *Comparison of scenarios with and without bridges and analysis of backwater effect in 1-D and 2-D river flood modeling*. Comput Modell Eng Sci, 109, 181–204.

Courty, L. G., Pedrozo-Acuña, A., Bates, P. D. (2017) *Itzi (version 17.1): an open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation*, Geosci. Model Dev. 10, 1835-1847.

Cowgill, E., Bernardin, T. S., Oskin, M. E., Bowles, C., Yıkılmaz, M. B., Kreylos, O., ... Bawden, G. W. (2012). *Interactive terrain visualization enables virtual field work during rapid scientific response to the 2010 Haiti earthquake*. Geosphere 8(4), 787–804.

Craven, J., Angarita, H., Corzo Perez, G.A., Vasquez, D. (2017) *Development and testing of a river basin management simulation game for integrated management of the Magdalena-Cauca river basin*. Environ. Model. Soft. 90, 78–88.

Cronaca del Bosco – o – della vera origine della città di Cosenza e del suo accrescimento col ragguaglio della fondazione della Chiesa Arcivescovile, suoi prelati, delle parrocchie, dei conventi dei frati, monasteri di donne, ed altro notevole della Regia Udienza Provinciale e i suoi Viceré e presidi (129 fogli manoscritti, senza data - Biblioteca Civica – Cosenza).

Cronin, S., Gaylord, D., Charley, D., Alloway, B., Wallerz, S., Esau, J. (2004) *Participatory methods of incorporating scientific with traditional knowledge for volcanic hazard management on Ambae Island, Vanuatu*, Bull. Volcanol. 66, 652–668.

Cunge, J.A., Holly, F.M., Verwey, A. (1980) *Practical Aspects of computational river Hydraulics*. Pitman Advanced Publishing Program.

Davide, A. (1869) *Storia dei Cosentini*. Vol. 3, 1869-1874.

de Almeida, G.A.M., Bates, P., Ozdemir, H. (2016) *Modelling urban floods at submetre resolution: challenges or opportunities for flood risk management?* J Flood Risk Manag. 11, S855–S865.

de Moel H., van Alphen J. & Aerts J. C. J. H. (2009) *Flood maps in Europe – methods, availability and use*. Nat. Hazard Earth Sys. 9(2), 289–301.

Delgado-Galván, X., Izquierdo, J., Benítez, J., Pérez-García, R. (2014) *Joint stakeholder decision-making on the management of the Silao–Romita aquifer using AHP*. Environ. Modell. Soft. 51, 310-322

Demeritt, D., Nobert, S. (2014) *Models of best practice in flood risk communication and management*. Environmental Hazards 13(4), 313-328.

Demir, I., Krajewski, W.F. (2013) *Towards an integrated Flood Information system: Centralized data access, analysis and visualization*. Environ. Modell. Soft. 50, 77-84.

Di Baldassarre, G., Schumann, G., Bates, P.D., Freer, J.E., Beven, K.J. (2010) *Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches*. Hydrolog. Sci. J. 55(3), 364-376.

Di Matteo, M., Dandy, G.C., Maier, H.R. (2017) *A multi-stakeholder portfolio optimization framework applied to stormwater best management practice (BMP) selection*. Environ. Model. Softw. 97, 16–31.

Dionesalvi C. (1999) *L'alluvione che 40 anni fa mise in ginocchio Cosenza*. Il Domani (17 novembre 1999).

Dransch, D., Rotzoll, H., Poser, K., (2010) *The contribution of maps to the challenges of risk communication to the public*. Int. J. Digit. Earth 3(3), 292-311.

Eiser, J.R., Bostrom, A., Burton, I., Johnstone, D.M., McClure, J., Paton, D., van der Pligt, J., White, M.P. (2012) *Risk interpretation and action: A conceptual framework for responses to natural hazards*. International Journal of Disaster Risk Reduction 1, 5-16.

Elvamet, *Eventi meteorici del novembre 1959*.

[http://www.evalmet.it/censimento/pubblicazioni/1959\\_eventi.pdf](http://www.evalmet.it/censimento/pubblicazioni/1959_eventi.pdf).

EXCIMAP (2007) *Handbook on good practice for flood mapping in Europe*. European Exchange Circle on Flood mapping. [http://ec.europa.eu/environment/water/flood\\_risk/flood\\_atlas/](http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/flood_atlas/).

Ferrari, T. (1999) *Quando il Crati e il Busento ruppero gli argini*. La Provincia cosentina: quotidiano d'informazione, A. 1, n. 106 (16 maggio 1999), p. 7.

