



POLITECNICO

MILANO 1863

Scuola di Ingegneria Idraulica e dell'Ambiente
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Idraulica

*La rappresentazione qualitativa dei danni da alluvione sul
fiume Lambro al termine del progetto FLORIMAP*

Relatore:

Prof. Ing. Daniele Bocchiola

Correlatore:

Prof. Ing. Renzo Rosso

Candidato:
Federico Draetta
Matr: 927454

Indice

	Pagina
1 Abstract	9
2 Introduzione	11
3 Il rischio idraulico	12
3.1 Il dissesto idrogeologico in Italia	12
3.2 Il tema del rischio in ambito idraulico e idrologico	17
3.3 Quadro normativo	20
3.4 Tecniche di mitigazione del rischio idraulico	22
4 FLORIMAP	25
4.1 Aspirazioni del progetto	25
4.2 Revisione delle distribuzioni statistiche	27
4.2.1 Il metodo VAPI	27
4.2.2 Aggiornamento delle stime dei parametri GEV	29
4.2.3 Le portate indice	31
4.2.4 I quantili di portata	32
4.3 Contributo della Tesi al progetto	33
5 Una rappresentazione qualitativa del rischio	35
5.1 Il caso della città di Mandra	35
5.2 Il caso studio: fiume Lambro	40
5.2.1 Analisi geomorfologica del fiume	41
5.2.2 Alluvione del Novembre 2014	43
5.3 Analisi sezioni critiche del fiume	43
5.3.1 Analisi indiretta delle aree allagate	52
5.3.2 Costruzione scale qualitative di danno	58
5.3.3 Mappatura qualitativa dei danni per categoria	64
5.3.4 Simulazione degli allagamenti	69
6 Analisi dei risultati	79
6.1 Individuazione di legame funzionale empirico tirante-danno	80
6.2 Mappa qualitative dei danni per TR 50	84
6.3 Mappa qualitative dei danni per TR 200	86
6.4 La classe di esposizione	88
6.5 Il rischio idraulico	90
7 Considerazioni conclusive	92
8 Ringraziamenti	93
Sitografia	94
Bibliografia	95

Elenco delle tabelle

4.1	Numero dati utilizzati per regione omogenea	28
4.2	Stime pre '70 parametri GEV	30
4.3	Stime aggiornate parametri GEV	30
4.4	Le stime di Q_{indice}, Q_T verranno adoperate, all'interno di questa tesi, come riferimento a partire dalle portate registrate dagli idrometri dislocati lungo il Lambro, al fine di caratterizzare il tempo di ritorno associato agli avenuti storici	32
5.1	Scala di gravità[2] di danneggiamento per gli oggetti mobili. La scala si basa sul trasporto di oggetti di dimensione e peso crescente	36
5.2	Scala di gravità[2] per i possibili danni all'ambiente naturale, classificati in base a geomorfologia, vegetazione, inquinamento e ripercussioni dirette sulle coltivazioni agricole	37
5.3	Scala di gravità[2] per i possibili danni agli abitanti locali	38
5.4	Scala di gravità[2] per i possibili danni all'ambiente costruito, ripartito in infrastrutture ed edifici privati	39
5.5	Principali alluvioni in Italia per decessi	58
5.6	Principali alluvioni in Italia per danni all'ambiente naturale e costruito	59
5.7	Danni ad abitanti	60
5.8	Danni all'ambiente costruito	61
5.9	Danni ad oggetti mobili	62
5.10	Danni all'ambiente naturale	63
5.11	Valori di danno empirico per categoria	68
6.1	Elementi a rischio ai sensi del DPCM 29/09/98	88
6.2	Classi di rischio idrologico-idraulico ai sensi del DPCM 29/09/98	90

Elenco delle figure

3.1	Popolazione a rischio alluvione residente in aree a pericolosità media [5]	13
3.2	Quantità di suolo consumato, dato ISPRA 2021 [6]	15
3.3	Ripartizione della pioggia netta rispetto alla pioggia linda, al variare del CN [7]	16
3.4	Mappa del numero di curva CN per la CMM [8]	17
3.5	Tecniche di mitigazione del rischio idraulico	22
3.6	Rischio mitigato e residuale del quantile T-ennale	23
4.1	Ripartizione compiti fra i vari atenei	26
4.2	x_T in Regione omogenea A	29
4.3	x_T in Regione omogenea B	29
4.4	x_T in Regione omogenea C	30
4.5		31
4.6	Confronto grafico fra i valori di magnitudo della scala Richter e l'equivalente quantità di energia liberata. Nel diagramma centrale il numero medio di eventi sismici annuali nel mondo associati alle varie magnitudo	34
5.1	A sinistra la mappatura dei danni per intensità, con annessa scala cromatica, a destra la mappa dei tiranti di allagamento nella stessa area geografica (Città di Mandra): il celeste indica profondità modeste, il viola indica profondità elevate	40
5.2	Sezioni critiche lungo il Lambro urbano, Google Earth Pro [22]	51
5.3	Sentinel 1	52
5.4	Sentinel 1, pre-processata	53
5.5	Ricerca di valore di soglia di radiazione riflessa	54
5.6	Immagine filtrata per bassa riflettanza	54
5.7	11/11/2014	55
5.8	15/11/2014	55
5.9	22/11/2014	56
5.10	27/11/2014	56
5.11	Quote idrometriche nelle stazioni di Lesmo e via Feltre	57
5.12	Scala cromatica di danni a persone	64
5.13	Scala cromatica di danni all'ambiente costruito	64
5.14	Scala cromatica di danni all'ambiente naturale	64
5.15	Scala cromatica di danni ad oggetti mobili di origine artificiale	64
5.16	Scala cromatica di danno massimo per zona	64

5.17	A sinistra la mappa dei danni alle persone, a destra quella dei danni all'ambiente costruito	65
5.18	A sinistra la mappa dei danni all'ambiente naturale, a destra quella dei danni agli oggetti mobili	65
5.19	Mappa globale di massimo danno per area fra i quattro tipi proposti	66
5.20	Scala di deflusso dell'idrometro di via Feltre	69
5.21	Scala di deflusso dell'idrometro di Lesmo - Peregallo	70
5.22	Sezione di Feltre, Milano - AIPo [29]	72
5.23	Sezione di Lesmo, Monza - AIPo [29]	72
5.24	Idrogrammi stimati per traslazione diretta	73
5.25	Focus sul picco del 15/11/2014	74
5.26	Simulazione numerica dell'allagamento 15/11/2014	76
5.27	Simulazione numerica dell'allagamento per TR50	77
5.28	Simulazione numerica dell'allagamento per TR200	78
6.1	Comparazione danno - tirante per categoria e per posizione	79
6.2	Relazione funzionale danno - tirante globale	80
6.3	Relazione funzionale danno - tirante per la categoria "oggetti mobili"	81
6.4	Relazione funzionale danno - tirante per la categoria "amb. costruito"	81
6.5	Relazione funzionale danno - tirante per la categoria "amb. naturale"	82
6.6	Relazione funzionale danno - tirante per la categoria "popolazione"	82
6.7	Comparazione danno - tirante per categoria e per posizione, TR50	83
6.8	Comparazione danno - tirante per categoria e per posizione, TR200	83
6.9	Mappa globale di massimo danno per TR50	84
6.10	Mappa di danni a persone e amb. costruito per TR50	85
6.11	Mappa di danni ad amb. naturale e oggetti mobili per TR50	85
6.12	Mappa globale di massimo danno per TR200	86
6.13	Mappa di danni a persone e amb. costruito per TR200	87
6.14	Mappa di danni ad amb. naturale e oggetti mobili per TR200	87
6.15	Mappa degli elementi a rischio inondazione lungo il Lambro urbano	89
6.16	Mappa del rischio idraulico sul Lambro urbano, qui il PDF originale	91

Abstract

La gravità del pericolo associato ad un evento ostile, così come la reazione ad esso, è fortemente dipendente dalla percezione del rischio stesso[1]. Negli ultimi anni si è riscontrata una sostanziale inefficacia comunicativa di un approccio esclusivamente quantitativo, cosicché la divulgazione del rischio risulta spesso inefficiente, e le comunità locali si dimostrano impermeabili al tema del rischio idraulico.

Con il presente lavoro si intende proporre un modello qualitativo di rappresentazione dei danni potenziali da alluvione, classificandoli in delle macrocategorie[2], con l'obiettivo di garantire una più chiara lettura, e quindi percezione, del rischio idraulico. La ricerca si focalizza sul fiume Lambro, sull'impronta del Progetto *FLORIMAP*: a partire da un evento studio - risalente al 15 Novembre 2014, di cui si raccoglie letteratura relativa a danni e disservizi provocati dalle inondazioni, si costruiscono delle scale qualitative empiriche che vengono correlate ai tiranti simulati per lo stesso giorno, per poi utilizzare lo stesso legame funzionale per eventi a tempo di ritorno noto.

The severity of danger related to an hostile event, as well as the reaction to it, strictly depends on the perception of the risk itself[1]. During the last years the purely quantitative approach has been found to be basically ineffective for danger communication, and local communities have become impervious to hydraulic risk.

The goal of the current thesis is to suggest a qualitative representation of the potential damages coming from flood events, classifying them through empirical categories[2], in order to enhance the population awareness of hydraulic risk. The work takes as reference the field case of Lambro river flood event of 15/11/2014, of which some pieces of information were collected through literature about damages and troubles generated by the flood. Then, some qualitative scales were built: these were correlated to the simulated water depths in order to come up with a functional relationship to be used for different return periods.

Introduzione

Tra i fenomeni di origine naturale di maggior impatto sulla vita e incolumità degli esseri viventi, fra cui l'uomo, le alluvioni rivestono sicuramente un ruolo predominante. In particolare, in Italia, la sensibilità dell'opinione pubblica nei confronti del tema si è sviluppata a seguito dei due maggiori eventi che hanno flagellato il Paese: rispettivamente le alluvioni del Polesine [1951] e di Firenze [1966].

È infatti in seguito a questi drammatici episodi che fu istituita la Commissione Ministeriale presieduta dal prof. Giulio De Marchi, del Politecnico di Milano, tramite la quale si affrontò per la prima volta il problema della protezione idraulica del territorio nell'ottica - inedita - di un approccio olistico, a scala nazionale: fino a quel momento infatti, la gestione della salvaguardia della popolazione nei confronti di eventi estremi era deputata alle singole autorità locali, senza un reale dialogo fra di esse.

D'altro canto, pur riconoscendo l'indiscutibile progresso nella gestione e attenzione alla questione idrogeologica in Italia nel corso dei decenni, oggigiorno altri problemi permangono e anzi vengono acuiti da fattori antropici quali la progressiva cementificazione delle aree verdi. Una delle criticità ancora in attesa di essere risolte è sicuramente la comunicazione e la *comunicabilità* delle misure ed operazioni di riduzione del rischio idraulico, nonché dei pericoli legati all'occorrenza alluvionale: uno dei vulnus operativi principali risulta essere proprio legato alla percezione, da parte della popolazione, della potenza distruttiva degli eventi naturali.

Infatti se da una parte è evidente l'importanza, al fine della protezione civile nei confronti delle alluvioni, della considerazione e quantificazione dei potenziali danni provocati dall'evento alluvionale ad oggetti, ambiente e persone, è altrettanto lampante la necessità di poter trasmettere in modo chiaro ed efficace questi ultimi alla popolazione locale, al fine di agevolare una crescente coscienza e sensibilità collettiva nei confronti delle alluvioni. Oltre ciò, pur riconoscendo la fondamentale importanza della realizzazione di opere strutturali atte a mitigare il rischio idraulico, ad esempio incrementando la capacità di invaso delle sezioni fluviali critiche o intervenendo direttamente sull'idrogramma sviluppato durante l'alluvione, è del tutto evidente come, indipendentemente dall'entità e dal costo di tali opere - persista comunque un *rischio residuale*, con cui bisogna imparare a convivere e che non deve mai essere ritenuto eccessivamente lontano da noi.

È proprio sulla base di tali riflessioni che attraverso il suddetto lavoro di Tesi si propone l'utilizzo di un approccio nuovo in Italia, con cui fornire carte immediatamente fruibili anche - e soprattutto - da chi non studia l'argomento, basate sulla costruzione di una relazione funzionale sperimentale tra tiranti idrici e danni a cose, persone, ambiente naturale e costruito, in modo tale da poter sviluppare, sulla base delle mappe di allagamento richieste dall'Autorità di Bacino, delle mappe qualitative dei danni provocati dall'alluvione.

Il rischio idraulico

Paragrafi

3.1	Il dissesto idrogeologico in Italia	12
3.2	Il tema del rischio in ambito idraulico e idrologico	17
3.3	Quadro normativo	20
3.4	Tecniche di mitigazione del rischio idraulico	22

3.1 Il dissesto idrogeologico in Italia

Se ci si sofferma sulle ragioni per le quali gli eventi del Polesine e di Firenze prima citati si sono rivelati catastrofici, è immediato notare come in entrambi i casi la forza naturale dell'alluvione si sia concentrata in aree geografiche caratterizzate dalla presenza di molteplici centri abitati, e per giunta ad alta densità abitativa.

In effetti, negli ultimi 150 anni nel nostro Paese vi è stata una crescente attenzione alla riduzione della pericolosità idraulica (*Natural Hazard*), accompagnata però da una altrettanto rapida crescita dell'esposizione al rischio idraulico, sostanzialmente trascurando la vulnerabilità [3]. Dal rapporto ISPRA sul dissesto idrogeologico in Italia [4] emerge chiaramente come circa il 10,4% della popolazione del Paese, così come il 9,3% degli edifici e il 12,4% delle industrie siano soggette a rischio alluvioni. In particolare l'*Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale* ha stimato, nel 2018 [5], la seguente 3.1 distribuzione della quantità di popolazione a rischio lungo la penisola. Risulta lampante la correlazione fra comunità maggiormente a rischio e dimensione dell'agglomerato urbano, è invero chiaro come il rischio sia concentrato nei capoluoghi di regione.

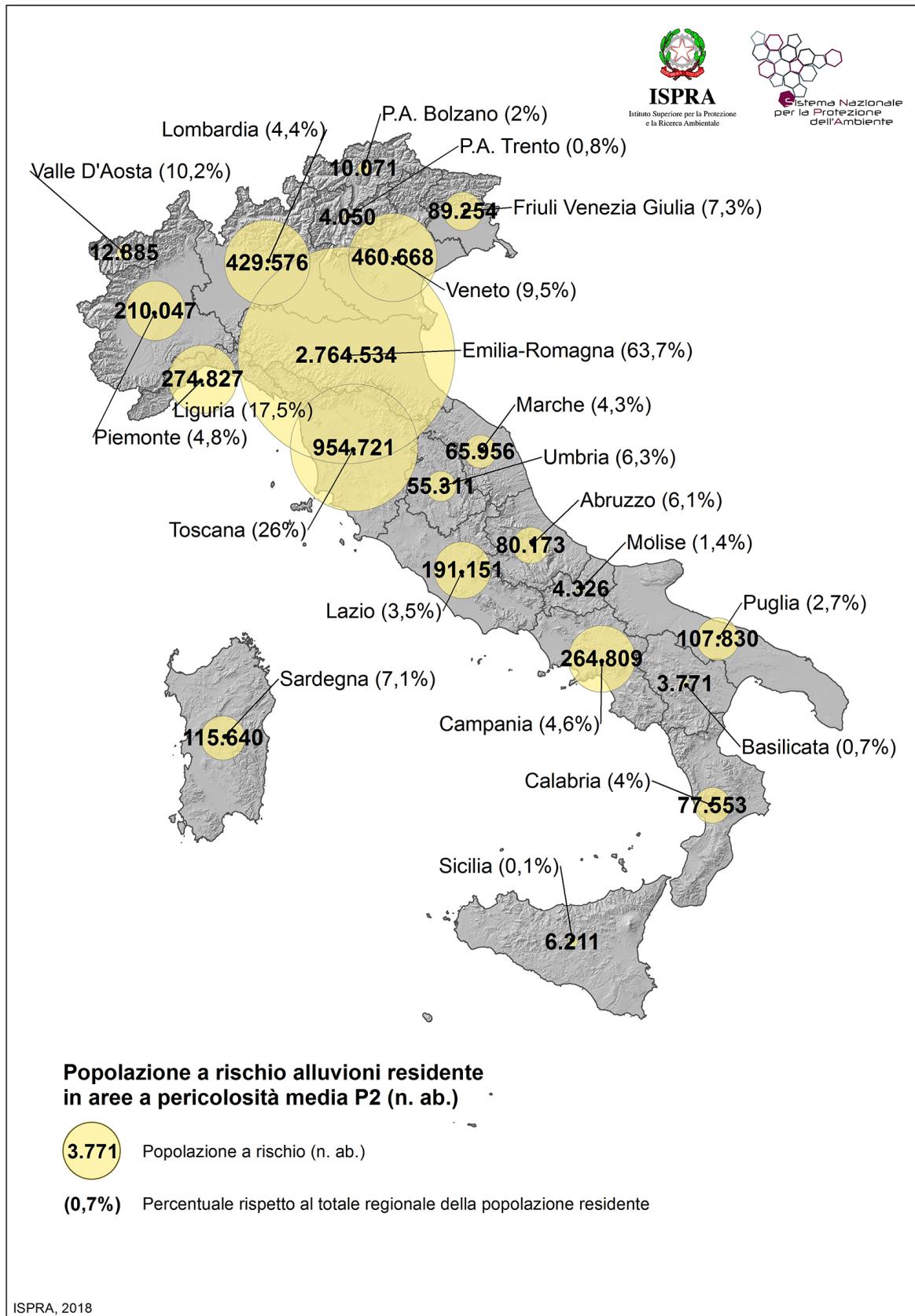


Figura 3.1: Popolazione a rischio alluvione residente in aree a pericolosità media [5]

Percentuali così elevate sono da imputare a molteplici cause, fra cui rivestono un ruolo preponderante le seguenti:

- opere antropiche di modifica o riduzione della sezione libera utile allo smaltimento di deflusso superficiale (*e.g.: "tombinatura" parziale o completa del corso idrico*)
- opere antropiche di deviazione di corsi d'acqua, al fine di poter espandere l'estensione di un centro abitato. In questo caso il rischio è duplice in effetti, in quanto con l'occorrenza di una piena, non vi è soltanto il rischio di inondazione dell'area limitrofa alla nuova sede del tronco fluviale sottoposto a deviazione, ma anche la possibilità che il corso d'acqua ritorni nel suo alveo originale, allagando zone che, erroneamente, erano fino a quel momento state ritenute a basso rischio proprio a causa della deviazione
- l'espansione di un centro urbano implica necessariamente un accrescimento proporzionale della rete fognaria, così come proporzionale è pure la riduzione della capacità di ritenzione del suolo a causa dell'impermeabilizzazione delle superfici tramite l'utilizzo di asfalti e bitumi. Al contempo, quindi, non solo si aumenta il volume di pioggia che produce deflusso superficiale, ma l'acqua raccolta, a causa della presenza del bacino fognario, si propaga più rapidamente verso valle, con un tempo di corrivazione minore e dunque riducendo il tempo di arrivo dell'onda di piena a valle
- opere di ingegneria idraulica che rappresentano contromisure strutturali per fronteggiare una piena, riducendo la probabilità di esondazione del fiume (*e.g.: argini artificiali, casse d'espansione*) ma naturalmente non eliminandola del tutto, trasmettendo quindi un pericoloso senso di sicurezza agli abitanti
- scarsa - o assente - comunicazione del rischio e coinvolgimento delle comunità locali - non solo con iniziative atte a potenziare la coscienza collettiva nei confronti del tema, ma anche tese all'accrescimento della sensibilità dei cittadini nei riguardi dell'utilizzo di tecniche di riduzione del rischio stesso, che possono - ma non necessariamente devono - prevedere la costruzione di opere idrauliche¹.

Se si guarda all'uso del suolo in Italia, i dati sono allarmanti: infatti nel 2020 l'utilizzo di suolo si è sviluppato con una velocità impressionante di circa $2 \text{ m}^2/\text{sec}$, per un totale di circa 57 Km^2 occupati [6]. Nella mappa di cui sotto 3.2 appare evidente come questo sia, naturalmente, un fenomeno più accentuato nei grandi centri abitati, in cui si osserva nel corso degli anni un progressivo depauperamento della quantità di aree rurali. Inoltre è possibile osservare una perfetta coerenza fra la distribuzione della popolazione a rischio 3.1 e quella del suolo impermeabilizzato.