- Ferziger, J. H., Peric, M. (2012) *Computational methods for fluid dynamics*. Springer Science & Business Media. ISBN: 978-3-642-56026-2.
- Fewtrell, T.J., Duncan, A., Sampson, C.C., Neal, J.C., Bates, P.D. (2011) *Benchmarking urban flood models of varying complexity and scale using high resolution terrestrial LiDAR data*. *Phys Chem Earth* 36, 281–291.
- Fiore, S.M., Harrison, G.W., Hughes, C.E., Rutström, E.E. (2009) *Virtual experiments and environmental policy*. *J. Environ. Econ. Manag.* 57, 65-86.
- Frasca, S. (1973) *Sulle ultime alluvioni in Calabria: un chiaro atto di accusa contro il Governo di centro-destra e la classe dirigente locale: discorsi pronunciati alla Camera dei deputati nelle sedute del 17 gennaio*. Stab. tip. Carlo Colombo.
- Fuchs, S., Thöni, M., McAlpin, M.C., Gruber, U., Bründl, M. (2007) *Avalanche hazard mitigation strategies assessed by cost effectiveness analyses and cost benefit analyses - evidence from Davos, Switzerland*. *Nat Hazards* 41, 113–129.
- Galli, E. (1934) *Cosenza seicentesca nella cronaca del Frugali*. Collezione Meridionale, Roma, 1934, p.40.
- García-Feal, O., Crespo, A. J. C., Domínguez, J. M., Gómez-Gesteira, M. (2016) *Advanced fluid visualisation with DualSPHysics and Blender*. 11<sup>th</sup> International SPHERIC Workshop, At Munich, Germany, June 14-16, 2016.
- Garrote, J., Alvarenga, F.M., Díez-Herrero, A. (2016) *Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage–damage functions and 2-D hydraulic models*. *J. Hydrol.* 541, 611–625.
- Girardeau-Montaut, D., Roux, M., Marc, R., & Thibault, G. (2005) *Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner*. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(part 3), W19.
- Glaister, P. (1998) *Approximate Reimann solution of the shallow water equation*. *Journal of Hydraulic Research*, 26(3), 293-306.
- Gómez M., Macchione F., Russo B. (2011) *Methodologies to study the surface hydraulic behavior of urban catchments during storm events*. *Water Sci Technol* 63(11), 2666–2673
- Gong, J., Lin, N. (2013) *Post-Sandy damage and vulnerability assessment with 3D geospatial sensing methods*. *Proc., 11th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR)*, Taylor & Francis Group.
- Grainger, S., Mao, F., Buytaert, W. (2016) *Environmental data visualization for non-scientific contexts: Literature review and design framework*. *Environ. Modell. Soft.* 85, 299-318.
- Guan, M., Ahilan, S., Yu, D., Peng, Y., Wright, N. (2018) *Numerical modelling of hydro-morphological processes dominated by fine suspended sediment in a stormwater pond*. *J. Hydrol.* 556, 87–99.

- Guan, M., Liang, Q. (2017) *A two-dimensional hydro-morphological model for river hydraulics and morphology with vegetation*. Environ. Modell. Soft. 88, 10-21.
- Hagemeier-Klose, M., Wagner K. (2009) *Evaluation of flood hazard maps in print and web mapping services as information tools in flood risk communication*. Nat. Hazard Earth Sys. 9, 563-574.
- Halbe, J., Pahl-Wostl, C., Adamowski, J. (2018) *A methodological framework to support the initiation, design and institutionalization of participatory modeling processes in water resources management*. J. Hydrol. 556, 701–716.
- Hamilton, S.H., ElSawah, S., Guillaume, J.H.A., Jakeman, A.J., Pierce, S.A. (2015) *Integrated assessment and modelling: Overview and synthesis of salient dimension*. Environ. Modell. Soft. 64, 215-229.
- Harten A., Peter D. Lax, and Bram van Leer (1983) *On Upstream Differencing and Godunov-Type Schemes for Hyperbolic Conservation Laws*. SIAM Rev. Volume 25, Issue 1, 35-61.
- Haynes K., Barclay J., Pidgeon N. (2007) *Volcanic hazard communication using maps: an evaluation of their effectiveness*. Bull Volcanol. 70, 123–138.
- Hewitt, R., van Delden, H., Escobar, F. (2014) *Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach*. Environ. Modell. Soft. 52, 149-165.
- Holub, M., Fuchs, S. (2009) *Mitigating mountain hazards in Austria – legislation, risk transfer, and awareness building*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9, 523–537.
- Ion I., Dragos B. & Margarita D. (2008) *Digital photogrammetric products from aerial images, used for identifying and delimiting flood risk areas*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37(B7), 361-364.
- ISPRA, *Cronistorie Calabresi*, [http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/periodici-tecnici/memorie-descrittive-della-carta-geologica-ditalia/memdes\\_47\\_cron\\_calabresi.pdf](http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/periodici-tecnici/memorie-descrittive-della-carta-geologica-ditalia/memdes_47_cron_calabresi.pdf).
- Jobard, B., Erlebacher, G., Hussaini, M.Y. (2000) *Hardware-accelerated texture advection for unsteady flow visualization*, in: Proceedings Visualization 2000. VIS 2000 (Cat. No. 00CH37145). IEEE, pp. 155–162.
- Jonkman, S.N., Vrijling, J.K., Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2008) *Methods for the estimation of loss of life due to floods: A literature review and a proposal for a new method*. Natural Hazards, 46(3), 353-389.
- Jorstad, A., Nigro, B., Cali, C., Wawrzyniak, M., Fua, P., Knott, G. (2015) *NeuroMorph: a toolset for the morphometric analysis and visualization of 3D models derived from electron microscopy image stacks*. Neuroinformatics 13(1), 83-92.
- Kehl C. (2015) *Disseminating large-scale semantic 3D landscape models using open visualisation platforms*. EJV 6(2), 51-68.

- Kellens, W., Terpstra, T., De Maeyer, P. (2013) *Perception and communication of flood risks: a systematic review of empirical research*. Risk Anal. 33(1), 24-49.
- Kellens, W., Vanneuville, W., Ooms, K., De Maeyer, P. (2009) *Communicating flood risk to the public by cartography*. In The World's Geo-Spatial Solutions, Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Cartographic Conference (pp. 15-21). 2009, November.
- Kelly, R.A, Jakeman, A.J., Barreteau, O., Borsuk, M.E., ElSawah, S., Hamilton, S.H., Henriksen, H.J., Kuikka, S., Maier, H.R., Rizzoli, A.E., van Delden, H., Voinov, A.A. (2013) *Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management*. Environ. Modell. Soft. 47, 159-181.
- Kent, B. R. (2015) *3D Scientific Visualization with Blender®*. San Rafael: Morgan & Claypool.
- Kim, B., Sanders, B. F., Schubert, J. E., Famiglietti, J. S. (2014) *Mesh type tradeoffs in 2D hydrodynamic modeling of flooding with a Godunov-based flow solver*. Advances in Water Resources 68, 42-61.
- Kolbe, T.H., Gröger, G., Plümer, L. (2005) *CityGML: Interoperable access to 3D city models*. In Geo-information for disaster management, Springer, 883–899.
- Kotir, J.H., Brown, G., Marshall, N., Johnstone, R. (2017) *Systemic feedback modelling for sustainable water resources management and agricultural development: An application of participatory modelling approach in the Volta River Basin*. Environ. Model. Soft. 88, 106–118.
- Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwarz, J., ... & Thieken, A. H. (2009) *Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling?* Nat. Hazards Earth Syst. Sci 9(5), 1679.
- Kuser Olsen, V.B., Momen, B., Langsdale, S.M., Galloway, G.E., Link, E., Brubaker, K.L., Ruth, M., Hill, R.L. (2016) *An approach for improving flood risk communication using realistic interactive visualisation*. J. Flood Risk Manag. 11, S783-S793
- Lagmay, A. M. F. A., Racoma, B. A., Aracan, K. A., Alconis-Ayco, J., & Saddi, I. L. (2017) *Disseminating near-real-time hazards information and flood maps in the Philippines through Web-GIS*. Journal of Environmental Sciences 59, 13-23.
- Lai, J.S., Chang, W.Y., Chan, Y.C., Kang, S.C., Tan, Y.C. (2011) *Development of a 3D virtual environment for improving public participation: case study – The Yuansantzze Flood Diversion Works Project*. Adv. Eng. Inform. 25(2), 208-223.
- Laniak, G.F, Olchin, G., Goodall, J., Voinov, A., Hill, M, Glynn, P., Whelan, G., Geller, G., Quinn, N., Blind, M., Peckam, S., Reaney, S., Gaber, N., Kennedy, R., Highes, A. (2013) *Integrated environmental modeling: A vision and roadmap for the future*. Environ. Modell. Soft. 39, 3-23.
- Leal, L. G. (2007) *Advanced transport phenomena: fluid mechanics and convective transport processes*. Cambridge University Press. ISBN: 9780521179089.