¹Nelle successive sezioni viene approfondita la distinzione fra opere strutturali e non strutturali per la mitigazione del rischio idraulico

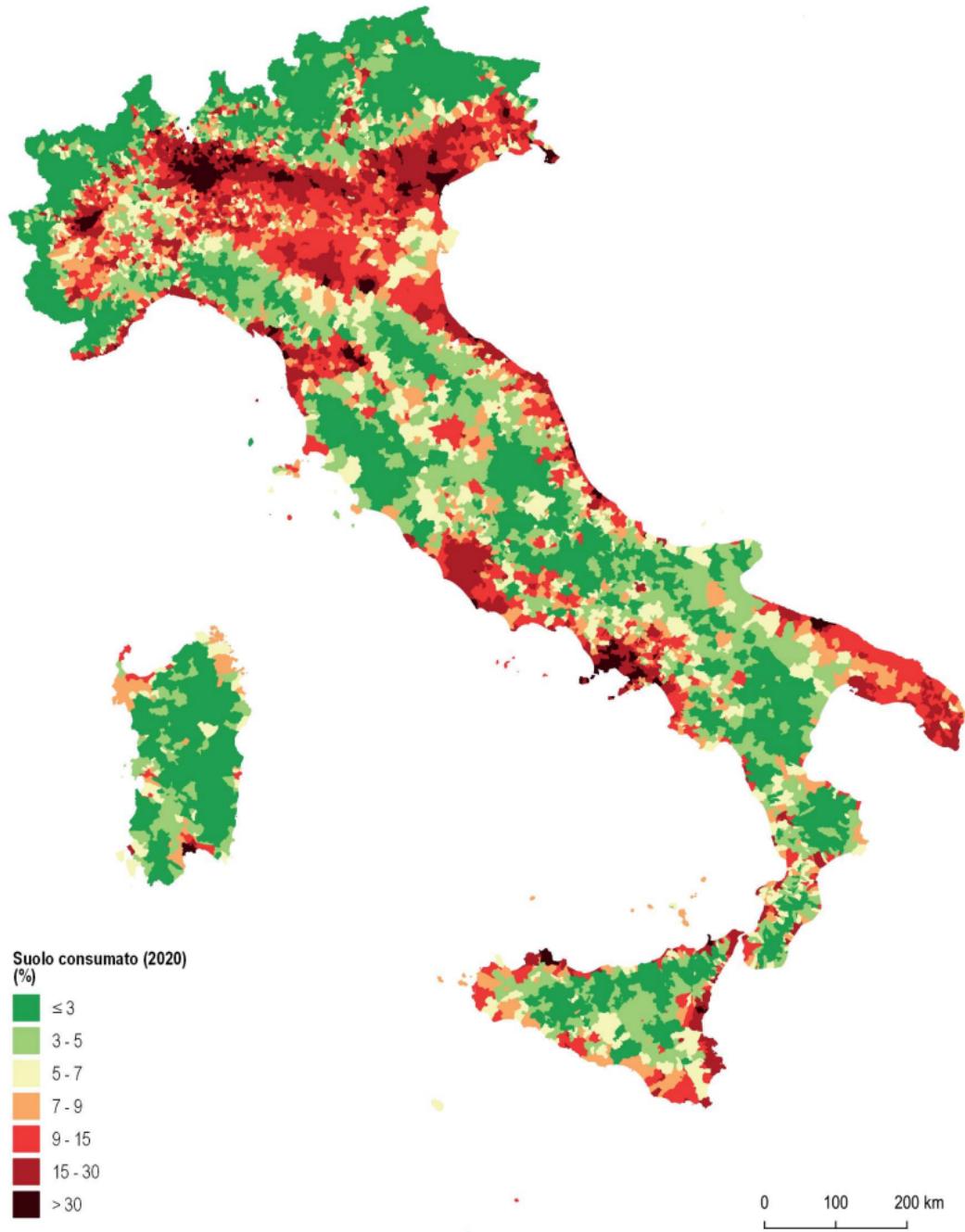


Figura 3.2: Quantità di suolo consumato, dato ISPRA 2021 [6]

Per quantificare, ai fini idraulici, il consumo del suolo, si richiama sinteticamente il metodo *SCS-CN* per la misurazione del volume - specifico - netto di deflusso superficiale. Attraverso l'utilizzo di questo metodo è possibile studiare la risposta idrologica di un bacino idrografico ad una data sollecitazione meteorica, in particolare riuscendo ad individuare una stima della quantità di precipitazione che contribuirà al deflusso netto. Il metodo fu proposto dall'ente statunitense *Soil Conservation Service* nel 1972, e si basa su due equazioni principali:

1. equazione di continuità:

$$I = I_a + F + P$$

ove:

- I = volume lordo di precipitazione
- I_a = volume specifico di imbibimento del suolo
- F = volume specifico di infiltrazione nel suolo
- P = volume specifico di ruscellamento

2. equazione di bilancio:

$$P : (I - I_a) = F : S$$

le due formule indicano, rispettivamente, che la quantità totale di acqua precipitata viene ripartita fra deflusso superficiale, infiltrazione nel suolo e imbibimento iniziale. Inoltre il rapporto di proporzionalità che intercorre fra il volume netto di precipitazione e il volume lordo, depurato dell'imbibimento iniziale, è il medesimo che lega il volume specifico di infiltrazione ad un suo estremo superiore. A partire da queste considerazioni è possibile calcolare il volume netto precipitato come:

$$P = \frac{(I - I_a)^2}{(I - I_a + S)}$$

In particolare per definire S è necessario quantificare il *CN*, ossia il numero di curva, che è funzione di numerosi parametri, fra cui anche l'uso del suolo. Il *Curve Number* rappresenta infatti il discriminante attraverso cui possiamo ottenere, a partire da un certo volume lordo precipitato, più o meno deflusso superficiale: all'aumentare di questo infatti la quantità di deflusso netto diventerà sempre più prossima alla quantità d'acqua precipitata. Il numero di curva è funzione, oltre che della condizione di imbibimento antecedente l'evento meteorico (*Antecedent Moisture Condition - AMC*) e della classe di permeabilità, proprio dell'utilizzo del suolo: intuitivamente, dunque, maggiore sarà la quantità di pavimentazioni impermeabili, maggiore sarà il valore del *CN*.

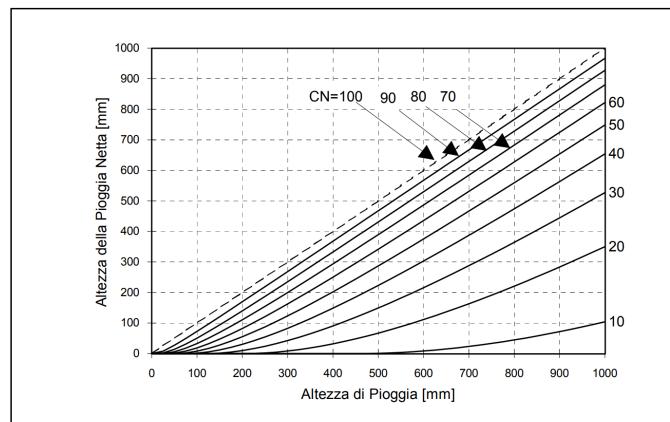


Figura 3.3: Ripartizione della pioggia netta rispetto alla pioggia lorda, al variare del *CN*[7]

Di seguito si riporta una mappa del numero di curva per la *Città Metropolitana di Milano - CMM*.

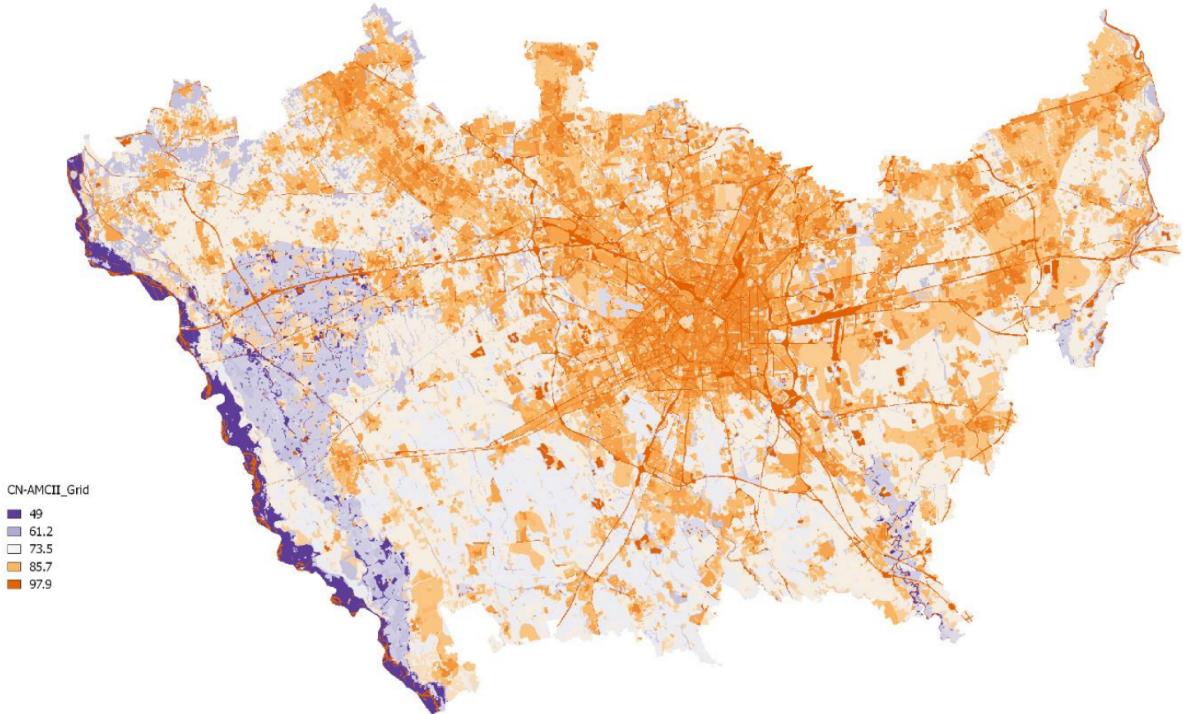


Figura 3.4: Mappa del numero di curva *CN* per la *CMM*[8]

Dalla mappa 3.4 appare evidente come Milano, vista l'elevata presenza di superfici impermeabili ed asfaltate, "[...] si trovi oggi priva di grandi spazi verdi all'interno del suo tessuto consolidato, mentre i grandi polmoni verdi rimangono al confine tra i suoi limiti amministrativi e l'area metropolitana"[9]. Da queste considerazioni preliminari è evidente come l'attività umana possa materialmente modificare (aumentare) il rischio idraulico associato all'allagamento per alluvione, tuttavia il concetto di rischio si basa su molteplici fattori, che verranno esaminati nel dettaglio nella sezione successiva.

3.2 Il tema del rischio in ambito idraulico e idrologico

Il concetto di rischio è distinto da notevole trasversalità, è infatti presente in campi anche molto distanti fra loro, quali ad esempio l'ambito economico, l'ambito assicurativo e non per ultimo quello naturale, essendo, in generale, funzione della probabilità di accadimento di un certo evento avverso, o critico.

Esso può essere classificato, a seconda della complessità nella sua quantificazione, in tre categorie:

- semplice: laddove è possibile, con una certa accuratezza, determinare il verificarsi degli eventi e le loro conseguenze (*e.g.: incidenti stradali*). In questi casi anche non utilizzando un campione estremamente numeroso le stime risultano comunque affidabili
- complesso: il sistema analizzato è costituito da molti elementi (*e.g.: reti idrauliche, reti elettriche*); in questi casi il verificarsi di un evento avverso può dipendere da un alto numero di differenti combinazioni di molte variabili

- incerto: quando è molto difficile prevedere l'occorrenza degli eventi e le loro conseguenze. I rischi naturali ricadono in questa classe (*e.g.: piene, magre, ondate di calore*)

Ad ogni modo non vi è una definizione univoca, e unitamente riconosciuta, di seguito si riportano le più utilizzate:

1. Willis, 2007: il rischio equivale alla perdita attesa (*i.e.: expected loss*), ossia è strettamente connesso ai danni conseguenti all'occorrenza di un dato evento

$$R = E$$

2. in ambito economico il rischio è definito come quantile associato ad una data probabilità, che viene chiamato $VaR = Value at Risk$

$$R = VaR$$

3. Graham and Weiner, 1995: il rischio è pari alla probabilità di occorrenza di un evento avverso

$$R = P$$

In ambito prettamente ingegneristico, invece, e per il resto del presente lavoro, la definizione di rischio comunemente accettata è quella fornita dall'UNESCO nel *Report of consultive meeting of experts on the statistical study of natural hazard and their consequences* [?]:

$$R(E, I) = H(I) \cdot V(I, E) \cdot W(E) \quad (3.1)$$

ove si precisano i significati di ciascun termine come segue (R.Rosso [10] su definizioni UNESCO [?]):

1. "Pericolosità, H : è la probabilità che un fenomeno di una data intensità I si verifichi in un dato periodo di tempo, ed in una data area":

$$H = H(I)$$

Data una v.a. continua X , il tempo medio che separa due superamenti successivi di un valore x^* assunto da X è definito come

$$T_{x^*} = \frac{1}{Pr[X > x^*]} = \frac{1}{1 - Pr[X \leq x^*]} = \frac{1}{1 - F_X(x^*)}$$

ove con $F_X(x^*)$ si definisce la funzione di probabilità cumulata della v.a. X valutata nel valore x^* .

2. "Vulnerabilità, V : è il grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno di una data intensità. È espressa in scala da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale) ed è in funzione dell'intensità del fenomeno e della tipologia di elemento a rischio, E ":

$$V = V(I, E)$$

3. "Valore esposto, W : rappresenta il valore economico o il numero di unità relative ad ognuno degli elementi a rischio in una data area. Il valore è funzione della tipologia di elemento a rischio":

$$W = W(E)$$

4. "Rischio, R : è il valore atteso delle perdite umane, dei feriti, dei danni alle proprietà e delle perturbazioni alle attività economiche dovuti al verificarsi di un particolare fenomeno di una data intensità. Il rischio totale è associato ad una particolare elemento a rischio E e ad una data intensità I , è il prodotto":

$$R(E, I) = H(I) \cdot V(I, E) \cdot W(E)) \quad (3.2)$$

È inoltre importante chiarire, proprio a partire da tale definizione di R , che non è sufficiente focalizzarsi singolarmente sul valore esposto, o sui tiranti potenzialmente sviluppati in un dato punto geografico: se ad esempio, a causa di un evento estremo, in un luogo si sviluppano tiranti idrici imponenti, ma nello stesso luogo vi è totale assenza di ambiente costruito o comunque antropizzato (e.g.: deserti), il rischio conseguente è comunque tendente allo zero, per la sua formulazione 3.2.

3.3 Quadro normativo

Precedentemente gli eventi estremi del Polesine [1951] e di Firenze [1966], la normativa in tema alluvioni in Italia era parecchio frammentata, e in generale non era contemplata la possibilità (necessità) dell'utilizzo di un metodo nuovo per l'analisi e la gestione di fenomeni naturali catastrofici quali possono essere quelli alluvionali. Fu infatti solo a partire dal 1970, con la nascita della Commissione De Marchi, che si "tracciò a scala nazionale un programma per la difesa del suolo che traguardava un lungo e faticoso, ma concreto percorso [...] che comprendeva una nuova interazione tra discipline diverse, in primis l'ingegneria delle acque e la geologia applicata [...]"[\[10\]](#).

Specificatamente, fu grazie alla Commissione de Marchi, all'interno degli atti conclusivi [\[1970\]](#), che si presentò per la prima volta la difesa idraulica nel contesto dell'unitarietà di bacino idrografico. La concretizzazione di questo lento iter burocratico - ad ogni modo, richiese circa vent'anni, fu infatti solo nel 1989, con le *Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo*[\[11\]](#), comunemente riassunta in Legge 183/89, che si definirono le unità territoriali responsabili della corretta pianificazione per la difesa e mantenimento di stato di salute delle acque: le Autorità di bacino, uno degli obiettivi principali delle quali è la redazione del PAI - *Piano di bacino per Assetto Idrogeologico*.

Attualmente lo strumento normativo di riferimento è rappresentato dalla "Flood Directive" - *Direttiva Alluvioni* 2007/60/CE, emanata dalla Comunità Europea, che ricalca sostanzialmente i concetti fondanti della Legge 183/89, apportando alcune modifiche, fra cui ad esempio l'accorpamento dei bacini idrografici in Distretti, con associata Autorità di Distretto, per i quali è necessario produrre un piano di gestione equivalente al precedente PAI.

La Direttiva Alluvioni viene recepita in Italia attraverso la "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni", D.Lgs. 49/2010[\[12\]](#). Subito dopo aver definito la ripartizione delle competenze amministrative, in quest'ultimo decreto legislativo si identificano gli elementi chiave necessari per una corretta valutazione del rischio, ossia[\[12\]](#):

- cartografie tematiche del distretto idrografico in una scala appropriata, che includono i limiti amministrativi, i confini dei bacini idrografici [...] e delle zone costiere dalle quali risulta l'uso del territorio
- descrizione delle alluvioni avvenute in passato, con notevoli conseguenze negative [...] e che, con elevata probabilità, possono ancora verificarsi in futuro in modo simile, compresa l'estensione dell'area inondabile [...]
- descrizione delle alluvioni significative avvenute in passato che pur non avendo avuto notevoli conseguenze negative ne potrebbero avere in futuro
- valutazione delle potenziali conseguenze negative di future alluvioni per la salute umana, il territorio, i beni, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche e sociali [...]

Uno dei punti cardine dell'Attuazione della direttiva 2007/60/CE è l'articolo 6 (*Mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni*), in cui vengono espresse le istruzioni per il tracciamento delle carte del rischio idraulico, esse devono rappresentare i seguenti fenomeni[\[12\]](#):

- "scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi"
- "alluvioni poco frequenti: tempo di ritorno fra 100 e 200 anni (media probabilità)"
- "alluvioni frequenti: tempo di ritorno fra 20 e 50 anni (elevata probabilità)"

è inoltre importante indicare come per ciascuno degli scenari appena elencati è necessario specificare:

- "*estensione dell'inondazione e portata della piena*"
- "*altezza e quota idrica*"
- "*caratteristiche del deflusso (velocità e portata).*"

Le misure di protezione, prevenzione e preparazione nei confronti degli eventi idrologici estremi sono poi ordinate all'interno dei *Piani di gestione del rischio di alluvioni* (Art. 7 49/2010). Nella fattispecie, in essi sono comprese tutte le misure atte ad indurre la "*riduzione delle potenziali conseguenze negative per la salute umana, il territorio, i beni, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche e sociali*", sono infatti tenuti in considerazione i seguenti fattori:

1. la portata della piena e l'estensione dell'inondazione
2. le vie di deflusso delle acque e le zone con capacità di espansione naturale delle piene
3. gli obiettivi ambientali relativi il decreto legislativo 152/2006
4. la gestione del suolo e delle acque
5. la pianificazione e le previsioni di sviluppo del territorio
6. l'uso del territorio
7. la conservazione della natura
8. la navigazione e le infrastrutture portuali
9. i costi e i benefici
10. le condizioni morfologiche e meteomarine alla foce

In questa sede si sono realizzate mappe qualitative di danno per eventi estremi con tempo di ritorno TR50 (alluvione frequente, elevata probabilità) e TR200 (alluvione poco frequente, media probabilità) attraverso un modello idraulico[13] calibrato per via indiretta - tramite immagini satellitari di allagamento, su un evento storico noto. Si sono inoltre ricercate, nell'area di indagine (i.e.: un tratto urbano del Fiume Lambro fra Monza e San Donato Milanese), informazioni circa le conseguenze negative dell'evento storico, per correlarle empiricamente al tirante idraulico simulato tramite modello per lo stesso giorno.

3.4 Tecniche di mitigazione del rischio idraulico

Dopo aver definito il concetto di rischio idraulico/idrologico, e aver delineato il contesto normativo in cui questo è inserito in Italia 3.3, si fornisce una breve panoramica dei metodi utilizzati per la mitigazione dello stesso, tenendo presente che il ruolo principale delle Autorità di Distretto non è tanto quello di portare a termine materialmente le operazioni di messa in sicurezza, quanto fornire indicazioni e linee guida che verranno poi rispettate dagli enti competenti.

Da un punto di vista concettuale è possibile classificare nel seguente modo 3.5 le tecniche con cui ridurre e contenere il rischio idraulico.

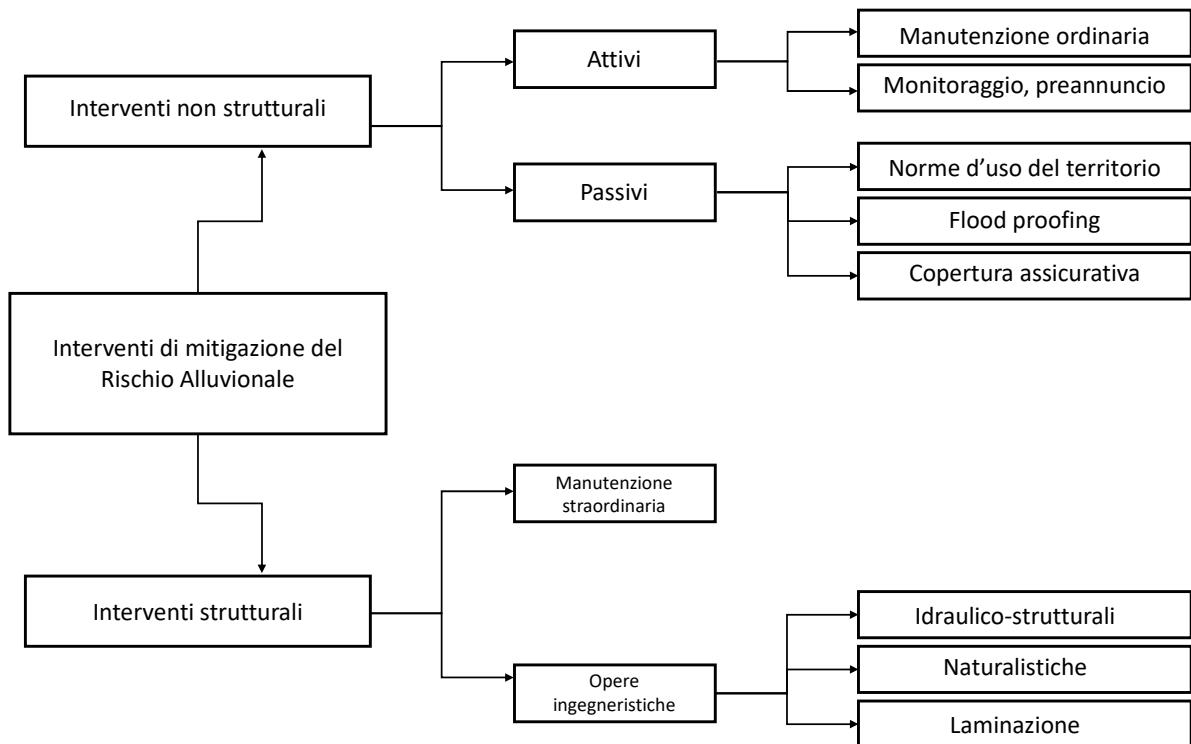


Figura 3.5: Tecniche di mitigazione del rischio idraulico

La macro suddivisione consiste nel differenziare gli interventi di natura strutturale da quelli non strutturali. Con i primi è possibile aumentare la capacità di invaso delle sezioni fluviali critiche, ad esempio tramite argini artificiali, o addirittura modificare l'idrogramma di piena (tecniche strutturali attive), con opere quali le casse d'espansione, provocando degli allagamenti controllati: in questo modo si riduce il rischio idraulico in quanto si interviene sul *Natural Hazard* - la pericolosità idraulica, dunque si riduce la probabilità di superamento della capacità di smaltimento di un dato tronco fluviale. Attraverso l'utilizzo della seconda macro categoria invece non si costruiscono materialmente delle opere ingegneristiche, dunque non si agisce sulla frequenza con cui una data struttura, nel tempo, risulta essere sottodimensionata, bensì ci si concentra sullo sviluppo di carte che regolano l'uso del suolo, si promuovono iniziative locali atte ad accrescere la consapevolezza dei cittadini nei confronti dei danni da alluvione e si sviluppano dei modelli matematici con cui implementare sistemi di allerta della popolazione, quindi si

agisce in modo preventivo al fine di ridurre in questo caso la vulnerabilità, e dunque il potenziale danneggiamento, a parità di tempo di ritorno, riducendo così in ultima istanza il rischio.

Vista la progressiva riduzione, negli ultimi anni, del suolo libero occupabile da imponenti opere idrauliche [6], l'importanza di adottare soluzioni non strutturali per fronteggiare le calamità naturali è cresciuta notevolmente. I vantaggi di questo modus operandi sono molteplici: se da un lato il risparmio economico rispetto all'utilizzo (e realizzazione) di opere strutturali è evidente, bisogna considerare che queste ultime richiedono ampi spazi in cui essere inserite, tempi talvolta molto lunghi prima di poter entrare in funzione, a valle di costruzione e collaudo, senza contare il malcontento degli abitanti locali che potrebbe scaturire da una drastica modifica del paesaggio.

Oltre i motivi appena elencati, ad ogni modo, è poi necessario considerare il rischio residuale, ossia il rischio idraulico rimanente a valle degli interventi strutturali: se infatti è vero che attraverso una data opera è possibile fronteggiare eventi idrologici importanti, la cui quantificazione viene tipicamente effettuata tramite quantile associato a un dato tempo di ritorno - x_T , è pur vero che vi sarà sempre, per quanto modesta, una certa probabilità per la quale l'opera risulti sottodimensionata, ossia un'opera strutturale non garantirà mai la certezza assoluta della sufficienza del suo funzionamento, al fine di fronteggiare un dato fenomeno naturale.

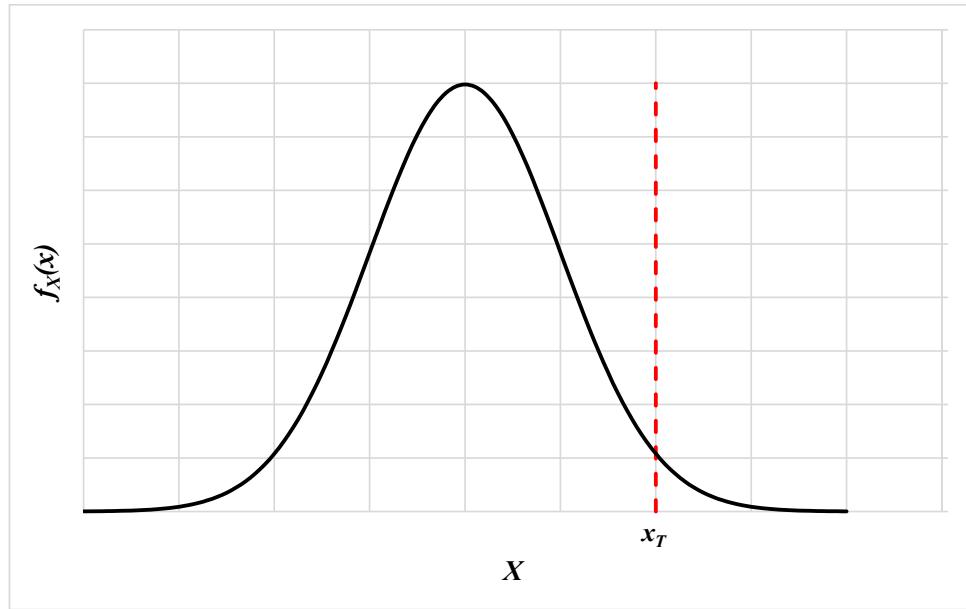


Figura 3.6: Rischio mitigato e residuale del quantile T-ennale

In riferimento al grafico qualitativo 3.6, data una v.a. continua X , distribuita secondo una data funzione probabilistica, tracciando la associata PDF - *Probability Density Function* e identificando un certo quantile di X estratto dalla suddetta PDF, l'area sottesa dalla curva - complessivamente pari al valore unitario, verrà suddivisa in due contributi, rispettivamente pari al rischio mitigato (a destra del quantile x_T) e rischio residuale (a sinistra del quantile x_T). All'aumentare del tempo di ritorno associato al quale si stima il quantile di X , aumenterà il rischio mitigato, e l'area rappresentante il rischio mitigato tenderà allo 0 senza mai raggiungerlo.

Di seguito si definisce il rischio residuale R_{res} di fallimento di un'opera strutturale - *i.e.*: probabilità che l'opera risulti sottodimensionata, per un orizzonte temporale di vita utile dell'opera di L anni, per un evento avverso con tempo di ritorno di T anni. Data la probabilità annuale che l'opera risulti sottodimensionata:

$$F_T = \frac{1}{T}$$

la probabilità complementare, ossia la probabilità che l'opera non risulti sottodimensionata in un anno è:

$$1 - F_T = 1 - \frac{1}{T}$$

dunque, ipotizzando un orizzonte temporale di funzionamento dell'opera (vita utile) di L anni, assunti statisticamente indipendenti fra loro, la precedente può essere calcolata, per L anni, come:

$$(1 - F_T)^L = (1 - \frac{1}{T})^L$$

di conseguenza, la probabilità che in L anni l'opera risulti sottodimensionata è data da:

$$1 - (1 - F_T)^L = 1 - (1 - \frac{1}{T})^L$$

Operativamente, le mappe qualitative di danno tematico da alluvione possono essere collocate all'interno degli interventi passivi non strutturali, in quanto rappresentano uno strumento tramite cui, potenzialmente, orientare preventivamente le maggiori risorse di protezione civile durante una piena, conoscendo in anticipo le aree maggiormente colpite e il target del danneggiamento².

²Nella costruzione delle mappe tematiche 5 si adottano quattro diverse classi: abitanti locali, ambiente naturale, ambiente costruito, oggetti mobili

FLORIMAP

Paragrafi

4.1	Aspirazioni del progetto	25
4.2	Revisione delle distribuzioni statistiche	27
4.2.1	Il metodo VAPI	27
4.2.2	Aggiornamento delle stime dei parametri GEV	29
4.2.3	Le portate indice	31
4.2.4	I quantili di portata	32
4.3	Contributo della Tesi al progetto	33

Il lavoro di Tesi si innesta all'interno del progetto *Smart FLOod RIisk MAnagement Policies - FLORIMAP*, coordinato dal Professor Renzo Rosso, Professore Ordinario di Idrologia e Costruzioni Idrauliche presso il Politecnico di Milano, e finanziato dalla Fondazione Cariplo e relativo al bando Ricerca dedicata al dissesto idrogeologico 2017.

4.1 Aspirazioni del progetto

L'obiettivo principale del progetto è una rimodulazione della visione e gestione del rischio idraulico/idrologico legato all'occorrenza alluvionale, nell'ottica di incrementare la resilienza delle comunità locali verso le alluvioni.

Punti cardine del progetto sono sicuramente:[14]:

- Analisi di vulnerabilità (grado di danneggiamento) e classe di esposizione di oggetti, ambiente e persone
- Distinzione della matrice del rischio di alluvione, fra naturale ed artificiale
- Globale miglioramento della mappatura e valutazione del rischio idraulico/idrologico
- Rappresentazione dei rischi di alluvione, e comunicazione degli stessi alle comunità locali

Da un punto di vista operativo, uno degli apporti del Politecnico di Milano al progetto *FLORIMAP* è stato quello della rivalutazione della distribuzione di eventi alluvionali estremi nelle regioni omogenee individuate nel Nord Italia, con un aggiornamento dei risultati idrologici ottenuti attraverso il progetto VAPI, nel quale ci si soffermò su dati risalenti al periodo 1920-1970.

A causa dell'ambizioso obiettivo preposto, e della complessità del tema trattato, il progetto *FLORIMAP* è stato da subito basato sulla collaborazione e sinergia di diverse figure professionali, peraltro provenienti da diverse università (scienziati sociali, psicologi, ingegneri dal Politecnico di Milano, Università di Pavia, Università degli studi di Milano Bicocca, Università degli studi di Brescia). Di seguito 4.1 viene indicata la distribuzione

del lavoro fra i vari atenei e politecnici, questo viene infatti suddiviso in *Work Packages* - *WP*, di cui si riporta un breve elenco.

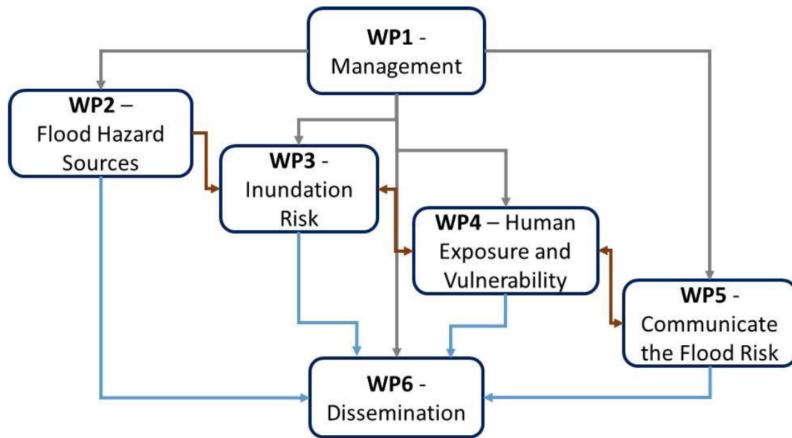


Figura 4.1: Ripartizione compiti fra i vari atenei

1. *WP1 - Management*: il compito della gestione del progetto è stato affidato al Politecnico di Milano
2. *WP2 - Flood Hazard Sources*: il compito dell'individuazione delle fonti - naturali ed artificiali - di pericolosità idraulica è stato assegnato al Politecnico di Milano
3. *WP3 - Inundation Risk*: il compito del miglioramento e affinazione delle tecniche di mappatura del rischio è stato assegnato ad UNIPV
4. *WP4 - Human Exposure and Vulnerability*: il compito di approfondire l'esposizione umana e il grado di danneggiamento di cose e persone è stato assegnato ad UNIBS
5. *WP5 - Communicate the Flood Risk*: il compito di comunicare il rischio, basandosi su indagini psicométriche incentrate su diverse componenti della comunità locale, quali cittadini di varie età, mass media, industrie, è stato affidato ad UNIMIB
6. *WP6 - Dissemination*: il compito di diffondere i risultati ottenuti dal progetto *FLO-RIMAP* all'interno della comunità scientifica, affinché questi non rimangano una monade isolata ma anzi inneschino una propagazione in più luoghi dello stesso approccio al rischio idraulico è affidato ad UNIMIB.

Nonostante il bisogno di effettuare computazioni statistiche avanzate, come ad esempio quelle necessarie all'aggiornamento delle stime dei quantili di portata e per la quantificazione dell'incertezza di stima, argomenti che verranno debitamente approfonditi in successive sezioni, è ad ogni modo doveroso chiarire che uno dei grandi motori che hanno innescato la nascita di questo progetto è il desiderio di affiancare ad un approccio quantitativo - sicuramente necessario al fine di ottenere risultati affidabili e concreti sulla previsione del comportamento probabilistico degli eventi meteorici, una visione e rappresentazione qualitativa dell'impatto delle alluvioni, a cui il cittadino soggetto a rischio sarà sicuramente più affine: è proprio in questa duplice visione che nel progetto si vuole "mescolare conoscenza quantitativa e qualitativa, soggettività ed oggettività" [1]. La motivazione di tale scelta scaturisce dalla consapevolezza che se da un lato, tramite strumenti legislativi quali la Direttiva Europea 2000/60/CE e l'operato di enti locali a varie scale (comuni, regioni) è possibile costruire un quadro normativo organico con cui gestire il rischio idraulico, è pur vero, e va riconosciuto, che "la conoscenza soggettiva [...] è importante almeno quanto quella che viene calata dall'alto" [1], e dunque una rappresentazione

qualitativa del rischio legato all'occorrenza di eventi naturali estremi, grazie alla sua immediatezza e semplicità interpretativa, può contribuire ad una più efficace lettura dello stato di pericolo, da parte di un numero maggiore di individui.

4.2 Revisione delle distribuzioni statistiche

Uno dei contributi chiave al Progetto *FLORIMAP* da parte del Politecnico di Milano è stato l'aggiornamento [15] dei quantili di portata per le regioni omogenee del Nord-Ovest Italia per come queste sono state definite nel metodo VAPI, ossia un metodo regionale per la stima dei quantili T-ennali di portata al colmo di piena. I valori aggiornati dei quantili di portata, poi, sono stati adoperati in questa Tesi per la costruzione degli idrogrammi di portata in sezioni strategiche del fiume Lambro.

4.2.1 Il metodo VAPI

Il metodo VAPI - VAlutazione PIene [16], finanziato dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, nasce dalla necessità di presentare un metodo uniforme, sull'intero territorio nazionale, atto alla stima delle portate di piena naturali. Esso è un metodo regionale basato sulla scissione del quantile T-ennale di portata x_T in un contributo locale, fortemente dipendente dalla geomorfologia dell'area in corrispondenza della quale è richiesta la stima di portata, e un quantile normalizzato:

$$q_T = q_{indice} \cdot x_T$$

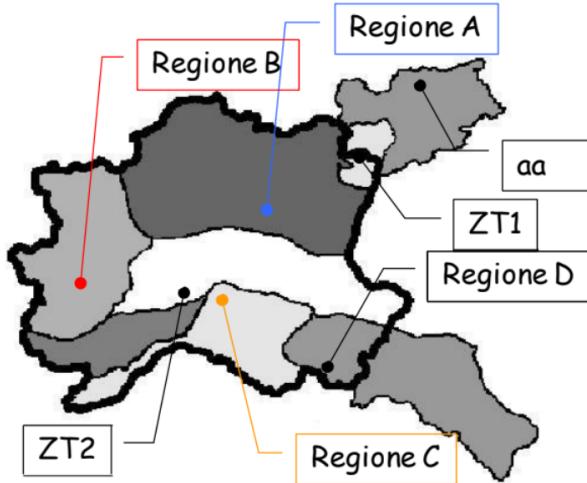
ove:

- q_T = quantile T-ennale della variabile aleatoria continua "portata"
- q_{indice} = portata indice, definita come media o moda delle portate transitanti nel sito fluviale specifico, essa è fortemente dipendente dalle caratteristiche geomorfologiche del sito di interesse, ed è allo stesso tempo totalmente insensibile al tempo di ritorno
- x_T = quantile adimensionale di portata per un tempo di ritorno di T anni, rappresenta un coefficiente amplificatore che scala il valore della portata indice in funzione del tempo di ritorno. x_T è uniforme all'interno di una stessa regione omogenea, dunque non dipende dalle caratteristiche locali del sito di interesse

Il vantaggio di utilizzare un metodo regionale, e nella fattispecie di utilizzare il metodo VAPI, risiede nella possibilità di effettuare stime di quantili associati a tempi di ritorno anche molto alti (*i.e.*: 1000, 2000 anni), grazie al raggruppamento di più bacini idrografici con caratteristiche idrologiche uniformi fra loro in regioni omogenee¹. In questo modo è possibile creare dei campioni artificiali in cui ricadono tutti i singoli campioni di portate osservate tramite le stazioni idrometriche dei vari bacini contenuti nella data regione omogenea, così da poter effettuare la stima di un quantile adimensionale associato ad un tempo di ritorno ben superiore a quello su cui si potrebbe lavorare se ci si concentrassasse esclusivamente su una singola stazione idrometrica. Per poter effettuare tale procedura è ad ogni modo necessario rendere omogenei i dati osservati di portata, acquisiti da idrometri installati su bacini diversi - o posizioni geografiche diverse all'interno dello stesso bacino, e quindi sono afferenti ad aree drenanti di diversa entità. A tal fine si normalizzano i dati di portata per ciascuna stazione di misura attraverso la media dei massimi annuali di portata in ciascuna stazione, in modo tale da utilizzare una variabile che tenga conto dell'estensione di ciascun bacino, rimuovendo la dipendenza dalla stessa nel campione equivalente.

¹Le regioni vengono definite omogenee a valle di un approccio multilivello basato sulla verifica della stagionalità delle alluvioni, su metodi parametrici di confronto di momenti statistici e sulla verifica dell'invarianza di scala

Di seguito si riportano le regioni omogenee localizzate nel Nord-Ovest Italia:



Precedentemente all'aggiornamento delle stime, i quantili di portata disponibili erano stati costruiti attraverso i dati di colmi di piena registrati fino al 1970: appariva quindi evidente la necessità di effettuare stime basate su osservazioni più recenti, in modo tale da poter utilizzare risultati che potessero essere ritenuti più affidabili.

Se si osserva l'incremento di misure di portata si nota come la quantità di dati a disposizione grazie all'aggiornamento sia aumentato di circa il 33% in media fra le varie regioni omogenee. Di seguito si riporta il confronto fra la quantità informativa utilizzata precedentemente il 1970 e a valle dell'aggiornamento, ove con N si identifica il numero di osservazioni equivalenti di colmo di piena nella data regione omogenea, per le regioni A, B, C [15]:

Regione omogenea	Pre '70	Post '70	Completo
A	309	157	466
B	346	119	465
C	346	119	465

Tabella 4.1: Numero dati utilizzati per regione omogenea

4.2.2 Aggiornamento delle stime dei parametri GEV

Al fine di stimare il quantile adimensionale si è adottata la *GEV - Generalized Extreme Value*, ossia una distribuzione probabilistica dei valori estremi, in quanto l'analisi è focalizzata su portate al colmo di piena. Si riporta l'espressione della sua funzione di ripartizione $F_X(x)$ e di un quantile estratto dalla suddetta distribuzione x_T :

$$F_X(x) = \exp \left[- \left(1 - \frac{k'(x - \varepsilon')}{\alpha'} \right)^{1/k'} \right]$$

$$x_T = \varepsilon' + \frac{\alpha'}{k'} \cdot \left[1 - \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{k'} \right]$$

ove:

- ε' = parametro di posizione
- α' = parametro di scala
- k' = parametro di forma

In seguito alla nuova stima di questi parametri, si sono ottenuti i seguenti risultati di quantili normalizzati, rispettivamente per le regioni omogenee A, B, C [15]:

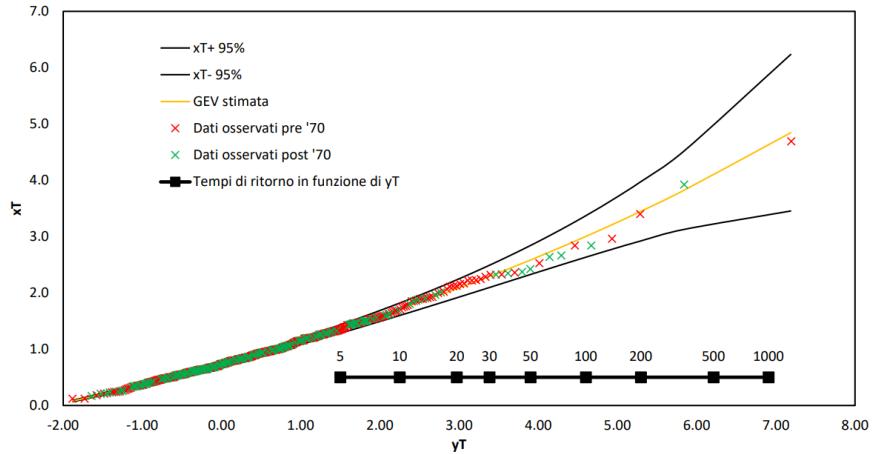


Figura 4.2: x_T in Regione omogenea A

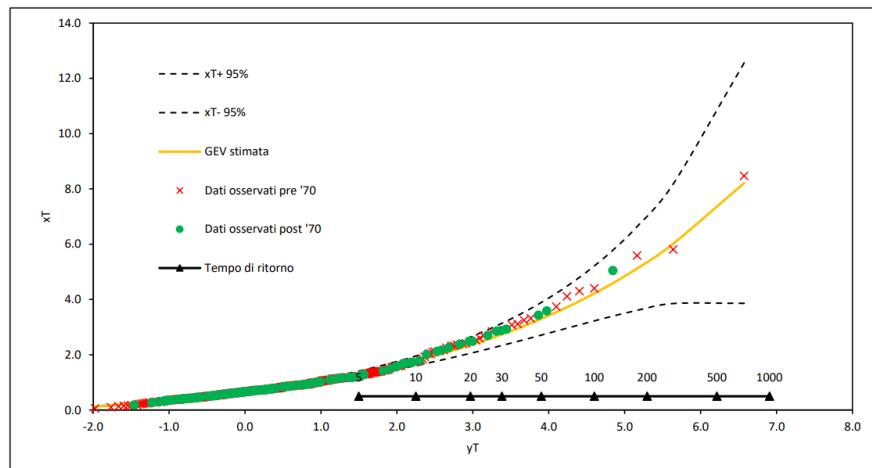


Figura 4.3: x_T in Regione omogenea B

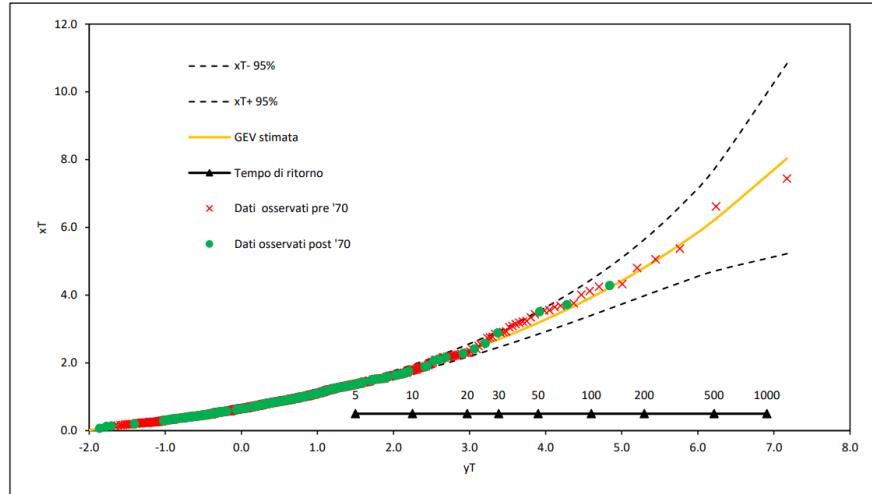


Figura 4.4: x_T in Regione omogenea C

Dal confronto fra l’andamento dei quantili normalizzati per i $TR = (5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 500, 1000)$ stimati originariamente e a valle dell’aggiornamento, si desumono risultati confortanti in quanto non vi sono grandi differenze fra le due stime, dunque gli effetti meteorologici connessi al cambiamento climatico non hanno influenzato significativamente la distribuzione dei massimi.