- Leitão, J.P., Moy de Vitry, M., Scheidegger, A., Rieckermann, J. (2016) *Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 20, 1637–1653.
- Leporace P. *Quarant'anni fa l'alluvione*, Il Quotidiano della Calabria, Anno 5, n. 324 (25 novembre 1999), p. 18.
- Leskens, J.G., Brugnach, M., Hoekstra, A.Y., Schuurmans, W. (2014) *Why are decisions in flood disasters management so poorly supported by information from flood models?* Environ. Modell. Soft. 53, 53-61.
- Leskens, J.G., Kehl, C., Tuteneel, T., Kol, T., de Haan, G., Stelling, G., Eisemann, E. (2017) *An interactive simulation and visualization tool for flood analysis usable for practitioners*. Mitig. Adapt. Strat Gl. 22(2), 307-324.
- Leveque, R. J. (2002) *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Liang, J., Gong, J., Li, Y. (2015) *Realistic rendering for physically based shallow water simulation in Virtual Geographic Environments (VGEs)*. Annals of GIS 21(4), 301-312.
- Lim, S., Thatcher, C. A., Brock, J. C., Kimbrow, D. R., Danielson, J. J., Reynolds, B. J. (2013) *Accuracy Assessment of a Mobile Terrestrial Lidar Survey at Padre Island National Seashore*. Int J Remote Sens. 34(18), 6355-6366
- Lin, H., Batty, M., Jørgensen, S.E., Fu, B., Konecny, M., Voinov, A., Torrens, P., Lu, G., Zhu, A.-X., Wilson, J.P., Gong, J., Kolditz, O., Bandrova, T., Chen, M. (2015) *Virtual environments begin to embrace process-based geographic analysis*. Transaction in GIS 19(4), 493-498.
- Lindell, M.K., Perry, R.W. (2003) *Communicating Environmental Risk in Multiethnic Communities*. Sage Publications, Thousand Oaks, CA.
- Liu, J., Gong, J. H., Liang, J. M., Li, Y., Kang, L. C., Song, L. L., Shi, S. X. (2017) *A quantitative method for storm surge vulnerability assessment - a case study of Weihai city*. Int. J. Digit. Earth 10(5), 539-559.
- Liu, X.J., Zhong, D.H., Tong, D.W., Zhou, Z.Y., Ao, X.F., Li, W.Q (2016) *Dynamic visualisation of storm surge flood routing based on three-dimensional numerical simulation*. J. Flood Risk Manag. 11, S729-S749.
- Longo O., Fioriglio B. (1989) *Crati e Busento: due idee attraversano la città*, Cosenza: Italia Nostra
- Longo O., Fioriglio B. (2004) *Il Crati. Uomo, ambiente, società*, Le Nuvole – Cosenza.
- Macchione, F., Morelli, M.A. (2003) *Practical Aspects in Comparing Shock-Capturing Schemes for Dam-Break Problems*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 129(3), 187-195.
- Macchione, F., Costabile, P., Costanzo, C., De Santis, R. (2019) *Moving to 3-D flood hazard maps for enhancing risk communication*. Environ. Modell. Soft. 111, 510–522.

- Mahalingam, R., Olsen, M.J. (2016) *Evaluation of the influence of source and spatial resolution of DEMs on derivative products used in landslide mapping*. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(6), 1835-1855.
- Maidl, E., Buchecker, M. (2015) *Raising risk preparedness by flood risk communication*. *Nat. Hazard Earth Sys.* 15, 1577-1595.
- Maragkogiannis, K., Kolokotsa, D., Maravelakis, E., & Konstantaras, A. (2014) *Combining terrestrial laser scanning and computational fluid dynamics for the study of the urban thermal environment*. *Sustainable Cities and Society* 13, 207-216.
- Maskrey, S.A., Mount, N.J., Thorne, C.R., Dryden, I. (2016) *Participatory modelling for stakeholder involvement in the development of flood risk management intervention options*. *Environ. Modell. Soft.* 82, 275-294.
- McInerney G. J., Chen M., Freeman R., Gavaghan D., Meyer M., Rowland F., Spiegelhalter D.J., Stefaner M., Tessarolo G., Hortal J. (2014) *Information visualization for science and policy: engaging users and avoiding bias*. *Trends Ecol. Evol.* 29(3), 148-157.
- Meesuk, V., Vojinovic, Z., Minet, A.E. (2017) *Extracting inundation patterns from flood watermarks with remote sensing SfM technique to enhance urban flood simulation: The case of Ayutthaya, Thailand*. *Comput Environ Urban* 64, 239–253.
- Meesuk, V., Vojinovic, Z., Mynett, A.E., Abdullah, A.F. (2015) *Urban flood modelling combining top-view LiDAR data with ground-view SfM observations*. *Advances in Water Resources* 75, 105–117.
- Mendonça, D., Beroggi, G.E.G., van Gent, D., Wallace, W.A. (2006) *Designing gaming simulations for the assessment of group decision support systems in emergency response*. *Safety Sci.* 44, 523-535.
- Merz B., Thielen A. H., Gocht M. (2007) *Flood risk mapping at the local scale: Concepts and challenges*. *Flood Risk Management in Europe* 25, 231–251.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. (2010) *Review Article 'Assessment of Economic Flood Damage'*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10(8), 1697–1724.
- Merz, B., Kreibich, H., Thielen, A., Schmidtke, R. (2004) *Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 4(1), 153–163
- Messner F., Penning-Rowsell E., Green C., Meyer V., Tunstall S., van der Veen A. (2007) *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods*. FLOODsite Consortium, Wallingford, UK.
- Meyer V., Kuhlicke C., Luther J., Unnerstall H., Fuchs S., Priest S. ..., Serrhini K. (2011) *CRUE Final Report RISK MAP—improving flood risk maps as a means to foster public participation and raising flood risk awareness: toward flood resilient communities*. Project Website: [www.crue-eranet.net](http://www.crue-eranet.net).

- Meyer, V., Kuhlicke, C., Luther, J., Fuchs, S., Priest, S., Dorner, W., Serrhini, K., Pardoe, J., McCarthy, S., Seidel, J., Palka, G., Unnerstall, H., Viavattene, C., Scheuer, S., (2012) *Recommendations for the user-specific enhancement of flood maps*. Nat. Hazard Earth Sys. 12, 1701-1716.
- Meyer, V., Haase, D., Scheuer, S. (2009) *Flood risk assessment in european river basins – concept, methods, and challenges exemplified at the mulde river*. Integr Environ Assess Manag. 5, 17–26.
- Mitchell, T., Suarez, G., Chazaly, B. (2013) *Evaluation of coastal vulnerability with mobile laser scanning from a vessel*. OCEANS 2013 MTS/IEEE - San Diego: An Ocean in Common, art. no. 6740947.
- Mora, O.E., Gabriela Lenzano, M., Toth, C.K., Grejner-Brzezinska, D.A., Fayne, J.V. (2018) *Landslide change detection based on Multi-Temporal airborne LIDAR-derived DEMs*. Geosciences (Switzerland) 8(1), art. no. 23.
- Morvan H, Knight D, Wright N, Tang X, Crossley A (2008) *The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D simulation models*. J Hydraul Res 46, 191–208
- Mozzi, P., Ferrarese, F., Zangrando, D., Gamba, M., Vigoni, A., Sainati, C., Fontana, A., Ninfo, A., Piovan, S., Rossato, S., Veronese, F. (2018) *The modeling of archaeological and geomorphic surfaces in a multistratified urban site in Padua, Italy*. Geoarchaeology 33(1), 67-84.
- Mysiak, J., Testella, F., Bonaiuto, M., Carrus, G., De Dominicis, S., Ganucci Cancellieri, U., Firus, K., Grifoni, P. (2013) *Flood risk management in Italy: challenges and opportunities for the implementation of the EU Floods Directive (2007/60/EC)*. Nat. Hazard Earth Sys. 13, 2883-2890.
- Naiman, J.P. (2016) *AstroBlend: An astrophysical visualization package for Blender*. Astron Comput 15, 50-60.
- National Research Council (2009) *Mapping the Zone: Improving Flood Map Accuracy*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12573>.
- Nettley A. Desilvey C. Anderson K. Wetherelt A. Caseldine C. (2014) *Visualising Sea-Level rise at a coastal heritage site: participatory process and creative communication*. Landscape Res. 39(6), 647-667.
- Nettley, A., Anderson, K., DeSilvey, C., & Caseldine, C. (2011). *Using terrestrial laser scanning and lidar data for photo-realistic visualization of climate impacts at heritage sites*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38(5).
- Nones M. (2017). *Flood hazard maps in the European context*. Water international, 42(3), 324-332.
- Obu, J., Lantuit, H., Grosse, G., Günther, F., Sachs, T., Helm, V., Fritz, M. (2017) *Coastal erosion and mass wasting along the Canadian Beaufort Sea based on annual airborne LiDAR elevation data*. Geomorphology 293, 331-346.
- Olsen, M. J., Kayen, R. (2013) *Post-earthquake and tsunami 3D laser scanning forensic investigations*. Forensic Engineering 2012, 477-486.