Le stime dei parametri per le tre regioni omogenee sono riportate di seguito:

	Regione A	Regione B	Regione C
ε'	0.750	0.651	0.644
α'	0.371	0.352	0.392
k'	-0.093	-0.299	-0.254

Tabella 4.2: Stime pre '70 parametri GEV

	Regione A	Regione B	Regione C
ε'	0.738	0.646	0.653
α'	0.384	0.348	0.398
k'	-0.096	-0.312	-0.233

Tabella 4.3: Stime aggiornate parametri GEV

4.2.3 Le portate indice

Successivamente all'aggiornamento dei quantili normalizzati di portata, il Politecnico di Milano [15] si è concentrato sulla stima delle portate indice attraverso scala invarianza, al fine di pervenire alla stima delle portate al colmo di piena in sezioni strategiche del fiume Lambro, avendo come obiettivo ultimo il tracciamento delle aree allagate per vari tempi di ritorno. Si allegano di seguito le posizioni delle sezioni menzionate:

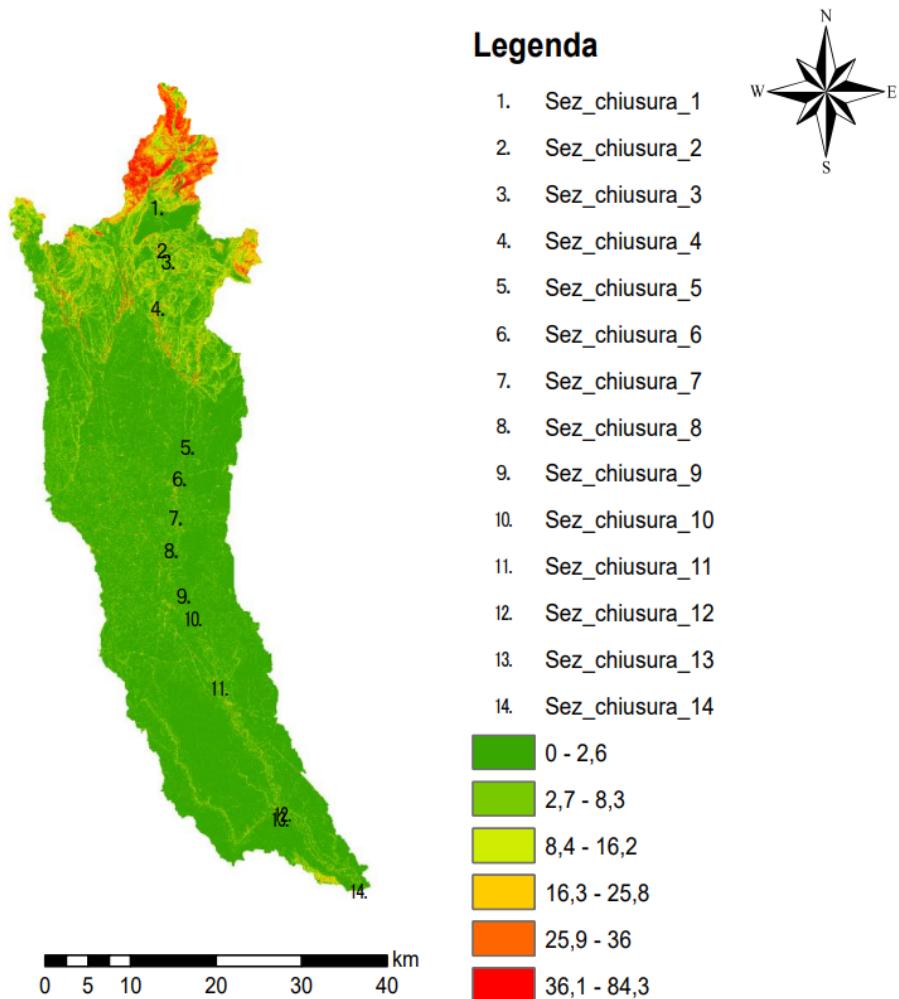


Figura 4.5

Le sezioni considerate, in particolare, sono: *Bevera a Colombaio, S/1a Lambro a monte dei laghi di Pusiano e Alserio, S/1b Immissione del torrente Bevera, S/1 Lambro a Lambrugo, S/2 Lambro a Peregallo, S/3 Lambro a Monza, S/4 Lambro a Sesto San Giovanni (Autostarda A4), S/5 Immissione del Naviglio della Martesana, S/6 Lambro a via Feltre in Milano, S/7 Lambro a via Bonfadini in Milano, S/8 Lambro a San Donato Milanese, S/9 Lambro a Melegnano, S/10a Lambro a Sant'Angelo Lodigiano, S/10 Immissione del Lambro Meridionale, S/11 Lambro a Mostiola.*

Per la stima delle portate indice si è utilizzata l’ipotesi di scala invarianza delle portate rispetto alle aree drenanti. Presa una regione Ω , e due siti idrografici i, j tali che $i, j \in \Omega$, definendo rispettivamente con $A_i, Q_{A_i}; A_j, Q_{A_j}$ l’area di scolo e la portata transitante per i siti i -esimo e j -esimo, esiste invarianza statistica di scala delle portate rispetto all’area se $\forall i, j \in \Omega$:

$$F(Q_{A_i}) = F\left(\left(\frac{A_i}{A_j}\right)^n \cdot Q_{A_j}\right)$$

ove:

1. $\left(\frac{A_i}{A_j}\right)^n$ = funzione di scala
2. n = esponente di scala, costante

4.2.4 I quantili di portata

In allegato vengono elencate le portate indice, e i quantili dimensionali associati, per diversi tempi di ritorno e per le varie sezioni target lungo l’asta fluviale del Lambro. ($A = [Km^2], Q = [m^3/s]$, SR = Stazione idrometrica di Riferimento), stimati attraverso il metodo della portata indice.

SR	Area	Q_{indice}	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}	Q_{100}	Q_{200}
Bevera a Colomboia	40.2	14.9	25.4	30.7	38.1	44.1	50.5
S/1a	145.5	38.7	65.9	79.7	98.9	114.5	131.1
S/1b	43.2	15.7	26.8	32.3	40.1	46.5	53.2
S/1	187.8	46.8	79.7	96.3	119.5	138.4	158.5
S/2	304.9	67.0	114.2	138.0	171.3	198.3	227.1
S/3	338.8	72.5	123.5	149.2	185.3	214.5	245.6
S/4	460.1	91.0	155.0	187.3	232.5	269.2	308.2
S/5	471.9	92.7	157.9	190.8	236.9	274.3	314.1
S/6	480.9	94.0	160.1	193.5	240.3	278.1	318.5
S/7	490.4	95.4	162.5	196.3	243.8	282.2	323.1
S/8	663.9	119.5	203.4	245.8	305.3	353.4	404.6
S/9	816.4	139.3	237.2	286.6	355.9	412.0	471.8
S/10a	890.2	148.5	252.9	305.6	379.5	439.3	503.1
S/10	1784.2	248.8	423.7	512.1	635.9	736.1	842.9
S/11	1952.6	266.1	453.1	547.6	679.9	787.1	901.3

Tabella 4.4: Le stime di Q_{indice}, Q_T verranno adoperate, all’interno di questa tesi, come riferimento a partire dalle portate registrate dagli idrometri dislocati lungo il Lambro, al fine di caratterizzare il tempo di ritorno associato agli eventi storici

4.3 Contributo della Tesi al progetto

A partire dai risultati ottenuti in ambito statistico circa la revisione delle distribuzioni dei valori estremi, e di conseguenza dei quantili di portata al colmo di piena, con il suddetto lavoro di Tesi si è voluto completare quanto ancora era rimasto in sospeso al termine del Progetto *FLORIMAP*: sono cioè state realizzate delle mappe di allagamento grazie all'aiuto della Professoressa Petaccia e della Professoressa Persi dell'Università degli studi di Pavia - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (codice ORSADEM, [13]), per poi mappare il danno da alluvione riferito ad un evento storico noto e costruire quindi un legame sperimentale fra tiranti di allagamento e danni per diverse categorie tematiche.

Il desiderio di rimodulare la prassi con cui viene rappresentato e trasmesso ai cittadini il rischio idraulico risiede nel bisogno di un cambiamento profondo della valutazione degli impatti delle alluvioni: si passa infatti da un approccio tipicamente *Top-down*[3], in cui pochi tecnici specializzati emanano indicazioni e costruiscono modelli con cui spiegare la realtà fisica degli eventi meteorici, ad un approccio *Bottom-up*, focalizzando l'attenzione sulle comunità locali e sulle loro esigenze, partendo da queste al fine di valutare le possibili soluzioni con cui mitigare i danni causati dalle alluvioni.

Al fine di incentivare il secondo tipo di visione, di seguito si riporta, a titolo esemplificativo, un paragone con il mondo della sismica: proprio come nel caso di una alluvione, anche per i terremoti è possibile - e in questo ambito in effetti è già pratica comune, adoperare scale quantitative per indicare la gravità dell'evento, come la Richter, ma anche qualitative, come la scala Mercalli[17]. Di seguito si riportano entrambe, a partire da quest'ultima, nella versione pubblicata su ogni Bollettino della Società Sismologica Italiana, fino agli anni 20 del 1900.

1. *Scossa strumentale*: cioè segnalata dai soli strumenti sismici
2. *Molto leggera*: avvertita solamente da qualche persona in condizioni di perfetta quiete, specialmente nei piani superiori delle case, ovvero da persone molto sensibili e nervose
3. *Leggera*: avvertita da parecchie persone, ma poche relativamente al numero degli abitanti di un dato paese; si dice che fu appena sentita senza nessuna apprensione, e, in generale, senza accorgersi che fosse terremoto, se non dopo saputo che altri hanno pure avvertito il fenomeno
4. *Sensibile o mediocre*: avvertita non generalmente, ma da molte persone nell'interno delle case, però da pochi al piano terreno, senza spavento, ma con tremito d'infissi, di cristalli, scricchiolio d'impalcature, leggera oscillazione di oggetti sospesi
5. *Forte*: avvertita generalmente nelle case, ma da pochi nelle strade: con risveglio di persone addormentate, con spavento di alcuni, sbattere d'usci, suono di campanelli, oscillazione piuttosto ampia di oggetti sospesi, arresto d'orologi
6. *Molto forte*: avvertita da tutti nelle case e da molti con spavento e fuga all'aperto, caduta di oggetti nelle case, caduta di calcinacci con qualche lesione leggera negli edifici meno solidi
7. *Fortissima*: avvertita con spavento generale e fuga dalle case, sensibile anche nelle strade, suono di campane da torre; caduta di fumaiuoli e di tegole; lesioni negli edifici numerose, ma in generale leggere
8. *Rovinosa*: avvertita con grande spavento, rovina parziale di alcune case e lesioni generali e considerevoli nelle altre senza vittime o solamente con qualche disgrazia personale isolata

9. **Disastrosa:** con rovina totale o quasi di alcune case, lesioni gravi in molte altre, tali da renderle inabitabili; vittime umane non molto numerose, ma sparse in diversi punti degli abitati
10. **Disastrosissima:** con rovina di molti edifici e molte vittime umane, spaccature nel suolo, scoscentimenti delle montagne, ecc.

Di seguito si riporta la Scala Richter[18]:

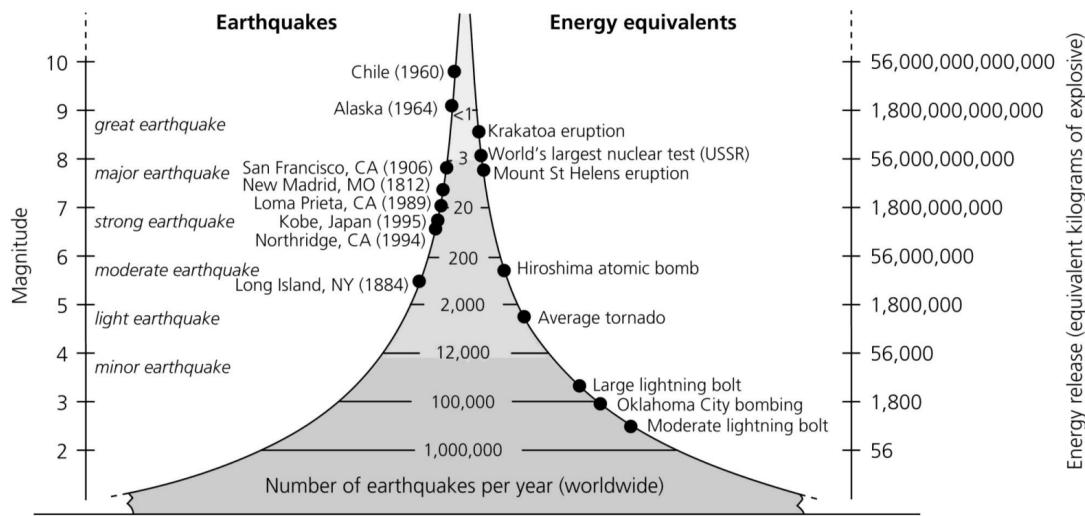


Figura 4.6: Confronto grafico fra i valori di magnitudo della scala Richter e l'equivalente quantità di energia liberata. Nel diagramma centrale il numero medio di eventi sismici annuali nel mondo associati alle varie magnitudi

Le due scale sono state volutamente riportate in modalità differente: rispettivamente sottoforma di elenco e grafica per Mercalli e Richter, per sottolineare il fatto che nel primo caso, non essendoci una vera quantificazione dell'energia rilasciata dal terremoto, ma una descrizione squisitamente qualitativa completamente basata sulla percezione degli abitanti durante l'evento, e su una stima dei possibili danni, sia fondamentale la ricchezza di dettagli discorsivi con cui poter aumentare la leggibilità della gravità dell'evento da parte del più alto numero di persone possibili. Nel caso della scala Richter invece la stessa informazione, ma in differente modalità, può essere trasmessa in via molto più sintetica, il prezzo da pagare però è una percezione più distante del pericolo.

Una rappresentazione qualitativa del rischio

Paragrafi

5.1	Il caso della città di Mandra	35
5.2	Il caso studio: fiume Lambro	40
5.2.1	Analisi geomorfologica del fiume	41
5.2.2	Alluvione del Novembre 2014	43
5.3	Analisi sezioni critiche del fiume	43
5.3.1	Analisi indiretta delle aree allagate	52
5.3.2	Costruzione scale qualitative di danno	58
5.3.3	Mappatura qualitativa dei danni per categoria	64
5.3.4	Simulazione degli allagamenti	69

Sulla base di questo dualismo comunicativo, il contributo di questo lavoro di Tesi, ispirandosi ai risultati recentemente ottenuti da parte di alcuni ricercatori greci[2] sulla città di Mandra, consiste nella realizzazione di una metrica qualitativa con cui poter rappresentare la gravità di un fenomeno alluvionale, a partire da un tratto urbano del fiume Lambro, per un evento noto, per poi estendere la stessa modalità rappresentativa - in funzione dei tiranti stimati, anche per eventi a portata prestabilita.

5.1 Il caso della città di Mandra

Durante il lavoro condotto da Diakakis et al.[2] si sono individuate quattro macro-categorie in cui classificare i possibili danni da alluvione; per ciascuna di queste è stata indicata una scala costituita da un indicatore numerico da 1 a 10, a passo unitario, accompagnato da una breve descrizione del danno stimato. Le categorie scelte, che verranno utilizzate anche in questa sede, sono:

- *human population*
- *natural environment*
- *built environment*
- *mobile objects*

Di seguito è riportata, per ciascuna categoria, la scala qualitativa sviluppata dai ricercatori greci.

Class	Description
I	Very light and small objects (e.g. carton boxes) get transported
II	Light objects including flower pots, small trash bins, light building materials and others that can be lifted by a person get transported by floodwaters
III	Heavy objects get transported by floodwaters including furniture and mobile objects of similar size, motorbikes, large trash bins and others that cannot be lifted by a single person
IV	Cars and SUVs/Large tanks are moved by floodwaters
V	Vans get transported by floodwaters
VI	Minibuses, containers get transported
VII	Buses, tractors, small aircrafts or helicopters
VIII	Large trucks, bulldozers get transported
IX	Train cars get transported
X	Large passenger aircrafts get transported

Tabella 5.1: Scala di gravità[2] di danneggiamento per gli oggetti mobili. La scala si basa sul trasporto di oggetti di dimensione e peso crescente

Class	Description
I	Vegetation debris (leaves) drifted by water Agricultural plots suffer minor inundation
II	Low vegetation including ground, herbaceous plants with no persistent woody stems are bent or uprooted or destroyed
III	Bushes (with persistent woody stems) are uprooted. High rising ground plants (>0.5 m)
IV	Small tree branches break. Fruit trees or olives destroyed (or partly destroyed). Animals carried away or injured.
V	Small trees uprooted (<3 m)/Livestock in confined spaces drowned/Liquid pollutants spread locally
VI	Free-range animals killed/drowned. Liquid pollutants spread locally
VII	Large (>3 m) trees uprooted. Large planted trees uprooted. Earth material eroded or deposited along the river banks
VIII	Liquid or solid pollutants spread in water bodies (surface or groundwater) not only locally
IX	Large landslides are triggered by erosion Temporary dams created by landslide earth materials
X	Major pollution episode. Major source of pollutants spread in surface water bodies, air or groundwater

Tabella 5.2: Scala di gravità[2] per i possibili danni all’ambiente naturale, classificati in base a geomorfologia, vegetazione, inquinamento e ripercussioni dirette sulle coltivazioni agricole

Class	Description
I	People notice minor flooding, no change in everyday activities and commuting
II	Daily commute/everyday activities affected for the duration of flooding
III	Daily commute/everyday activities halted completely for the duration of flooding and beyond
IV	Evacuation needed at some places
V	Rescue needed/take place at some locations/Entrapments occur due to the flood
VI	Light injuries occur, including shallow cuts or abrasions, sprains, bruises skin lesions, minor burns and other non-incapacitating and non-life-threatening injuries
VII	Serious incapacitating injuries occur including concussions, fractures, internal injuries, severe burns, deep lacerations, severe cuts, severe general shock
VIII	1 to 10 fatalities occur locally (within the same building, campsite, vehicle or convoy of vehicles, same intersection, plaza etc.)
IX	10 to 50 fatalities occur locally
X	>50 fatalities occur locally

Tabella 5.3: Scala di gravità[2] per i possibili danni agli abitanti locali

Class	Description
I	Yard/Garden/Piloti suffer inundation on individual buildings. Inundation occurs of road or sidewalk surface. Low water crossings are flooded
II	Flooding limited to basements. Only ground-based equipment and furniture affected. Underground passage traffic lights out of order. Culvers and sewerage affected or blocked
III	Ground floors suffer flooding affecting only ground based household furniture or equipment. Absorbed moisture on walls
IV	Ground floor flooding affecting higher positioned equipment or furniture. Yard walls and fences suffer structural damage. Traffic lights suffer damages
V	Damages on wall coverings ceilings and walls, garage doors, window frames suffer flooding. Roads suffer damages due to asphalt surface or foundations scouring
VI	Structural damages visible, subsidence or deformation of building elements
VII	Partial structural damage of the building deformation of supporting elements
VIII	Complete collapts of RC or metal buildings. Single-span bridges suffer complete collapse
IX	Large buildings (e.g. industrial) complete collapse. Multi-span bridges suffer complete collapses
X	Large dams break/Significant parts of large power plants, refineries, nuclear plants suffer complete collapse

Tabella 5.4: Scala di gravità[2] per i possibili danni all’ambiente costruito, ripartito in infrastrutture ed edifici privati

A partire da queste scale è stato classificato [2] l’impatto dell’alluvione che il 15 Novembre 2017 colpì la città di Mandra, a circa 20 km dalla capitale Atene. In particolare, assegnando un codice colore alle varie voci di ciascuna scala, si sono realizzate delle mappe in cui i danni venivano diversificati cromaticamente per intensità. Dopodichè si è anche realizzata una mappa complessiva che tenesse conto, in uno stesso punto geografico, del massimo danno avvenuto fra le quattro categorie tematiche. In ultima istanza si è confrontata questa mappa cromatica con la mappa degli allagamenti, ricavando risultati interessanti - comunque già attesi - di legame empirico tirante/danno, cosicché nelle zone in cui il primo risultava elevato, lo era anche il massimo danno verificatosi. Di seguito si riporta il confronto fra mappa di allagamento e danni tematici ottenuti [2]:

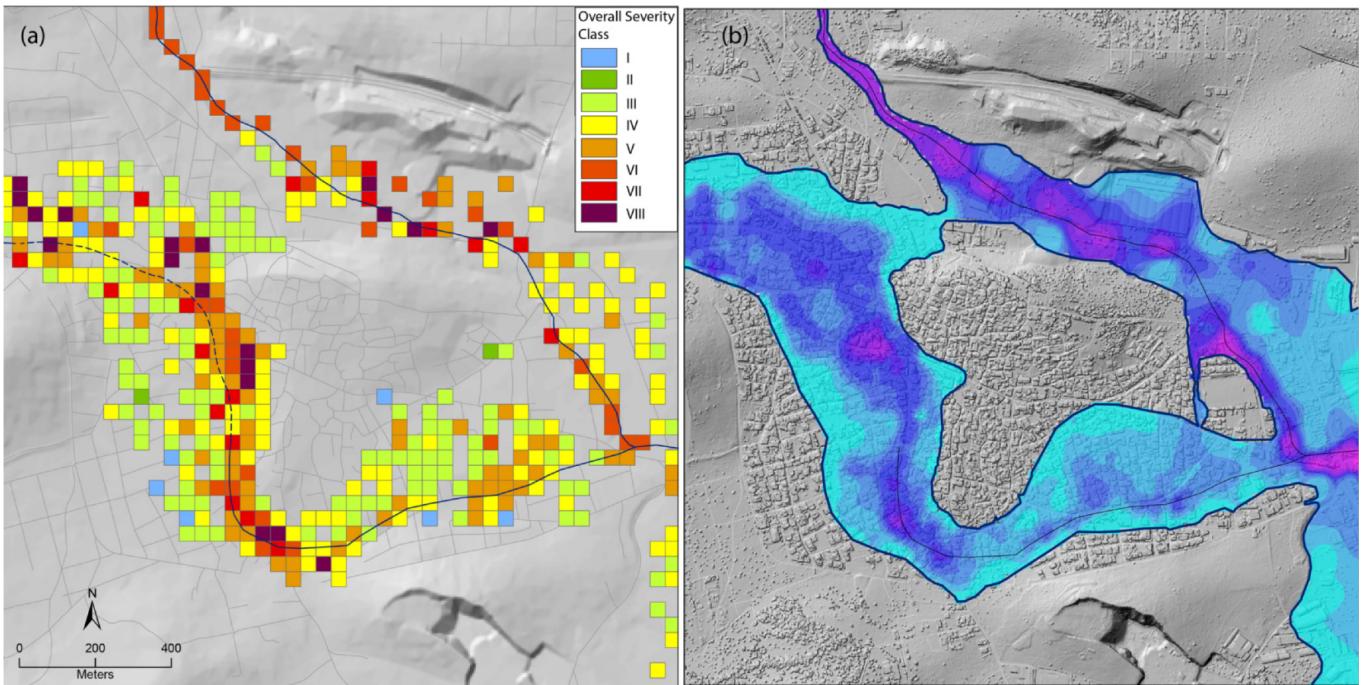


Figura 5.1: A sinistra la mappatura dei danni per intensità, con annessa scala cromatica, a destra la mappa dei tiranti di allagamento nella stessa area geografica (Città di Mandra): il celeste indica profondità modeste, il viola indica profondità elevate

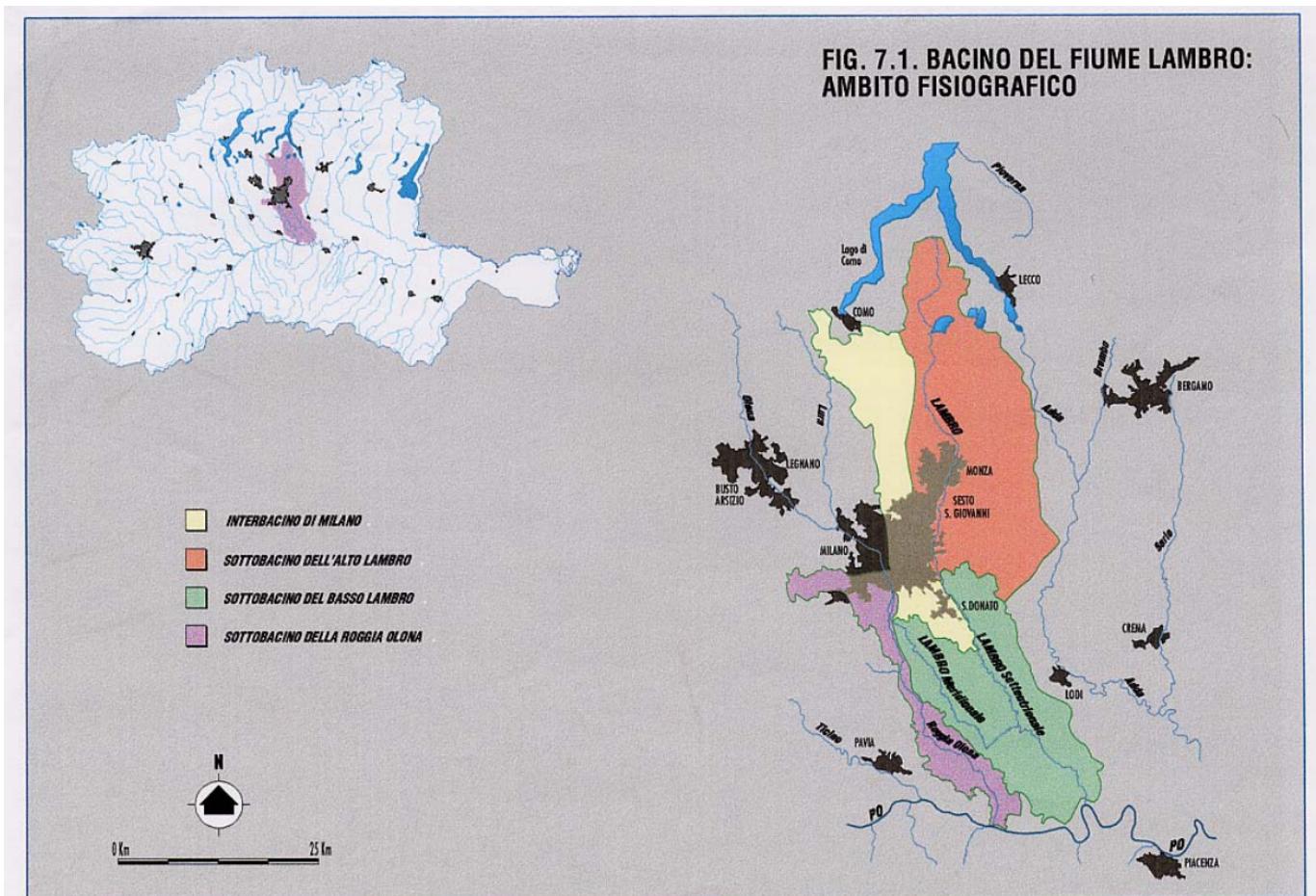
5.2 Il caso studio: fiume Lambro

Sulla base del lavoro di Diakakis et al. [2], di seguito si illustra nel dettaglio quanto svolto durante la suddetta tesi, non prima di effettuare alcune precisazioni:

- La mappatura dei danni tematici, a differenza di quanto sviluppato dai ricercatori greci, non rappresenta l’obiettivo ultimo del lavoro ma il punto di partenza, dal quale ricercare una relazione con i tiranti idrici;
- le informazioni circa i danni occorsi fra Monza e Milano sono esclusivamente di natura indiretta, provenienti da siti internet, bollettini ufficiali, giornali, giornali online e siti web, a differenza dei dati utilizzati su Mandra, che consistevano, in parte, in osservazioni dirette delle conseguenze dell’alluvione;
- le scale adottate in questa sede sono state naturalmente riviste e riadattate alla storia delle alluvioni verificatesi sul territorio italiano, in modo tale da poter contare su delle metriche pensate ad hoc e che non fossero eccessivamente sbilanciate, né verso danni troppo lievi, né tanto meno verso danni esageratamente catastrofici sulla base degli eventi storici di cui si ha notizia nell’ultimo secolo in Italia. Tuttavia si sono mantenute le categorie già utilizzate e precedentemente elencate, in quanto ritenute rappresentative indipendentemente dall’area geografica di indagine.

5.2.1 Analisi geomorfologica del fiume

Il Fiume Lambro nasce nelle Prealpi racchiuse fra i due rami del lago di Como [19], presso il Comune di Magreglio, per sfociare, circa 130 km a valle, nel Po a Senna Lodigiana. Il bacino idrografico del Fiume Lambro, grazie alla sua estensione, occupa diversi Comuni lombardi, fra cui: Monza, Sesto San Giovanni e Milano [20]:



Il Lambro è caratterizzato da alcune eterogeneità morfologiche lungo il suo percorso [19], infatti se nell'area che si estende fra il Parco di Monza e Sesto San Giovanni esso presenta un'asta fluviale particolarmente ricca di meandri, nei pressi della campagna ad est di Milano invece risulta essere tendenzialmente rettilineo. Ad ogni modo una caratteristica precisa accomuna entrambi i tratti: il fiume risulta essere fortemente confinato (nella prima parte dall'eccessiva vicinanza di insediamenti produttivi e abitativi, nella seconda tramite argini artificiali) al fine della naturale espansione durante eventi di piena.

Da un punto di vista geografico il bacino del Lambro può essere ripartito in quattro macro aree [19]:

1. Lago, a monte del lago di Pusiano. In quest'area il suddetto Fiume presenta pendenze elevate e regime torrentizio (*torrenti Lambretto, Valle di Rezzago, Foce, Ravella, Bistonda, Bova*). All'arrivo nel lago di Pusiano la pendenza si riduce, e di conseguenza un notevole deposito di detriti ha luogo;
2. Lambro naturale, fra il lago di Pusiano e il comune di Villasanta. Le pendenze sono mediamente elevate e il grado di urbanizzazione è ancora modesto. In sinistra idraulica è possibile osservare alcuni affluenti (*Bevera di Molteno, Bevera di Veduggio, Bevera di Renate, Roggia Brovada, Roggia Pegorino e Roggia Molgorana*);

3. Lambro urbano, ossia il tratto analizzato in questa tesi, che si estende fra il comune di Monza e la periferia sud-est di Milano, arrivando alla confluenza del Deviatore Redefossi. In quest'area la pendenza è molto ridotta rispetto ai tratti a monte, l'urbanizzazione è molto invadente e il deflusso dovuto a questa porzione di bacino è in larga parte dovuto, per questo motivo, alla rete acquedottistica della città di Milano;
4. Lambro irriguo, si estende fra la confluenza con il Deviatore Redefossi e il fiume Po, in questo tratto le pendenze sono le più basse in assoluto, il corso d'acqua attraversa terreni pianeggianti caratterizzati da un'alta densità di canali irrigui.

È inoltre necessario precisare che la difficoltà, nel corso degli anni, nel riuscire a mitigare le conseguenze delle piene è direttamente dipendente dalla morfologia fluviale. Infatti, per quanto esposto poc'anzi, il Lambro è un emissario del lago di Pusiano, che rappresenta un grande invaso di monte, in termini di volume ma anche di estensione, la cui capacità di laminazione è quindi molto alta. A causa di ciò i picchi di portata nelle sezioni di valle non raggiungono valori particolarmente elevati, specialmente se paragonati a quelli in ingresso al lago, d'altro canto però valori sostenuti di portata transitano per periodi prolungati di tempo, raggiungendo anche parecchie decine di ore. È per questo motivo che risulta difficile, soprattutto in aree fortemente urbanizzate, in cui gli spazi liberi disponibili sono modesti o addirittura inesistenti, riuscire a garantire allagamenti controllati in casse di espansione con cui mitigare danni a cose e persone.

Di seguito si analizzano, nell'ambito del segmento di Lambro urbano, i maggiori punti nevralgici in termini di capacità di smaltimento, da Monza sud a Lambrate. Le stesse sezioni sono risultate essere le più colpite durante l'evento studio di questa tesi, ossia l'alluvione del 15 Novembre 2014.

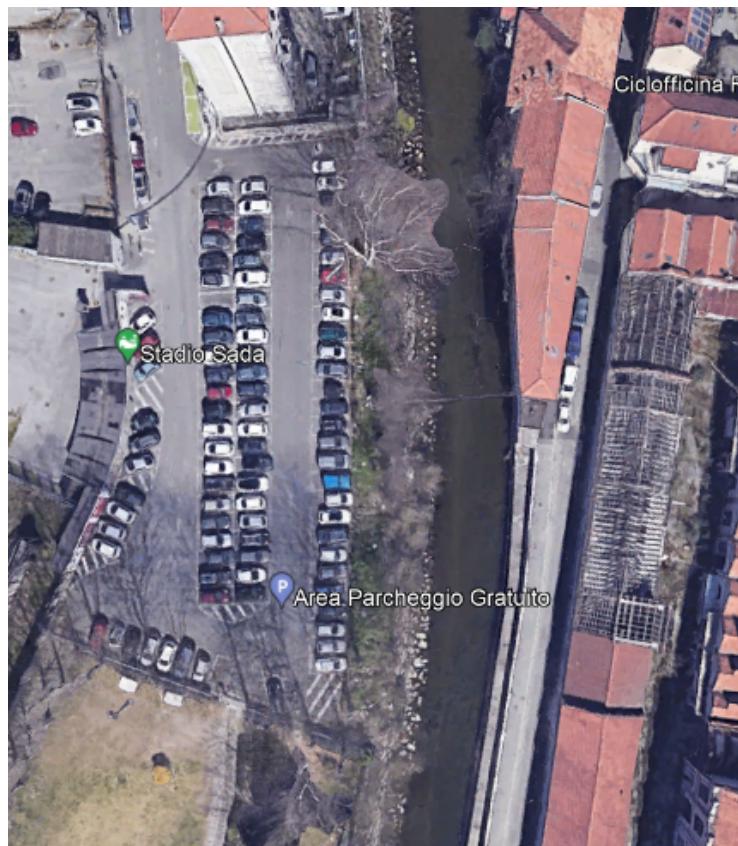
5.2.2 Alluvione del Novembre 2014

L'area geografica studiata in questa tesi si estende da Monza sud fino al quartiere Lambrate di Milano, la scelta è stata dettata da una duplice causa: l'evento alluvionale analizzato ha colpito prevalentemente Milano e Monza, e naturalmente le ripercussioni maggiori si sono registrate nelle aree più urbanizzate, che appunto ricadono in suddetti comuni; inoltre la decisione circa l'area studio è stata dettata dalla portata del codice di calcolo ORSADEM [13], inutilizzabile al di fuori dell'area menzionata.

5.3 Analisi sezioni critiche del fiume

Il caso studio su cui ci si è focalizzati è relativo all'alluvione del Novembre 2014, che si è complessivamente sviluppata ed esaurita nella settimana fra il 12/11/2014 e il 19/11/2014. Infatti a causa della formazione di una depressione nella Valpadana sono stati generati una serie di rovesci temporaleschi, concentrati soprattutto nell'area Est di Milano, appunto lungo il Lambro [21]. Di seguito si riportano unitamente le sezioni fluviali identificate come "*critiche*" per eccessiva vicinanza ad insediamenti produttivi, o abitativi, o insufficiente spazio laterale per l'espansione della piena, e le conseguenze nefaste dovute agli allagamenti nelle medesime sezioni.

- Stadio Gino Alfonso Sada, Monza:
il parcheggio dello stadio si trova a soli 10 metri di distanza dalla sponda destra del Lambro, in un'area fortemente urbanizzata in cui non vi è spazio per naturale espansione del fiume



Durante l'alluvione si è verificato blackout elettrico di parecchie aree della città di Monza, fra cui anche la zona adiacente allo **stadio Sada**. Inoltre, a seguito degli allagamenti, che hanno interessato prevalentemente il parcheggio a ridosso del fiume,

l'Aipo - Agenzia interregionale per il Po, ha stanziato interventi per 1'000'000 € al fine di effettuare sistemazione idraulica di sponde e letto del fiume in alcune zone, fra cui quella adiacente allo stadio.

- via Lippi, Monza :
essa si affaccia sul Lambro a sud di Monza, confinando con un una sala prove;



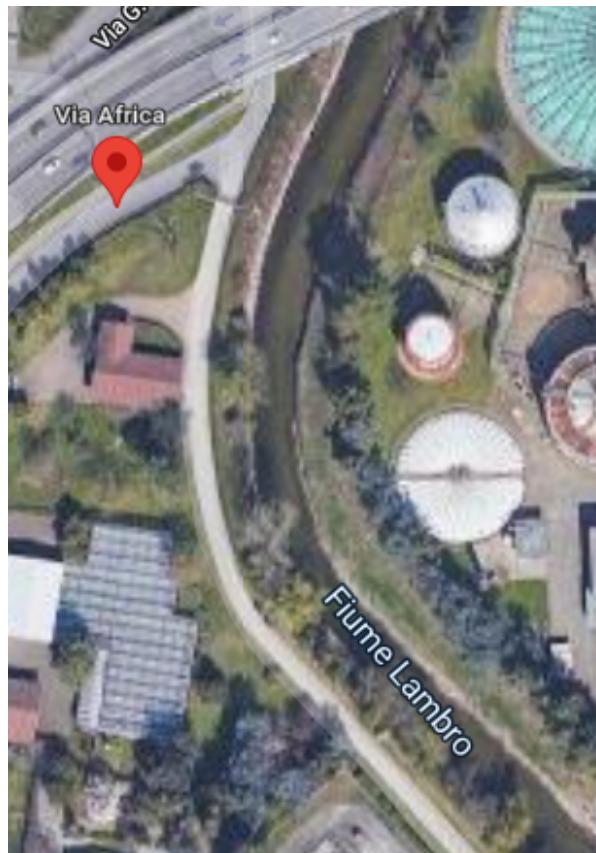
In corrispondenza del Lambro presso via Lippi è stata effettuata una serie di interventi atti a garantire il naturale deflusso, quali rimozione di tronchi e rami caduti, smaltimento e rimozione rifiuti, fango e detriti presenti, una volta terminata l'alluvione.

- "Cascinazza", sud di Monza:
rappresenta una delle pochissime aree rurali di Lambro urbano;



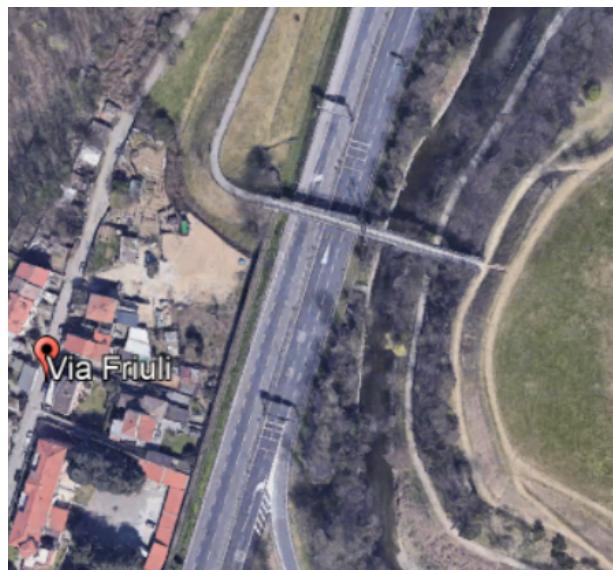
L'area della "Cascinazza" ha funzionato come zona di espansione della piena, mitigando, dunque, in parte le conseguenze disastrose nelle sezioni di valle.

- via Africa, Monza;



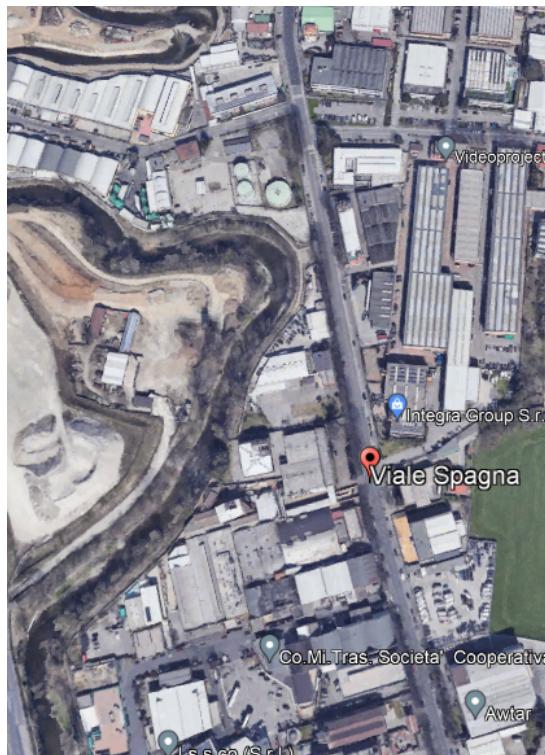
A causa degli allagamenti è stata predisposta la chiusura di alcune strade da parte della Polizia locale del Comune di Monza, fra cui anche quella di [via Africa](#).

- via Friuli, San Maurizio al Lambro:
localizzata a ridosso del Lambro in un'area densa di abitazioni;



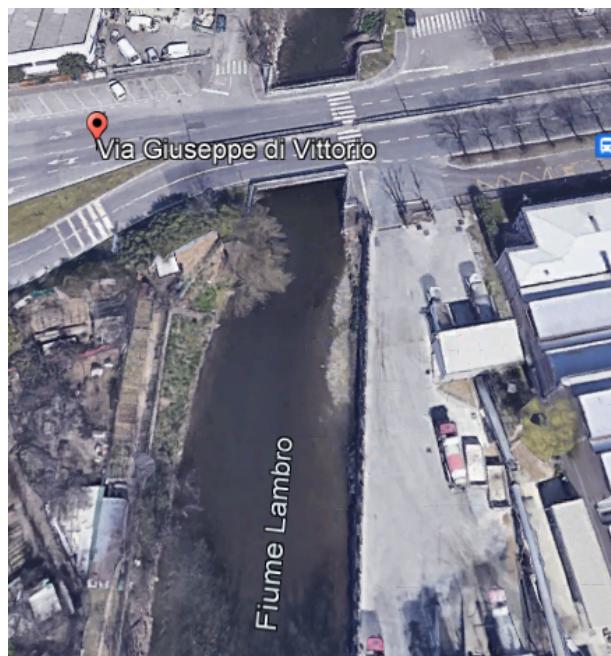
Lungo via Friuli e via Cadore è stato sconsigliato l'utilizzo di veicoli e sono stati posizionati dei presidi di Polizia e Carabinieri locali. L'esondazione allaga alcune abitazioni di [via Friuli](#), per le quali è stato predisposta l'evacuazione immediata.

- via Cadore, Sesto San Giovanni: vicino via Friuli;
- viale Spagna, Cologno Monzese:
particolarmente vicino al fiume Lambro è localizzato in un'area fortemente urbanizzata;



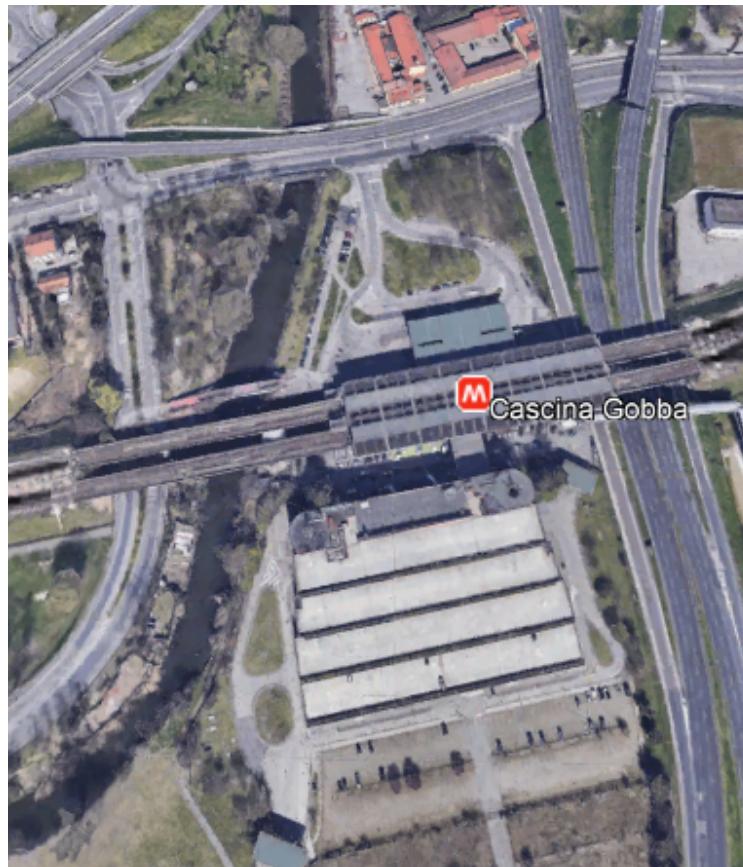
Presso **viale Spagna** è stato necessario un intervento di spurgo del sottopasso al fine di ripristinare la viabilità originale. La strada era stata **preventivamente chiusa al traffico**.

- via Di Vittorio, Cologno Monzese:
la strada attraversa il Lambro creando un potenziale fattore di riduzione di capacità di smaltimento;



predisposti presidi di Carabinieri, Polizia locale, Associazione Carabinieri e Guardie ecologiche volontarie lungo via Di Vittorio

- Cascina Gobba, Milano;

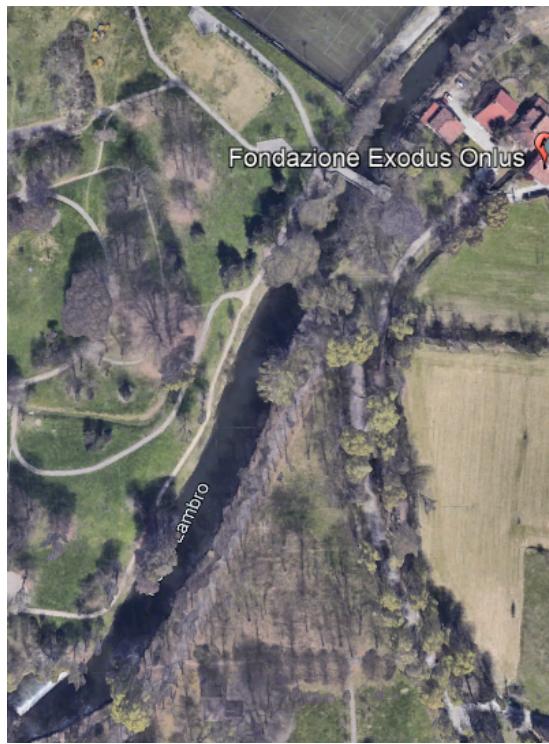


Cascina Gobba rappresenta uno dei pochi punti di possibile espansione naturale della piena lungo l'asta fluviale del Lambro, ad ogni modo essa nel suo tratto terminale a sud risulta essere particolarmente vicina a strade ed infrastrutture. A causa degli allagamenti il traffico da Cologno Centro fino alla Cascina era completamente bloccato.

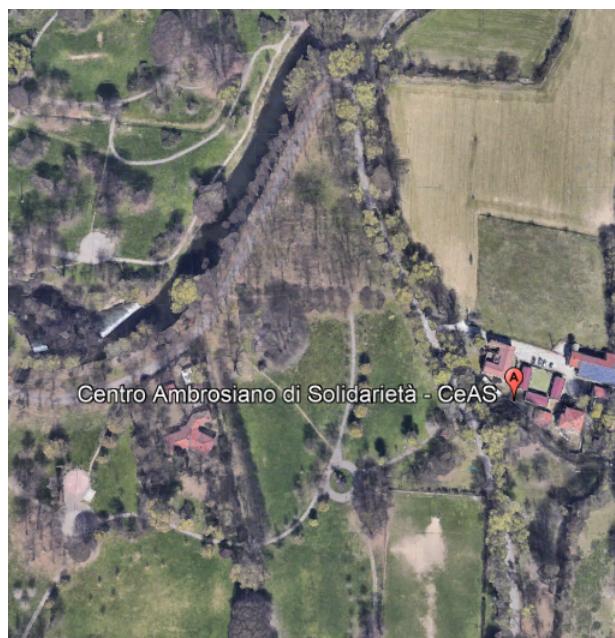
- Parco Lambro, Milano;

1. Fondazione Exodus:

uno dei luoghi a maggior rischio di danneggiamento in caso di esondazione, in quanto si trova in una depressione naturale all'interno del Parco Lambro. Durante l'alluvione di Novembre l'acqua e il fango hanno investito la sede di Exodus presso il Parco Lambro, danneggiando dapprima computer, fotocopiatrici, la cucina, mobili, impianti e laboratori. È stato necessario procedere con l'immediata evacuazione dei ragazzi presenti e del personale della struttura.