- Olsen, M. J., Kuester, F., Chang, B. J., Hutchinson, T. C. (2010) *Terrestrial laser scanning based structural damage assessment*. J. Comput. Civ. Eng, 264–272.
- Open Geospatial Consortium (2012) *OGC City Geography Markup Language (CityGML) encoding standard (version 2.0)*. Published Online: <http://www.opengeospatial.org/standards/citygml>.
- Osher, S., Solomon, F. (1982) *Upwind difference schemes for hyperbolic conservation laws*. Math. Comp., 38(158), 339-374.
- O'Sullivan, J.J., Bradford, R.A., Bonaiuto, M., De Dominicis, S., Rotko, P., Aaltonen, J., Waylen, K., Langan, S.J., (2012) *Enhancing flood resilience through improved risk communications*. Nat. Hazard Earth Sys. 12, 2271-2282.
- Ozdemir, H., Sampson, C., de Almeida, G.A., Bates, P.D. (2013) *Evaluating scale and roughness effects in urban flood modelling using terrestrial LIDAR data*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 10, 5903–5942.
- Palomar-Vazquez, J., Baselga, S., Viñals-Blasco, M. J., García-Sales, C., Sancho-Espinós, I. (2017) *Application of a combination of digital image processing and 3D visualization of graffiti in heritage conservation*. J. Archaeol. Sc. Reports 12, 32-42.
- Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L., Aronica, G.T. (2016) *Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach*. Nat Hazards 83, 117–132.
- Papaioannou, G., Vasiliades, L., Loukas, A. (2015) *Multi-criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping*. Water Resour Manage 29(2), 399-418.
- Patankar, S. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow*. CRC press. ISBN: 9780891165224.
- Pedrozo-Acuña, A., Moreno, G., Mejía-Estrada, P., Paredes-Victoria, P., Breña-Naranjo, J.A., Meza, C. (2017) *Integrated approach to determine highway flooding and critical points of drainage*. Transportation research part D: transport and environment 50, 182–191.
- Pepe, M. (2017) *Survey by Airborne Laser Scanner of open large structure: A case study of Pompeii Amphitheatre*. ARPN JEAS 12(21), 6172-6182.
- Petrucci O., Versace P., Pasqua A.A. (2009) *Frane e alluvioni in Provincia di Cosenza Fra il 1951 ed il 1960: ricerche storiche nella documentazione del Genio Civile*. III Quaderno dell'Osservatorio di Documentazione Ambientale, UNICAL.
- Pettit, C., Bishop, I., Sposito, V., Aurambout, J.-P., Sheth, F. (2012) *Developing a multi-scale visualization framework for use in climate change response*. Landscape Ecol. 27, 487-508.
- Pile, J., Gouramanis, C., Switzer, A.D., Rush, B., Reynolds, I., Soria, J.L.A. (2018) *Can the risk of coastal hazards be better communicated?* Int J Disaster Risk Reduct 27, 439–450.
- Pistrika, A. K., Jonkman, S. N. (2010) *Damage to Residential Buildings due to Flooding of New Orleans after Hurricane Katrina*. Nat Hazards 54, 413–434.

Principato G. (2006), *Indagine storica sulla criticità del ponte San Lorenzo sul fiume Crati a Cosenza in merito al deflusso delle piene*. Atti del 1°Convegno Nazionale Storia dell'Ingegneria, Napoli, 8-9 marzo, 2006, CUZZOLIN: 2006, pp. 959-968.

Qiu, L., Du, Z., Zhu, Q., Fan, Y. (2017) *An integrated flood management system based on linking environmental models and disasters-related data*. Environ. Modell. Soft. 91, 111-126.

Reda, K., Febretti, A., Knoll, A., Aurisano, J., Leigh, J., Johnson, A., Papka, M., Hereld, M. (2013) *Visualizing large heterogeneous data in hybrid-reality environments*. IEEE Computers Graphics and Applications 33(4), 38-48.

Rehr, A.P., Williams, G.D., Levin, P.S. (2014) *A test of the use of computer-generated visualizations in support of ecosystem-based management*. Mar. Policy 46, 14-18.

Reiter, P. (2000) *International methods of Risk Analysis, Damage evaluation and social impact studies concerning Dam-Break accidents*. EU-Project RESCDAM. Helsinki PR Water Consulting.

Remondino, F., Rizzi, A. (2010) *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites – techniques, problems, and examples*. Applied Geomatics 2(3), 85-100.

Retchless, D. P. (2017) *Understanding local sea level rise risk perceptions and the power of maps to change them: The effects of distance and doubt*. Environment and Behavior 50(5), 483-511.

Rink, K., Scheuermann, G., Kolditz, O. (2014) *Visualization in environmental sciences*. Environ. Earth Sci. 72, 3749-3751.

Risse, B., Mangan, M., Stürzl, W., Webb, B. (2018) *Software to convert terrestrial LiDAR scans of natural environments into photorealistic meshes*. Environ. Model. Soft. 99, 88–100.

Roder, G., Ruljigaljig, T., Lin, C.W., Tarolli, P. (2016) *Natural hazards knowledge and risk perception of Wujie indigenous community in Taiwan*. Nat. Hazards 81, 641-662.

Roe, P.L. (1981) *Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes*. Journal of Computational Physics 43, 357-372.

Rowe, G., Frewer, L. J. (2000) *Public participation methods: A framework for evaluation*. Science, Technology & Human Values 25(1), 3-29.

Russo, B., Gómez, M., Macchione, F. (2013) *Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas*. Nat Hazards 69(1), 251–265.

Saksena, S. (2015) *Investigating the role of DEM resolution and accuracy on flood inundation mapping*. World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems - Proceedings of the 2015 World Environmental and Water Resources Congress, 2236-2243.

Salituri M. (2001) *Le esondazioni del Crati a Cosenza e gli eventi del 30 ottobre 1903 e del 24 novembre 1959*. Tesi di laurea in Ingegneria Civile. Università della Calabria.