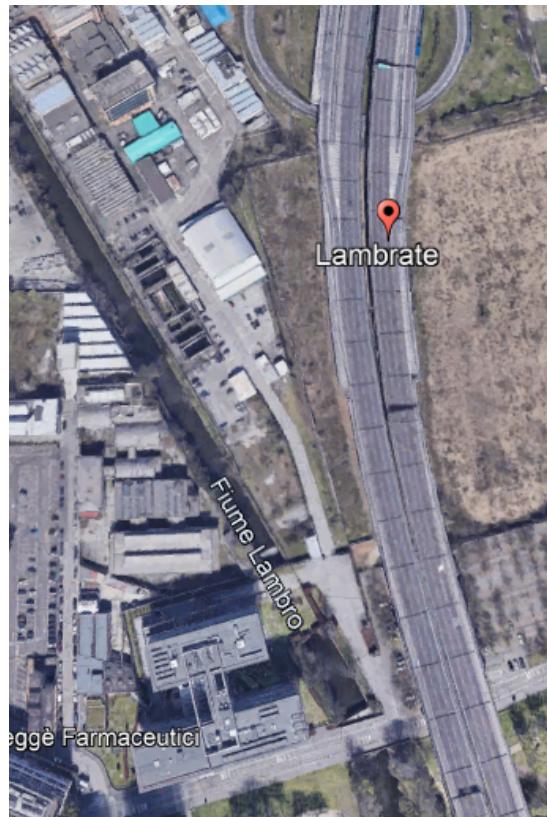


2. Centro Ambrosiano di Solidarietà - *CEaS* :
immediatamente a valle della Fondazione Exodus, soffre della stessa vulnerabilità;



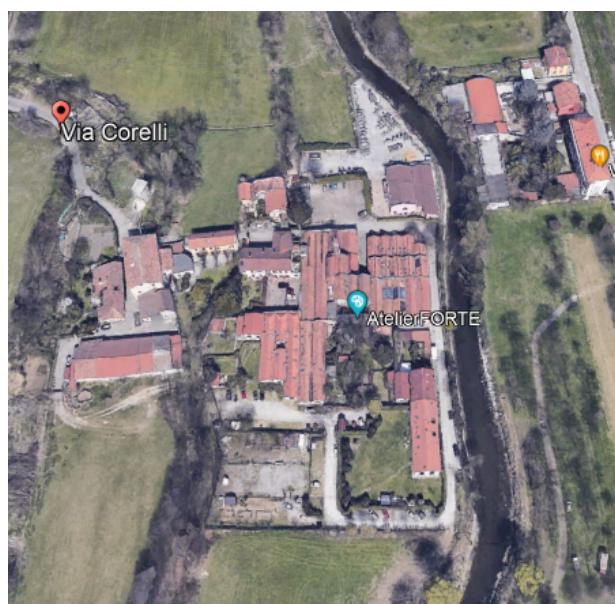
a causa dell'alluvione, proprio come nel caso della Fondazione Exodus, anche la Cascina Ambrosiana ha sofferto di ingenti danni, in particolare a cucine, caldaie, frigoriferi. La Cascina ha subito l'impatto di due successive piene: durante la prima sono stati colpiti principalmente gli scantinati e le basi delle abitazioni prefabbricate, inoltre un container di ferro è stato trasportato per alcune decine di metri a causa degli allagamenti. Durante la seconda piena si è superato il metro di tirante idrico, allagando tutte le strutture non solo interrate, ma anche al piano terra, dunque mense, impianti elettrici, impianti di riscaldamento, archivi e in alcuni casi anche pareti e strutture portanti.

- Lambrate, Milano;



Inoltre, a titolo informativo, anche se non sono stati considerati nella mappatura delle aree allagate, vengono menzionati altri due punti nevralgici del rischio idraulico lungo il Lambro, di cui si riporteranno ad ogni modo informazioni circa i danni causati dall'alluvione del Novembre 2014:

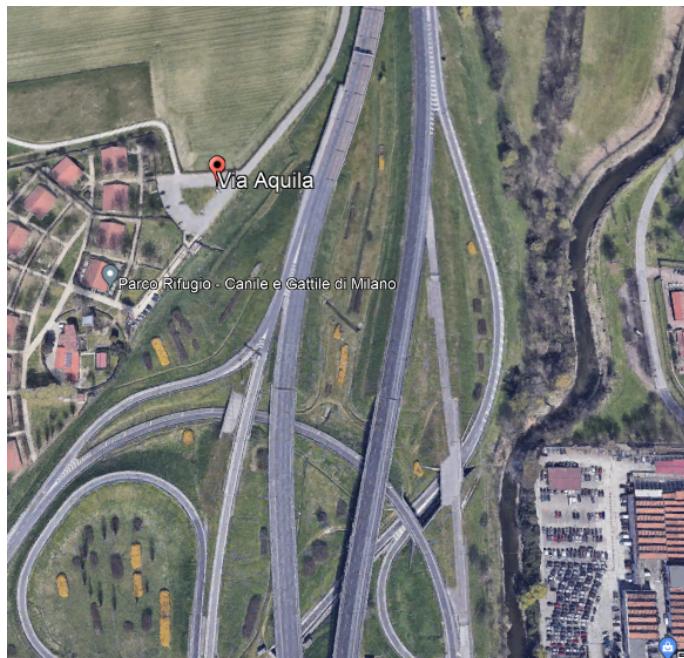
- via Corelli, Milano:
il complesso di condomini che si affaccia sul Lambro, presso via Corelli, è direttamente esposta all'espansione del fiume durante una possibile esondazione;



a causa dell'alluvione del novembre 2014 un gruppo di abitazioni al civico 34 di [via Corelli](#) ha dovuto beneficiare di intervento immediato da parte dei Vigili del Fuoco per l'evacuazione di 24 famiglie, ossia 50 persone, in quanto l'acqua ha completamente inondato il piano terra delle varie case e loft presenti. Il grave episodio è sicuramente imputabile all'arrivo dell'onda di piena lungo il Lambro, che poco prima aveva rotto un argine, in sabbia e terra, mal costruito successivamente al cantiere per la costruzione di una mini centrale idroelettrica di *A2A*.

- via Aquila, Milano:

il Canile e Gattile "*Parco Rifugio*" presso via Aquila è situato in un'area di naturale depressione del suolo, dunque ad alto rischio di allagamento in caso di alluvione;



È stato proprio il Canile di via Aquila uno dei luoghi in cui si è rischiato di osservare le conseguenze più tragiche degli allagamenti: infatti a causa di questi ultimi gli uffici, l'ambulatorio, ma soprattutto i box degli animali sono stati raggiunti dall'acqua per un tirante idrico misurato di 1.8 m. Fortunatamente grazie all'aiuto di addetti e volontari è stato possibile mettere in salvo i 145 cani e 150 gatti ospitati ed evitare una tragedia annunciata.

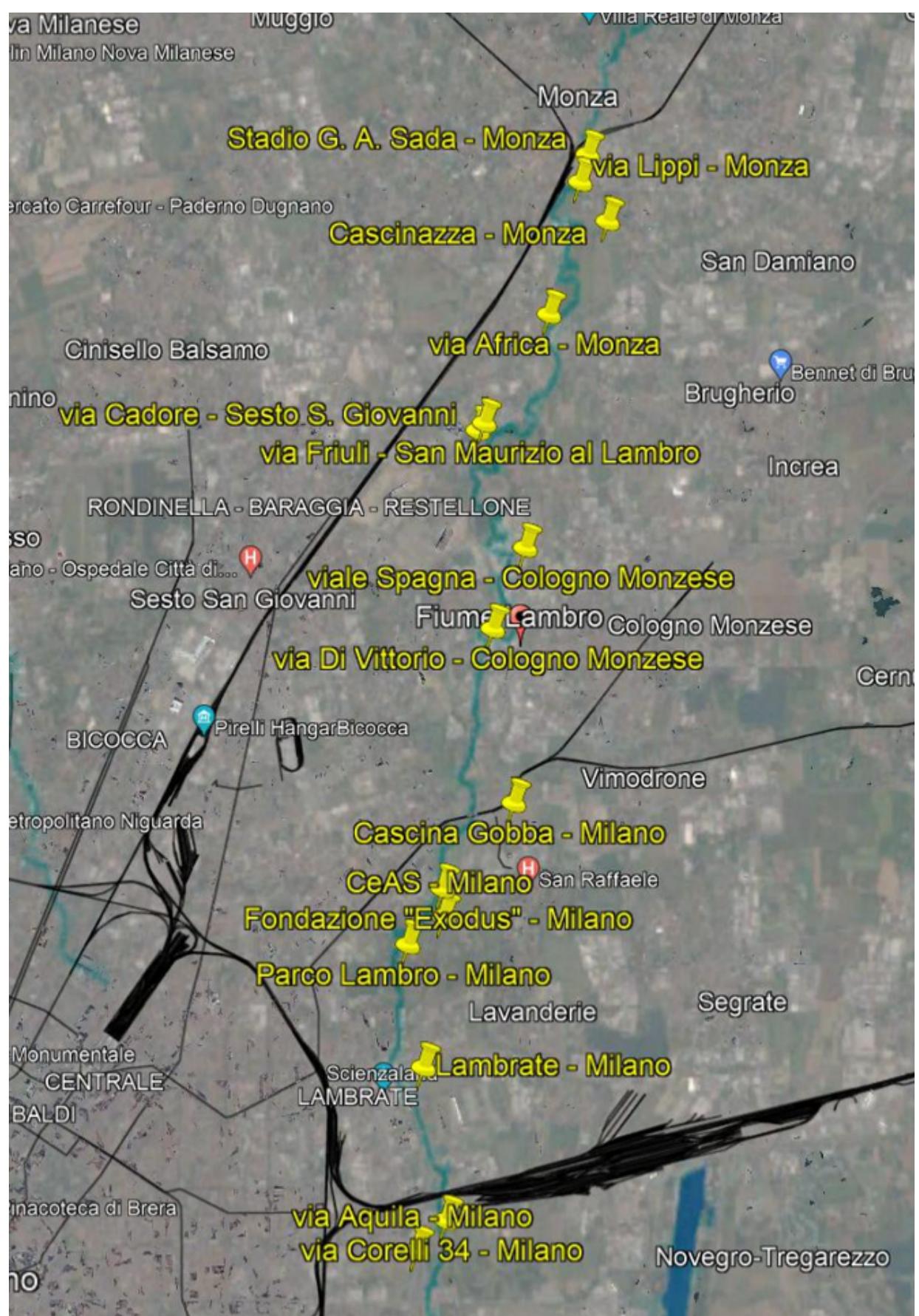


Figura 5.2: Sezioni critiche lungo il Lambro urbano, Google Earth Pro [22]

5.3.1 Analisi indiretta delle aree allagate

Al fine di delimitare le aree indicate dalla documentazione storica come allagate, e di avere dunque una visione di insieme più chiara delle stesse, si è proceduto con uno studio preliminare tramite immagini satellitari, a partire dal quale si è poi utilizzato il codice ORSADEM per una più precisa mappatura, di natura numerica.

Le immagini satellitari utilizzate sono state scaricate dal database [NASA - Earth Data: Open Access for Open Science](#), in particolare dal satellite *Sentinel - 1A*, il cui monitoraggio è risultato compatibile con il periodo temporale desiderato e l'area geografica indicata. Il Sentinel - 1 è in grado di inviare dati relativi a immagini acquisite con due diversi tipi di polarizzazione: orizzontale (H) e verticale (V), simultaneamente trasmessi su due diversi canali. È possibile ottenere mappe create dal satellite con una singola co-polarizzazione su entrambi i canali (solo verticale o solo orizzontale) ma anche mappe basate su polarizzazione duale, come composizione di due singole immagini ciascuna con una sua polarizzazione (HH, VV, HV, VH) [23].

In questo caso è stata utilizzata una immagine composita a doppia polarizzazione VV.

Una volta scaricata l'immagine satellitare, questa è stata pre-processata attraverso il software *SNAP - Sentinel Application Platform*, servizio pensato ad hoc per la manipolazione dei dati inviati dai satelliti Sentinel. L'utilizzo del suddetto è stato necessario al fine di preparare l'immagine grezza e fare risaltare al meglio le aree allagate. Di seguito una cattura della immagine raw scaricata e importata in SNAP:

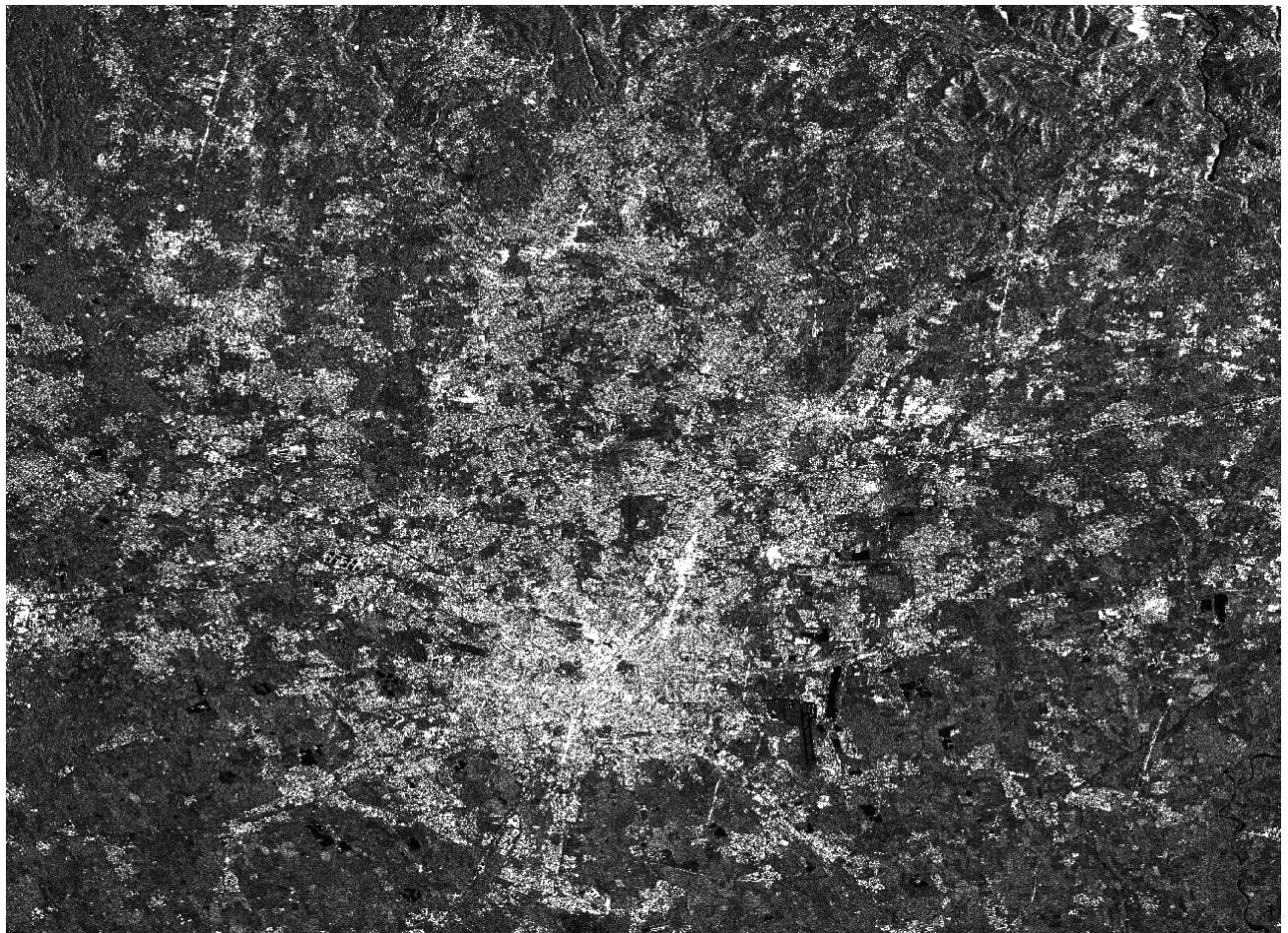


Figura 5.3: Sentinel 1

1. Per prima cosa è stato applicato il file contenente la traccia dell'orbita del satellite utilizzato all'immagine da manipolare, con la funzione "*Apply orbit file*";
2. successivamente è stato effettuato il "*Thermal Noise Removal*", con cui si è rimosso il potenziale disturbo grafico dovuto a fonti di calore dislocate nell'area analizzata;
3. quindi, per il medesimo fine si è applicato lo "*Speckle filter*" con cui si è depurata l'immagine dal possibile disturbo termico derivante dal sensore del satellite;
4. infine è stata applicata la "*Terrain correction*" al fine di collocare ogni pixel dell'immagine nella corretta posizione geografica, funzione utile specialmente se l'angolo nadir dell'immagine è disattivato.

Si riporta di seguito il risultato finale dei passaggi descritti:

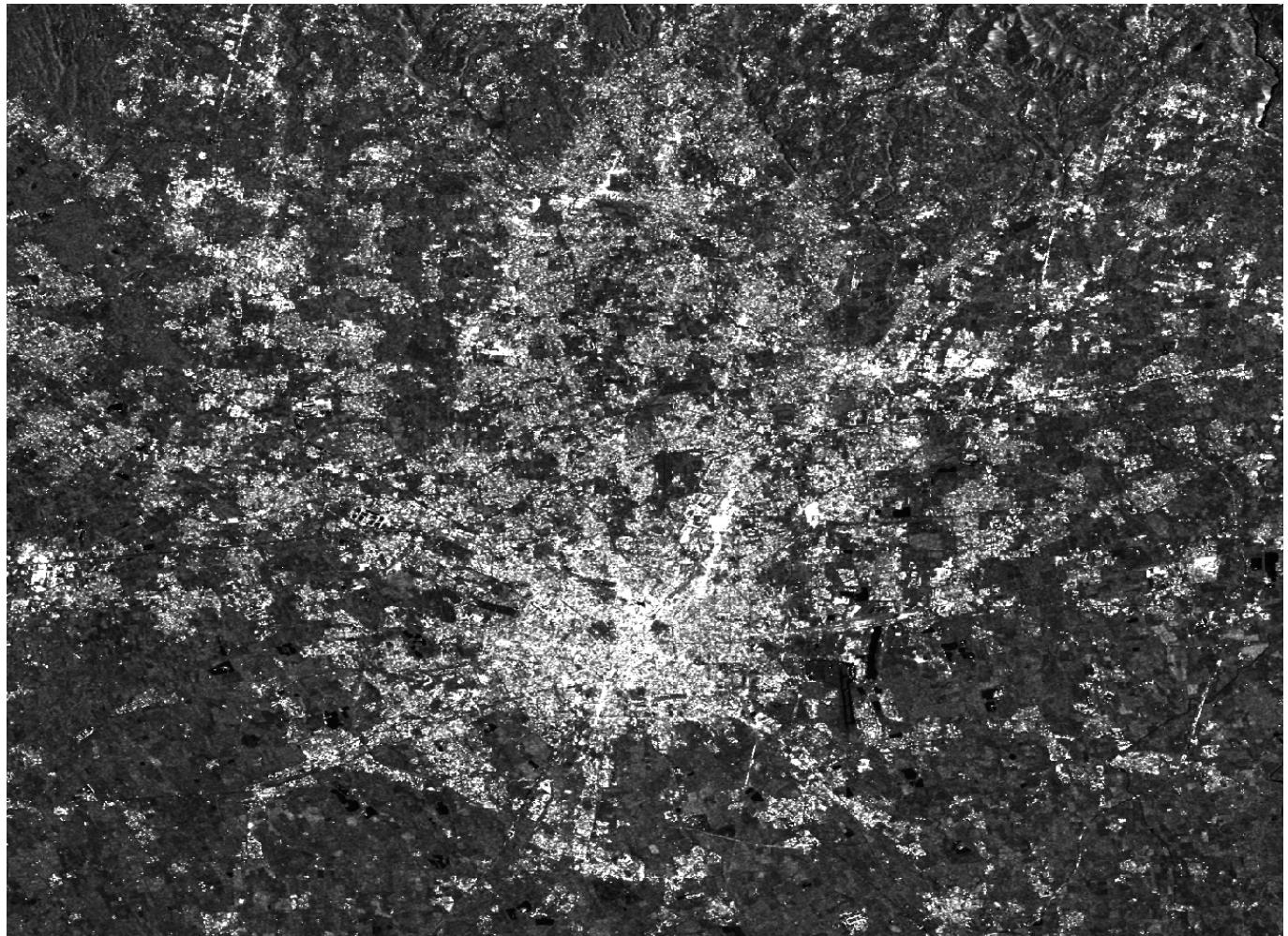


Figura 5.4: Sentinel 1, pre-processata

Una volta ottenuta quest'ultima immagine, al fine di isolare le aree allagate osservate da satellite è stata seguita una semplice procedura basata sulla bassa riflettanza dei corpi idrici e degli specchi d'acqua rispetto ad altri corpi opachi, a maggior ragione se questi emettono radiazione propria. Si è dunque ricercato empiricamente un limite superiore di radiazione emessa al di sotto del quale è stato possibile osservare esclusivamente corpi idrici:

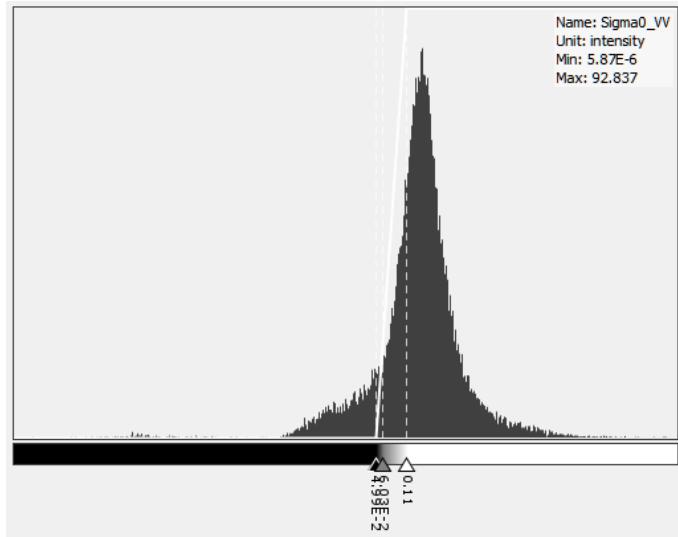


Figura 5.5: Ricerca di valore di soglia di radiazione riflessa



Figura 5.6: Immagine filtrata per bassa riflettanza

Infine è stato modificato il colore (da nero a rosso) delle aree allagate osservate e il file è stato importato sottoforma di *.kml in Google Earth Pro.

Questa procedura è stata ripetuta per diversi giorni del Novembre 2014, di seguito si riportano i risultati ottenuti per i seguenti: 11, 15, 22, 27/11/2014.

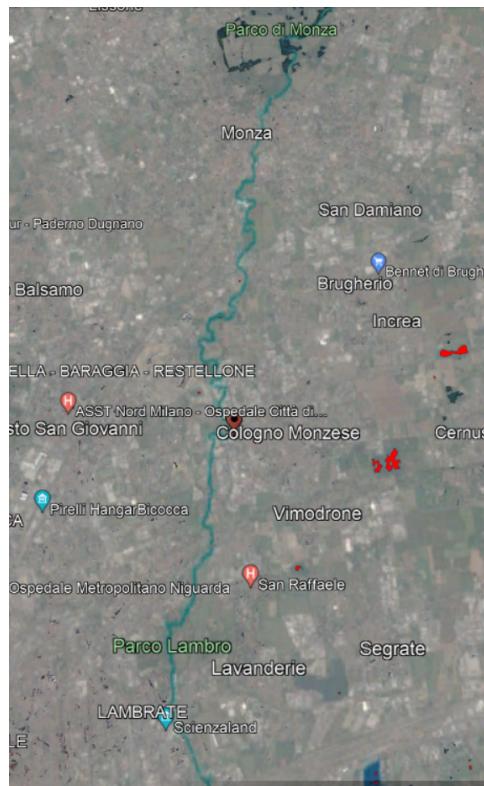


Figura 5.7: 11/11/2014

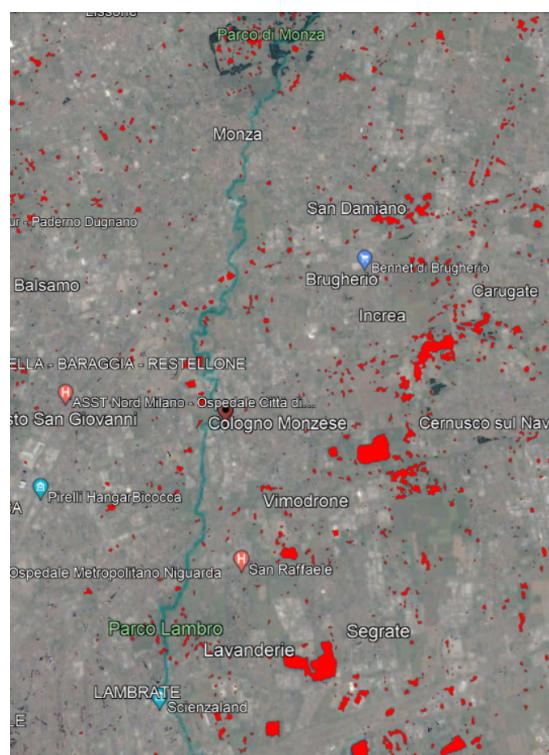


Figura 5.8: 15/11/2014

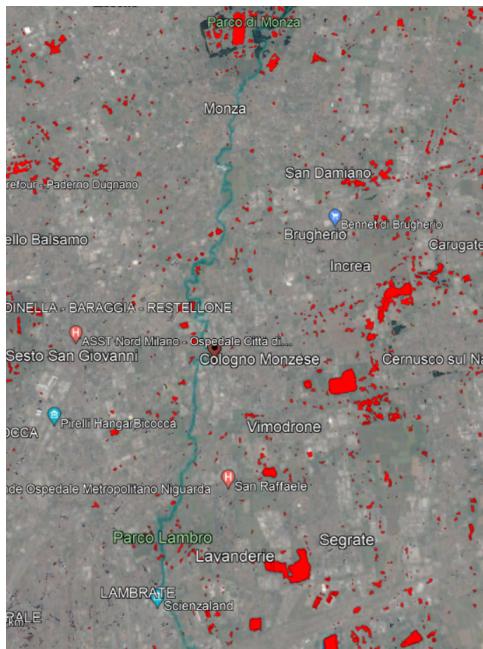


Figura 5.9: 22/11/2014

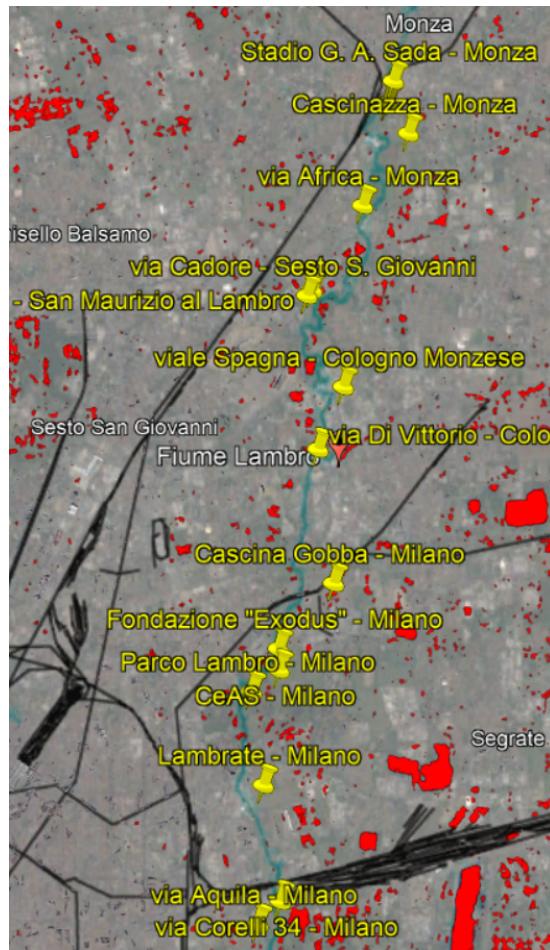


Figura 5.10: 27/11/2014

Come è possibile notare dalle immagini gli allagamenti aumentano progressivamente nei giorni - come atteso - e lungo il Lambro vi è coerenza fra le aree colpite dalle inondazioni e quelle segnalate in letteratura in cui si sono verificati eventi nefasti. Inoltre osservando i dati raccolti dai pluviometri posizionati a Lesmo - Peregallo e a Milano in via Feltre, è evidente come ci siano state due principali onde di piena, associate ad altrettanti picchi di tiranti registrati dalle stazioni meccaniche, il primo fra il 12/11 e il 13/11 e il secondo il 15/11, giorno in cui si iniziano a registrare anche da satellite incrementi visibili delle aree allagate (5.8).

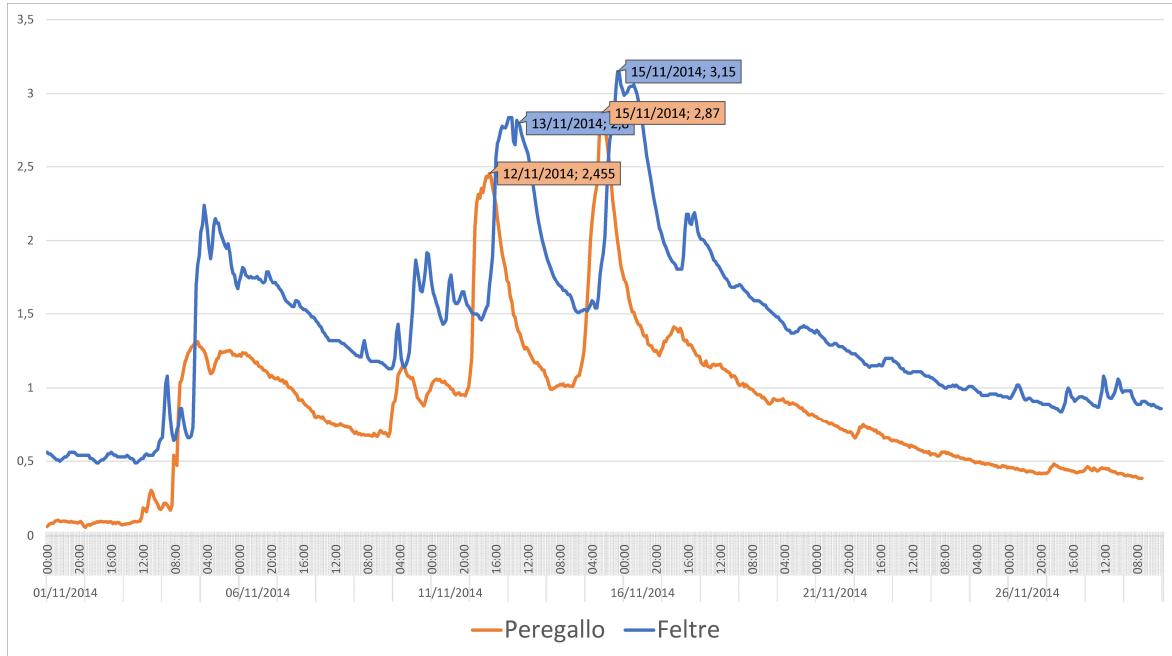


Figura 5.11: Quote idrometriche nelle stazioni di Lesmo e via Feltre

Le informazioni circa le altezze di pioggia misurate sono state raccolte dal sito di ARPA Lombardia [24] nella sezione di richiesta dati, in relazione alle uniche due stazioni di rilevamento presenti lungo l'asta fluviale del Lambro urbano. Le medesime informazioni verranno riprese in sezioni successive dell'elaborato al fine di ricostruire le portate superficiali transitate a passo orario.

5.3.2 Costruzione scale qualitative di danno

Prendendo ispirazione da quanto effettuato da Diakakis et al. [2], precedentemente riportato in formato sintetico 5.1, va ricordato che le scale prodotte sono state realizzate sulla base della raccolta di informazioni afferenti ad una certa quantità (50 in quel caso) di eventi nefasti avvenuti in diverse località nel mondo. In questo caso invece, al fine di garantire la maggiore aderenza possibile delle scale prodotte - per quanto empiriche esse siano - alle caratteristiche geomorfoclimatiche dell'Italia sono stati analizzati eventi esclusivamente avvenuti nel suddetto Paese. Di seguito si evidenziano le alluvioni occorse in Italia negli ultimi settanta anni (POLARIS - *Popolazione a rischio da frana e da inondazione in Italia* [25]) in cui il maggior numero di vittime è stato registrato.

Data	Luogo	Descrizione	Decessi
25-26/10/1954	Salerno	distrutto villaggio di Molina	325
05/05/1998	Sarno	colate di detriti hanno raggiunto Sarno e centri abitati presso Avellino e Caserta	160
14/11/1951	Polesine	straripati Po' e suoi affluenti sommerso due terzi della provincia di Rovigo	101
21/10/1953	Reggio Calabria	le piene dei maggiori corsi d'acqua calabresi hanno portato gravissimi danni al patrimonio zootecnico, centri abitati e alle infrastrutture	101
04/11/1966	Italia nord-orientale	esondazione di tutti i fiumi afferenti al bacino dell'Adige, molti centri urbani sott'acqua, diversi km quadri di campagna sommersi, gravissimi danni ovunque	87
01/10/2009	Provincie di Messina	a causa del dissesto idrogeologico locale si sono sviluppate colate detritiche, che hanno colpito parecchie abitazioni fra Giampilieri Superiore e Scaletta Zanclea	37
25/10/2011	Lunigiana e Cinque Terre	frane e inondazioni hanno provocato danni per circa 30'000'000 €	13
04/11/2011	Genova	le piene dei fiumi di Genova, in particolare del Ferreggiano, hanno allagato completamente le strade cittadine	6

Tabella 5.5: Principali alluvioni in Italia per decessi

si riportano inoltre gli eventi alluvionali e le inondazioni [26] che hanno sortito gli effetti più distruttivi lungo la Penisola:

Data	Luogo	Descrizione	Decessi
18/11/2013	Olbia, Nuoro, Ogliastra	crollo di ponti, campagne allagate, viabilità in tilt, precipitazioni intense per oltre 20 ore	16
12/11/2012	Maremma grossetana	esondazione dei torrenti e del fiume Albegna, tre morti a Marsiliana per un ponte crollato e un morto per la piena del Chiarone	6
3/07/2006	Vibo Valentia	esondazione dei torrenti presso Bivona e Vibo Marina, e attivazione di frane, colate e valanghe di detriti con ingenti datti a edifici e viabilità	4
18-28/07/1987	Valtellina	esondazione del fiume Adda e frane in Valtellina con cui vennero seppelliti i paesi di Aquilone e San Antonio Morignone	53
19/07/1985	Val di Stava	i bacini di decantazione della miniera di Prestavel ruppero gli argini, rilasciando 160'000 metri cubi di fango su Stava	268
2-3/11/1968	Biellese, Astigiano	interi paesi sommersi, distruzione di fabbriche ed edifici, fu richiesta la cassa integrazione da molteplici aziende	72
25-26/10/1954	Salerno	i torrenti in piena distruggono ponti, case e strade. Copiose frane. Il villaggio di Molina viene spazzato via. La fascia costiera salernitana viene mutata dalle ingenti quantità di detriti trasportati	318

Tabella 5.6: Principali alluvioni in Italia per danni all’ambiente naturale e costruito

Considerando i dati storici raccolti, si è proceduto allo sviluppo delle scale tematiche relative a popolazione locale, ambiente naturale, ambiente costruito e oggetti mobili; calibrate sugli eventi disastrosi di cui prima (5.5, 5.6) e applicate dapprima all’evento studio del 2014 e in un secondo momento alle mappe di allagamento simulato per TR 50, 200 anni.

Danni ad abitanti

Classe	Descrizione
I	Allagamenti minori, attività quotidiane produttive e ricreative non compromesse
II	Leggera alterazione delle attività quotidiane a causa di allagamenti localizzati
III	Gli allagamenti compromettono la viabilità e il normale uso dei servizi pubblici (trasporti, rete elettrica)
IV	Interruzione completa delle attività quotidiane ricreative e produttive a causa di allagamenti diffusi, contatori e strade completamente inutilizzabili. Allagamenti in piani seminterrati
V	Allagamento di piano terra, ingresso detriti leggeri e fanghiglia in edifici pubblici e privati. Non è necessaria l'immediata evacuazione del luogo
VI	Necessità di evacuazione immediata, allagamento completo di abitazioni a piano terra principio di allagamento a piani superiori, l'acqua ostacola l'abbandono di veicoli ed edifici fino al primo piano
VII	Danni a persone di lieve entità, non potenzialmente mortali. Necessaria immediata evacuazione, richiesta di soccorso per impossibilità di lasciare veicoli e piano terra/seminterrato
VIII	Lesioni che compromettono il movimento e necessitano di intervento di pronto soccorso
IX	1-20 morti
X	>20 morti

Tabella 5.7: Danni ad abitanti

Danni all'ambiente costruito

Classe	Descrizione
I	Allagamenti minori, nessun danno a strutture in superficie né interrate (es.: giardini, edifici, strade e cantine, box, depositi sotterranei)
II	Allagamenti minori su strade, giardini e cortili in procinto di essere sommerse, nessun danno registrato
III	Allagamenti crescenti, strade, giardini, cortili completamente allagati, no danneggiamento. Completa inagibilità di seminterrati e sottopassaggi
IV	Allagamenti sostenuti, inagibilità di piano terra, giardini parcheggi in superficie. L'acqua raggiunge abitazioni ed edifici pubblici
V	Allagamenti sostenuti, inagibilità di strade, allagamenti di abitazioni a piano terra, galleggiamento oggetti leggeri, possibile malfunzionamento rete elettrica
VI	Allagamento consistente che provoca danneggiamento di mobilia, elettrodomestici ed oggetti nelle abitazioni, a piano terra o superiore, nessun danno permanente agli edifici. Rischio blackout
VII	Allagamento consistente che provoca danneggiamento di oggetti distanti dal pavimento, muri di abitazioni ed edifici assorbono umidità per gli allagamenti. Possibili danni permanenti agli edifici da infiltrazioni d'acqua
VIII	Completa inondazione ponti a campata singola, danneggiamento segnaletica stradale, garage e piani interrati completamente sommersi. Rischio danneggiamento infrastrutture per il trasporto di oggetti mediamente pesanti (es.: tronchi, vetture leggere come scooter, piccole auto)
IX	Danni visibili a fabbricati, subsidenza o deformazione di elementi portanti che potrebbero recare collasso imminente
X	Collasso di strutture portanti di abitazioni, ponti, dighe, infrastrutture

Tabella 5.8: Danni all'ambiente costruito

Danni ad oggetti mobili

Classe	Descrizione
I	Allagamenti minori e discontinui, oggetti leggerissimi non vengono mobilitati dalla corrente (es.: scatole di cartone, foglie)
II	Allagamenti minori, trasporto oggetti leggerissimi
III	Allagamenti consistenti, trasporto oggetti leggeri (es.: foglie, rami)
IV	Allagamenti consistenti, trasporto detriti leggeri e danneggiamento auto. Danneggiamento segnaletica stradale
V	Allagamenti consistenti, trasporto oggetti di origine domestica (es.: mobili, elettrodomestici), trasporto di cassonetti e biciclette
VI	Allagamenti consistenti, messa in sospensione e possibile trasporto di auto di piccole dimensioni e ciclomotori
VII	Allagamenti consistenti, trasporto mezzi di grandi dimensioni (es.: SUV, minivan), potenziale occlusione di campate di ponti, danneggiamento strade e segnaletica per trascinamento autovetture
VIII	Trasporto oggetti pesanti (es.: container, camion), potenziale danneggiamento di manto stradale e autovetture limitrofe
IX	Trasporto vagoni treno e oggetti pesantissimi, trasporto prefabbricati
X	Trasporto aereo passeggeri

Tabella 5.9: Danni ad oggetti mobili

Danni all'ambiente naturale

Classe	Descrizione
I	Allagamenti minori, oggetti leggerissimi non trasportati
II	Allagamenti minori, galleggiamento di oggetti leggerissimi (es.: foglie, rami). Nessun danno dovuto al trasporto
III	Allagamenti minori, trasporto oggetti leggerissimi (foglie, rami). Nessun danno dovuto al trasporto
IV	Allaegamenti consistenti, trasporto detriti vegetali e oggetti leggeri (rami, fango)
V	Allagamenti consistenti, messa in sospensione di rami più pesanti e detriti, possibile occlusione di caditoie di fognatura, possibile invasione strade da parte dei detriti
VI	Allagamenti consistenti, messa in sospensione di corpi pesanti (tronchi, rami) che potrebbero compromettere la capacità di smaltimento di sezioni fluviali critiche (es.: presenza pile di ponti e viadotti). Possibile inagibilità di strade, viadotti e rete ferroviaria
VII	Allagamenti sostenuti, rottura argini fiume, possibile allagamento in aree apparentemente al riparo. Trasporto di detriti e ondate di fango
VIII	Rilascio localizzato di inquinanti liquidi o solidi che non implicano per concentrazione o natura disastro ambientale ai sensi del Dlgs. 152/06
IX	Rilascio diffuso di inquinanti liquidi o solidi; frane e sedimenti di versanti. Possibile disastro ambientale
X	Annegamento/morte animali liberi/ruspanti, modifica del profilo costiero a causa di ingenti quantitativi di detriti trasportati durante l'alluvione

Tabella 5.10: Danni all'ambiente naturale

5.3.3 Mappatura qualitativa dei danni per categoria

Una volta costruite le scale qualitative tematiche, a ciascuna di essa è stata attribuita una delle scale cromatiche di seguito riportate:

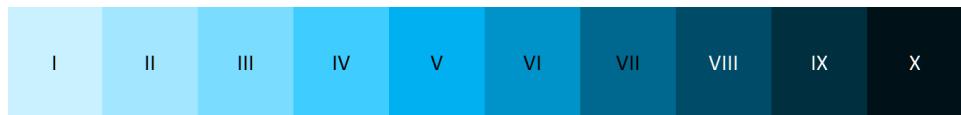


Figura 5.12: Scala cromatica di danni a persone

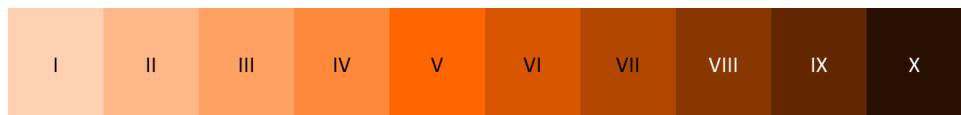


Figura 5.13: Scala cromatica di danni all'ambiente costruito

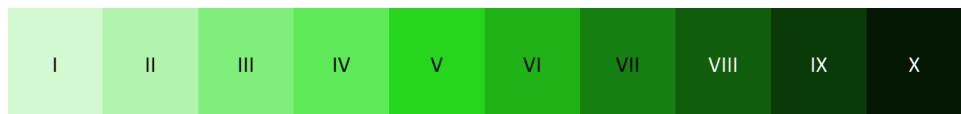


Figura 5.14: Scala cromatica di danni all'ambiente naturale

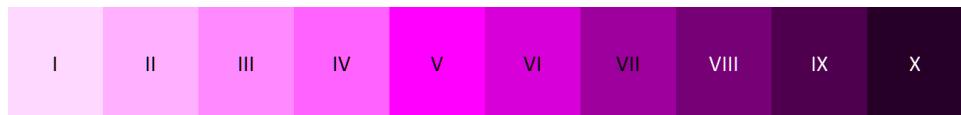


Figura 5.15: Scala cromatica di danni ad oggetti mobili di origine artificiale

quindi si è proceduto alla mappatura delle aree colpite dall'alluvione del 15 Novembre 2014, nelle sezioni precedentemente indicate (5.2). È stata inoltre costruita una scala cromatica aggiuntiva per indicare, all'interno della stessa area, il massimo danno provocato fra le quattro categorie, in modo tale da avere una visione d'insieme.



Figura 5.16: Scala cromatica di danno massimo per zona

Di seguito si riportano i risultati ottenuti.