- Salvati, P., Bianchi, C., Fiorucci, F., Giostrelli, P., Marchesini, I., Guzzetti, F. (2014) *Perception of flood and landslide risk in Italy: a preliminary analysis*. Nat. Hazard Earth Sys. 14, 2589-2603.
- Sampson, C. C., Fewtrell, J. T., Duncan, A., Shaad, K., Horritt, S. M., Bates, D. P. (2012) *Use of terrestrial laser scanning data to drive decimetric resolution urban inundation models*. Adv Water Resour 41, 1–17.
- Samuels, P. (2011) *Development of good professional practice*. J Flood Risk Manag 4(1), 1-2.
- Sanders, B. F. (2007) *Evaluation of on-line DEM for flood inundation modeling*. Adv. Water Resour. 30, 18314-1843.
- Savage, J.T.S., Pianosi, F., Bates, P., Freer, J., Wagener, T. (2016) *Quantifying the importance of spatial resolution and other factors through global sensitivity analysis of a flood inundation model*. Water Resources Research 52, 9146–9163.
- Schubert, J.E., Sanders, B.F. (2012) *Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modelling efficiency*. Adv. Water Resour. 41, 49-64.
- Schütz, M. (2016). *Potree: Rendering large point clouds in web browsers*. Technische Universität Wien, Wien.
- Seipel, S., Lim, N. J. (2017) *Color map design for visualization in flood risk assessment*. International Journal of Geographical Information Science 31(11), 2286-2309.
- Shaad, K., Ninsalam, Y., Padawangi, R., Burlando, P. (2016) *Towards high resolution and cost-effective terrain mapping for urban hydrodynamic modelling in densely settled river-corridors*. Sustainable Cities and Society 20, 168–179.
- Shand, D., Smith, G., Blacka, M. (2010) *Appropriate criteria for the safety and stability of people in stormwater design*. Proceedings of National Conference of the Stormwater Industry Association, Sydney, Australia, 9–12 Nov 2010.
- Shen, D., Wang, J., Cheng, X., Rui, Y., Ye, S. (2015) *Integration of 2-D hydraulic model and high-resolution lidar-derived DEM for floodplain flow modeling*. Hydrol. Earth Syst. Sci 19(8), 3605-3616.
- Sheppard, S.R. (2005) *Landscape visualization and climate change: the potential for influencing perceptions and behavior*. Environ. Sci. Policy 8(6), 637-654,
- Sheppard, S.R.J, Shaw, A., Flanders, D., Burch, S., Wiek, A., Carmichael, J., Robinson, J., Cohen, S. (2011) *Future visioning of local climate change: A framework for community engagement and planning with scenarios and visualization*. Futures 43, 400-412.
- Shi, W., Deng, S., Xu, W. (2018) *Extraction of multi-scale landslide morphological features based on local Gi\* using airborne LiDAR-derived DEM*. Geomorphology 303, 229-242.
- Steinführer, A., Kuhlicke, C., De Marchi, B., Scolobig, A., Tapsell, S., Tunstall, S. (2008) *Towards flood risk management with the people at risk: from scientific analysis to practice recommendations (and*

back). In Proceedings of the Flood Risk Management: Research and Practice, CRC Press, 2008, 945–955.

Stoker, J. J. (1957) *Water Waves*, Interscience Publishers, Inc., New York.

Strathie, A., Netto, G., Walker, G.H. and Pender, G. (2017) *How presentation format affects the interpretation of probabilistic flood risk information*. *J. Flood Risk Manag.* 10(1), 87-96.

Teng, J., Jakeman, A.J., Vaze, J., Croke, B.F.W, Dutta, D., Kim S. (2017) *Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis*. *Environ. Modell. Soft.* 90, 201-216.

Teng, J., Vaze, J., Dutta, D., Marvanek, S. (2015) *Rapid Inundation Modelling in Large Floodplains Using LiDAR DEM*. *Water Resources Management*, 29(8), 2619-2636.

Thatcher, C., Lim, S., Palaseanu-Lovejoy, M., Danielson, J., & Kimbrow, D. (2016) *Lidar-based mapping of flood control levees in South Louisiana*. *International journal of remote sensing*, 37(24), 5708-5725.

Toro, E.F. (2001) *Shock –Capturing Methods for Free Surface Shallow Flows*. Wiley, Chichester.

Tress B., Tress G. (2003) *Scenario visualization for participatory landscape planning: a study from Denmark*. *Landscape and Urban Planning* 64(3), 161-178.

Vacondio, R., Dal Palù, A., Ferrari, A., Mignosa, P., Aureli, F., Sazzi, S. (2017) *A non-uniform efficient grid type for GPU-parallel Shallow Water Equations models*. *Environ. Modell. Soft.* 88, 119-137.

Valiani, A., Caleffi, V., & Zanni, A. (2002) *Case study: Malpasset dam-break simulation using a two-dimensional finite volume method*. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(5), 460-472.

Van Kerkvoorde, M., Kellens, W., Verfaillie, E., Ooms, K. (2018) *Evaluation of web maps for the communication of flood risks to the public in Europe*. *Int. J. Cartogr.* 4, 49–64.

Van Ackere, S., Glas, H., Beullens, J., Deruyter, G., De Wulf, A., De Maeyer, P. (2016) *Development of a 3D dynamic flood web GIS visualisation tool*. *Int. J. of Safety and Security Eng.* 6(3), 560-569.

Van Alphen J., Martini F., Loat R., Slomp R. & Passchier R. (2009). *Flood risk mapping in Europe, experiences and best practices*. *J Flood Risk Manag.* 2(4), 285-292.

van Hoesel, F. (2011) *Tiled directional flow*, in: ACM SIGGRAPH 2011 Posters. ACM, p. 19.

Van de Lindt, J. W., Taggart., M. (2009) *Fragility Analysis Methodology for Performance-based Analysis of Wood-Frame Buildings for Flood*. *Nat Hazards Rev.* 10(3), 113–123.

Van Kerkvoorde M., Kellens W., Verfaillie E., Ooms, K. (2017) *Evaluation of web maps for the communication of flood risks to the public in Europe*. *International Journal of Cartography*, 1-16.

Van Leer, B. (1997) *On the relation between the upwind-differencing schemes of Godunov, Engquist – Osher and Roe*. In: *Upwind and high-Resolution schemes* (pp. 33-52). Springer, Berlin, Heidelberg.

- Vecchione S. (2013) *Ponti, Fiumi e Alluvioni*, Il Quotidiano della Calabria (17 Novembre 2013), pp.42 -47.
- Voinov, A., Bousquet, F. (2010) *Modelling with stakeholders*. Environ. Modell. Soft. 25, 1268-1281.
- Voinov, A., Kolagani, N., McCall, M.K., Glynn, P.D., Kragt, M.E., Ostermann, F.O., Price, S.A., Ramu, P. (2016) *Modelling with stakeholders - Next generation*. Environ. Modell. Soft. 77, 196-220.
- Wadey, M.P., Cope S.N., Nicholls, R.J., McHugh K., Grewcock G., Mason T. (2015) *Coastal flood analysis and visualization for a small town*. Ocean Coast Manage. 116, 237-247.
- Wallace, L., Gupta, V., Reinke, K., & Jones, S. (2016). *An assessment of pre-and post fire near surface fuel hazard in an Australian dry sclerophyll forest using point cloud data captured using a terrestrial laser scanner*. Remote Sensing, 8(8), 679.
- White, I., Kingston, R., Barker, A. (2010) *Participatory geographic information systems and public engagement within flood risk management*. J Flood Risk Manag. 3(4), 337-346.
- Xia, J., Falconer, R. A., Lin, B., & Tan, G. (2011) *Numerical assessment of flood hazard risk to people and vehicles in flash floods*. Environmental Modelling & Software, 26(8), 987-998.
- Xia, X., Liang, Q., Ming, X., Hou, J. (2017). *An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow simulations*. Water Resour. Res. 53(5), 3730-3759.
- Yim, S., Olsen, M., Cheung, K., Azadbakht, M. (2014) *Tsunami modeling, fluid load simulation, and validation using geospatial field data*. J. Struct. Eng. 140(8), A4014012.
- Yin, J., Yu, D., Yin, Z., Liu, M., & He, Q. (2016) *Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China*. J Hydrol. 537, 138-145.
- Young, A. P., Olsen, M. J., Driscoll, N., Flick, R. E., Gutierrez, R., Guza, R. T., Johnstone, E., Kuester, F. (2010) *Comparison of Airborne and Terrestrial Lidar Estimates of Seacliff Erosion in Southern California*. Photogramm Eng Remote Sensing 76, 421-427.
- Zaalberg, R., Midden, C.J.H. (2013) *Living behind dikes: mimicking flooding experiences*. Risk Anal. 33(5), 866-876.
- Zhang, S., Li, W., Lei, X., Ding, X., Zhang, T. (2017) *Implementation methods and applications of flow visualization in a watershed simulation platform*. Adv. Eng. Soft. 112, 66-75.
- Zhang, S., Xia, Z., Wang, T., (2013) *A real-time interactive simulation framework for watershed decision making using numerical models and virtual environment*. J. Hydrol. 493, 95-104.
- Zhou Z., Gong, J., Guo, M. (2016) *Image-Based 3D Reconstruction for Posthurricane Residential Building Damage Assessment*. J Comput Civil Eng. 30, 04015015.
- Zischg, A.P., Mosimann, M., Bernet, D.B., Röthlisberger, V. (2018) *Validation of 2D flood models with insurance claims*. J. Hydrol. 557, 350-361.