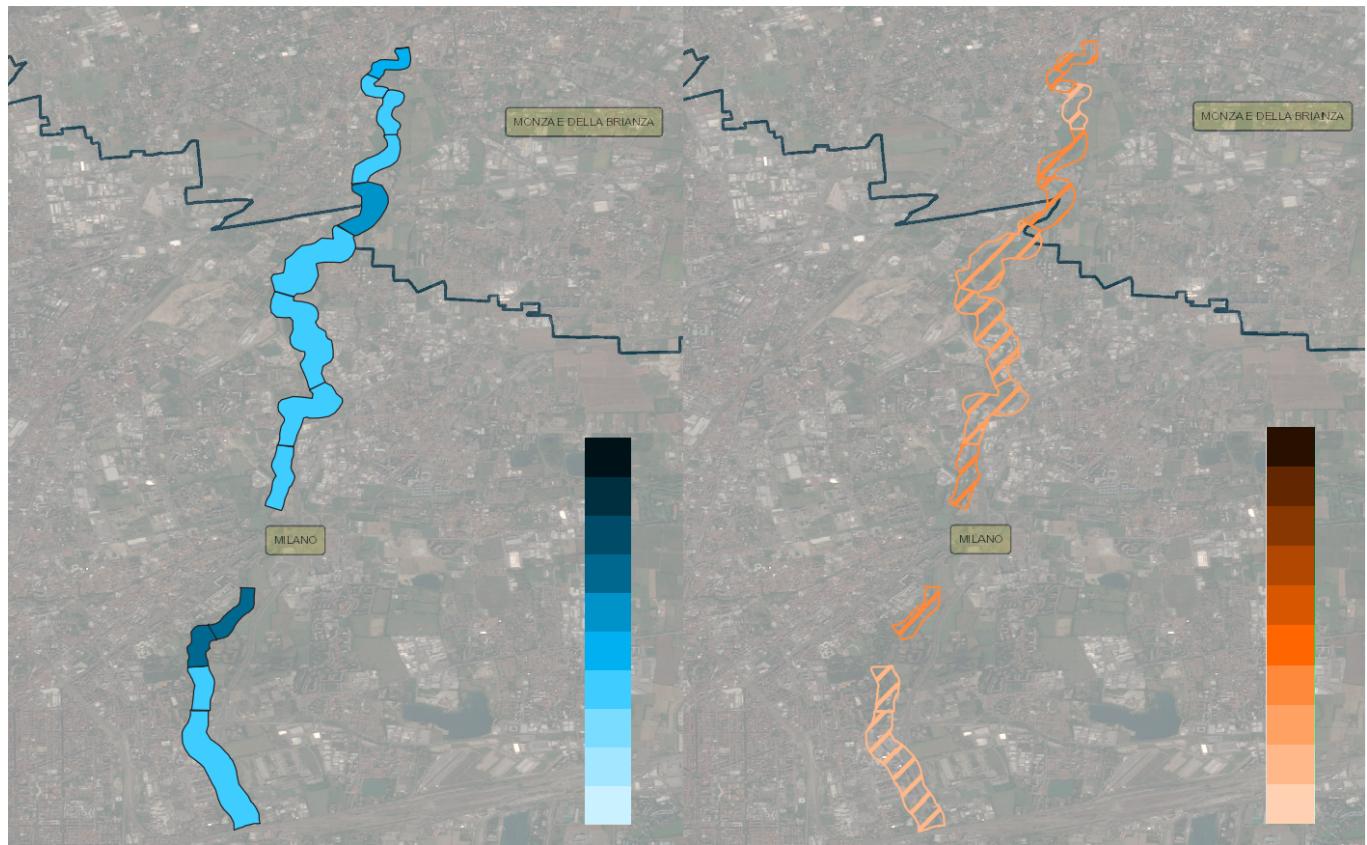


Figura 5.17: A sinistra la mappa dei danni alle persone, a destra quella dei danni all'ambiente costruito

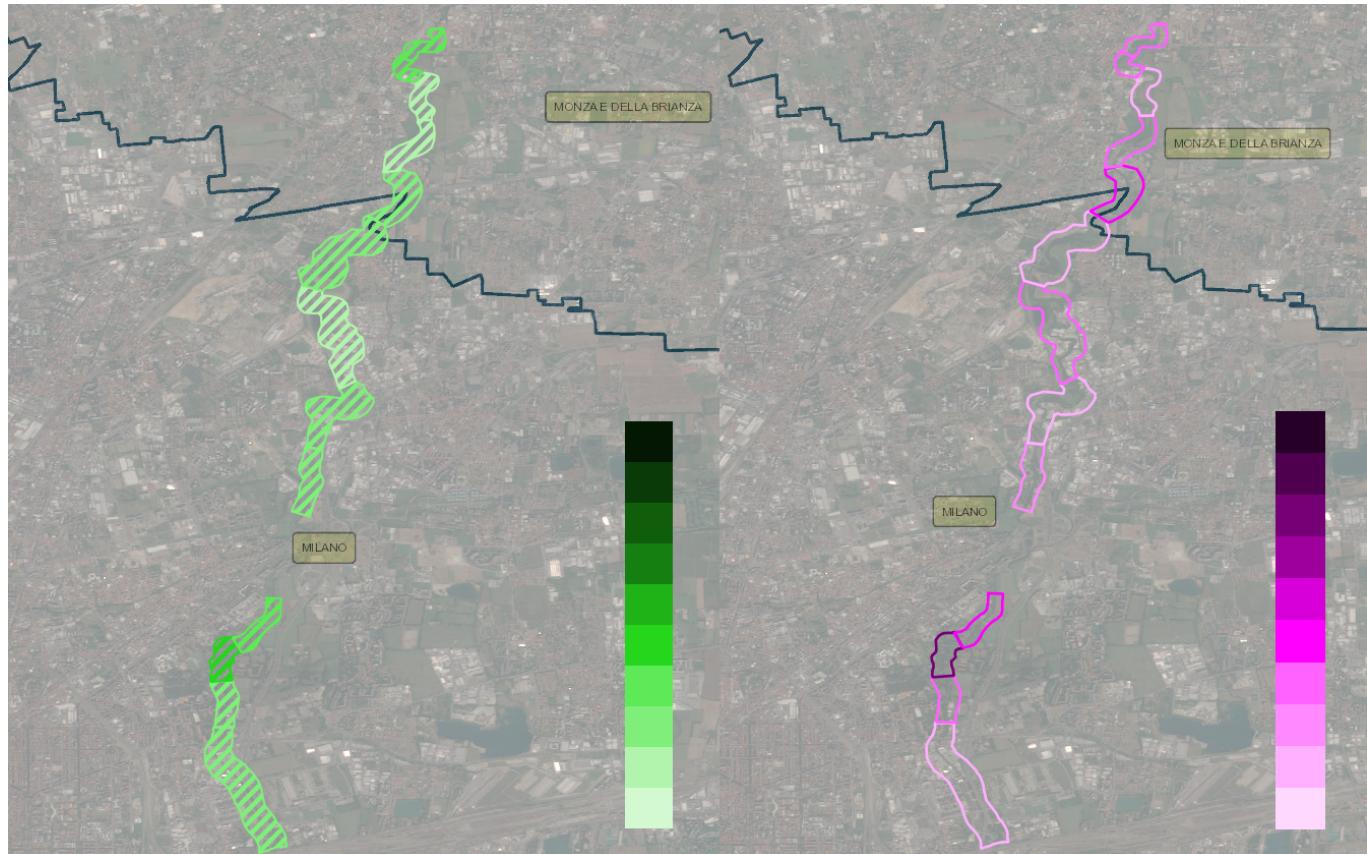


Figura 5.18: A sinistra la mappa dei danni all'ambiente naturale, a destra quella dei danni agli oggetti mobili

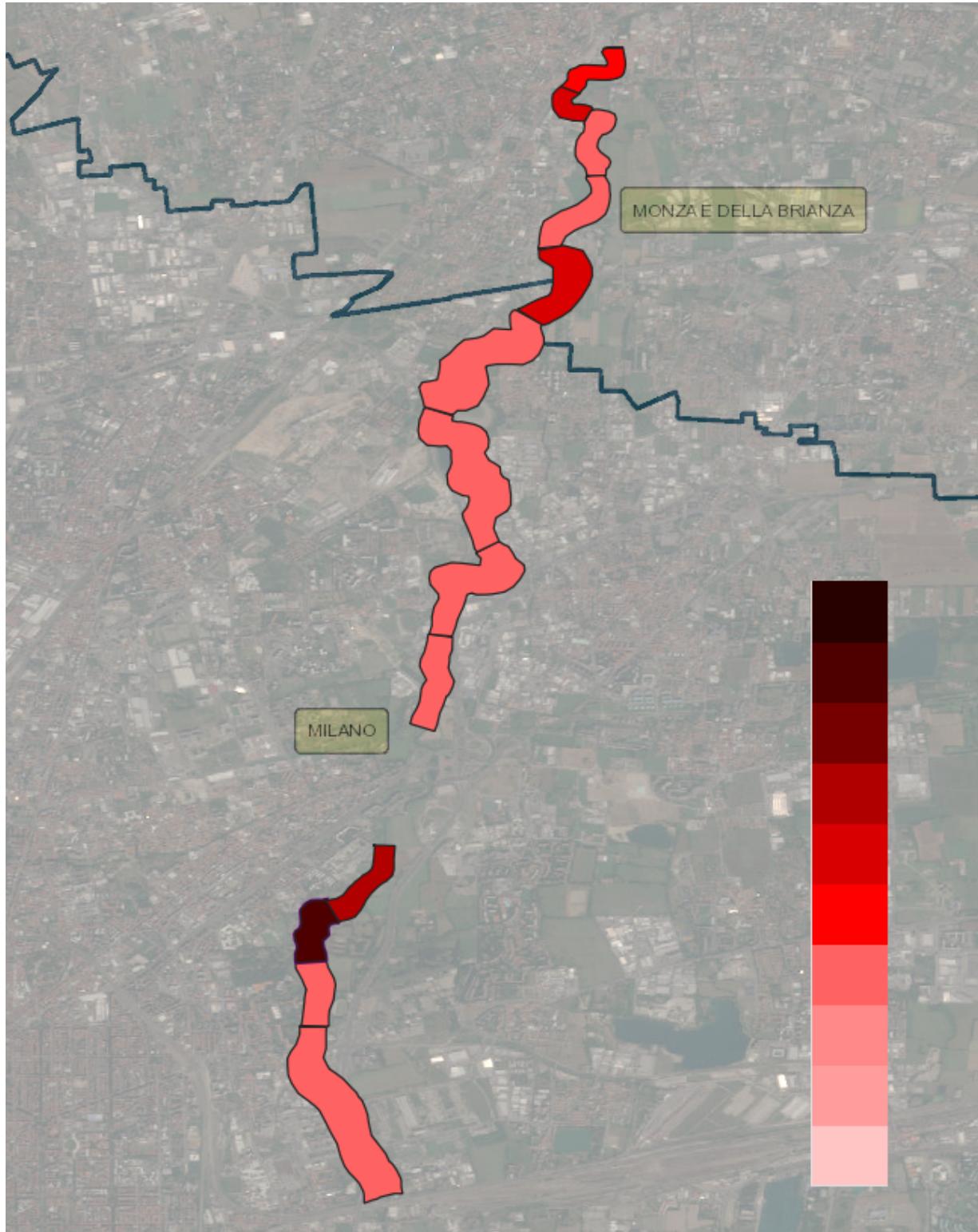


Figura 5.19: Mappa globale di massimo danno per area fra i quattro tipi proposti

Dall'analisi delle mappe prodotte (5.17, 5.18, 5.19) è possibile effettuare alcune considerazioni: in primo luogo i danni all'ambiente naturale, e dunque alla vegetazione (o eventualmente alla fauna locale o ad animali domestici) si sono rivelati, in base alle notizie raccolte, i più blandi: il tratto di fiume in cui essi sono risultati maggiori è stato quello in corrispondenza del *CeAS - Centro Ambrosiano di Solidarietà*, in cui il trasporto di detriti vegetali, quali foglie, rami e tronchi, ha provocato la distruzione dei locali di accoglienza come descritto in precedenza (2). L'unico altro punto in cui la vegetazione ha risentito in modo significativo della presenza dell'alluvione è stata la zona di via Lippi a Monza (5.3), laddove squadre di protezione civile hanno dovuto effettuare rimozione di tronchi e rami caduti, ma anche detriti che occludevano il naturale attraversamento della corrente in alveo. Il motivo per cui la vegetazione non ha risentito particolarmente degli effetti nefasti dell'alluvione può essere ricercato, comunque, nella scarsa presenza della stessa lungo il Lambro urbano, che per definizione risulta essere particolarmente "soffocato" dall'edilizia e confinato da superfici asfaltate che non ammettono appunto aree verdi.

Ad ogni modo, al di fuori dell'area di indagine che è stata selezionata per la simulazione successiva dei tiranti idrici, va comunque ricordata, all'interno della sfera dell'ambiente naturale, e in particolare in riferimento agli animali, la grande minaccia che gli allagamenti hanno rappresentato per il canile e gattile di via Aquila a Milano 5.3, in cui circa trecento fra cani e gatti hanno rischiato di perdere la vita annegati nelle loro gabbie.

Per quanto concerne i danneggiamenti ad oggetti mobili di natura artificiale, le aree maggiormente colpite risultano essere sicuramente quelle all'interno del Parco Lambro, nello specifico Fondazione *Exodus* e *CeAS*, in quanto in entrambi i casi si è registrato il danneggiamento di mobili e impianti dei locali delle strutture, a causa degli allagamenti sostenuti che hanno superato il metro di livello idrico, e che hanno reso completamente inagibili entrambe le sedi. Come nel caso precedente, anche per questo tipo di danni è necessario ricordare l'esperienza del canile di via Aquila, dato che gli uffici, l'ambulatorio e gli archivi sono stati investiti da violenti allagamenti a causa di cui gran parte delle attrezzature della struttura è stata sostituita. Il Centro Ambrosiano merita una nota dedicata, in quanto a causa degli imponenti tiranti sviluppati è stato messo in sospensione, e poi trascinato, un container depositato nel Parco Lambro, il cui trasporto non si è arrestato se non prima di aver coperto una decina di metri.

Spostando l'attenzione sui danni all'ambiente costruito, va sottolineato come questi siano strettamente legati ai danni agli oggetti mobili, e lo si può notare soprattutto nel Parco Lambro, laddove, ancora una volta a causa degli alti tiranti sviluppati - anche per la naturale conformazione del Parco, caratterizzato da alcune depressioni altimetriche proprio in corrispondenza delle strutture presenti, alcuni muri - anche portanti - hanno subito pesanti infiltrazioni che ne hanno pregiudicato la stabilità strutturale. Anche il depuratore di Cologno Monzese, gestito dal *CAP - Consorzio dell'Acqua Pubblica* ha risentito dell'alluvione, anche se in modo indiretto: è stata infatti predisposto lo spegnimento dei trasformatori al fine di prevenire qualunque danno dovuto a sbalzi di tensione. Danni diretti alla rete elettrica sono stati invece registrati in corrispondenza di via Lippi e dello stadio Sada a Monza, ove si sono registrati blackout diffusi causati dagli allagamenti, così come anche in via Friuli e a San Maurizio al Lambro, ove i contatori domestici sono andati fuori uso. La stessa situazione si è ripetuta anche in via Corelli, ove è stato impossibile fare affidamento sulla rete elettrica per diverse ore.

In riferimento ai danni subiti dalla popolazione, prevalentemente tradotti in evacuazioni forzate, fortunatamente in ogni caso senza risvolti letali, questi sono dislocati in maniera abbastanza uniforme lungo il tratto di Lambro considerato, segno della urbanizzazione abbastanza omogenea dell'intero territorio fra Monza e Milano, con eccezione di "Cascinazza" e Cascina Gobba. I maggiori disservizi si sono verificati a *Brugherio*, ove

in alcune strade è stata predisposta l'imminente evacuazione per il minaccioso avvicinamento degli allagamenti alle abitazioni. Evacuazioni necessarie al Parco Lambro, ove per i motivi descritti in precedenza ogni insediamento abitativo è stato abbandonato rapidamente, con l'aiuto di soccorsi esterni. Le evacuazioni sono state necessarie anche in via Corelli, in via Aquila. Ad ogni modo è importante ricordare che al di là delle situazioni più critiche, che hanno imposto un immediato abbandono delle abitazioni, molte strade sono state interrotte per la sicurezza pubblica, come via Mentana, via Ugo Foscolo (Monza), viale Spagna e via Barcellona (Cologno Monzese), via Friuli a San Maurizio al Lambro, alcune strade a Lambrate (Milano), la tangenziale Est fra Vimercate e Rubattino.

Infine, si è proceduto alla mappatura dei danni massimi in assoluto fra le quattro categorie: in conseguenza alle considerazioni di cui sopra, è evidente che le aree colpite dai danni assoluti maggiori siano quelle relative al Parco Lambro, a San Maurizio al Lambro e quelle nell'intorno dello stadio Sada, a Monza.

Nella tabella seguente vengono raccolti i valori di danno attribuiti per categoria e area geografica¹:

Luogo	Classe					Globale
	Popolazione	Ogg. mobili	Amb. costruito	Amb. naturale		
stadio Sada, Monza	V	IV	IV	IV	IV	V
via Lippi, Monza	IV	IV	IV	VI	VI	
Cascinazza, Monza	IV	II	II	II	IV	
via Africa, Monza	IV	IV	IV	II	IV	
via Friuli, San Maurizio al Lambro	IV	II	III	III	IV	
via Cadore, Sesto San Giovanni	IV	II	III	III	IV	
viale Spagna, Cologno Monzese	IV	IV	III	II	IV	
via Di Vittorio, Cologno Monzese	IV	II	III	III	IV	
F. Exodus, Milano	VII	V	V	IV	VII	
CeAS, Milano	VII	VIII	IX	V	IX	
Lambrate, Milano	IV	II	II	III	IV	
via Corelli, Milano	V	IV	IV	IV	V	
via Aquila, Milano	V	II	VII	VII	VII	

Tabella 5.11: Valori di danno empirico per categoria

¹L'area di Cascina Gobba è priva di informazioni utili, dunque non è stata inclusa, né nella tabella né nelle mappe di cui sopra (5.17, 5.18, 5.19)

5.3.4 Simulazione degli allagamenti

Dopo aver realizzato le mappe qualitative di danno si è focalizzata l'attenzione sulla simulazione delle aree allagate, nello stesso tratto di fiume. Gli allagamenti sono stati simulati prima di tutto per il 15 Novembre 2014, giorno di picco delle altezze idrometriche registrate [5.11](#), in seguito sono state effettuate due ulteriori simulazioni per TR 50, TR 200.

Il software utilizzato a tal fine è stato ORSADEM [\[13\]](#), sviluppato dall'[Università degli studi di Pavia](#): esso rappresenta un codice di calcolo per la modellazione monodimensionale della propagazione delle piene, e per la mappatura automatica delle aree allagate.

Fra i vari input da fornire, oltre alla geometria delle sezioni [4.5](#), è naturalmente necessario indicare dei valori di portata con cui simulare le inondazioni. In particolare il modello utilizzato dal codice non richiede esclusivamente il valore del colmo di piena - stimato dal Politecnico di Milano durante il progetto FLORIMAP [\[15\]](#) attraverso il metodo VAPI [4.2.1](#), ma l'intera ricostruzione dell'evoluzione temporale delle portate transitanti, ossia l'idrogramma.

Per ricostruire i suddetti, almeno per le sezioni strumentate² si sono utilizzate le scale di deflusso calibrate da ARPA Lombardia [\[27\]](#) in via Feltre e a Lesmo - Peregallo. È necessario ricordare come la scala compatibile con il 2014 è stata calibrata per un tirante massimo inferiore al picco registrato a Feltre. Infatti durante il 15/11/2014 sono stati registrati dei livelli rispettivamente pari a 3.15 e 2.8 m [5.11](#), invece l'intervallo di accettabilità della scala è

$$0.38 \leq h[m] \leq 2.3$$

motivo per cui si è preferito utilizzare il legame funzionale calibrato per il periodo temporale 2010/05/03 - 2013/09/16, utilizzabile per il seguente intervallo:

$$0 \leq h[m] \leq 3.5$$

la scala viene riportata di seguito:

$$Q = 16.392 \cdot h^{1.954} \quad (5.1)$$

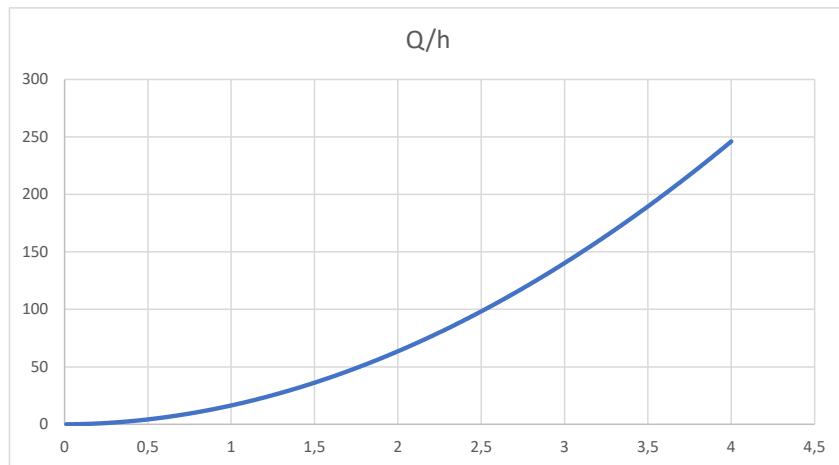


Figura 5.20: Scala di deflusso dell'idrometro di via Feltre

²ossia per le sezioni provviste da stazioni meccaniche di misura idrometrica

Per quanto concerne invece la scala di deflusso utilizzata per ricostruire le portate a Lesmo, a partire dalle altezze idriche misurate, benché sussista il medesimo problema, ossia che i picchi di tiranti osservati (2.87 m [5.11](#)) superino l'intervallo di calibrazione della scala per il 2014

$$0 \leq h[m] \leq 1.835$$

si è comunque deciso di non utilizzare la - apparentemente - più compatibile scala di deflusso di Lesmo calibrata per il periodo 1988 - 2004, in quanto questa, seppur valida e adoperabile per un range di tiranti ben più ampio $0 \leq h[m] \leq 3$, è sicuramente afferente ad una condizione morfologica, e quindi idraulica, diversissima da quella relativa al momento della piena del 2014, a causa di fenomeni erosivi e di sedimentazione che nel corso del tempo necessariamente plasmano e modificano la geometria dell'alveo fluviale. La scala di deflusso adoperata è dunque la seguente:

$$Q = 27.032 \cdot (h + 0.212)^{1.633} \quad (5.2)$$

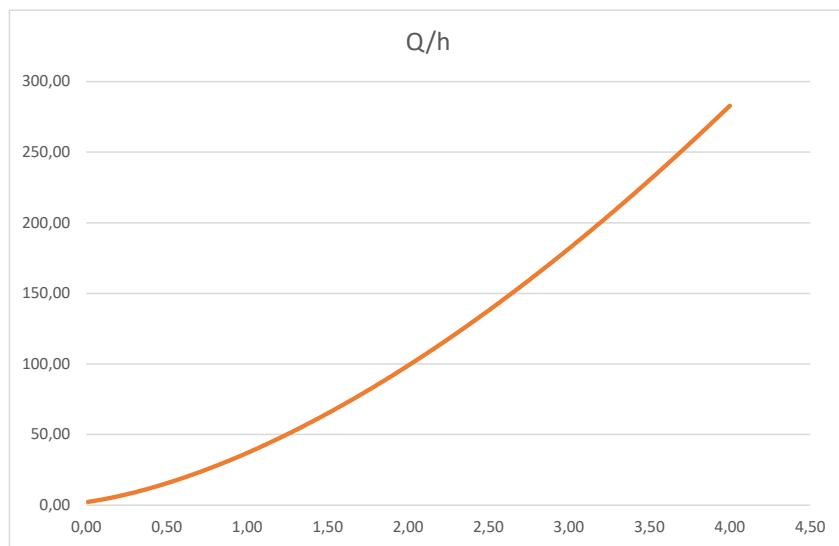


Figura 5.21: Scala di deflusso dell'idrometro di Lesmo - Peregallo

A partire da queste informazioni sono stati ricostruiti gli idrogrammi in tutte le altre sezioni di cui si conosce la geometria [4.4](#) tramite stima per traslazione diretta, sotto le ipotesi di

1. scala invarianza delle portate rispetto alle aree scolanti, plausibile in quanto le varie sezioni insistono sulla stessa asta fluviale, e sono caratterizzate dallo stesso livello in termini di ordinamento gerarchico;
2. modello cinematico di propagazione della piena: si assume dunque che il passaggio dell'onda sia rappresentato da una successione di stati quasi uniformi, in modo tale che:

$$i_f - j = 0^3$$

tale assunzione è tanto più plausibile quanto alta è la pendenza del bacino idrografico.

³ipotesi di Boussinesq, 1872

Al fine di poter produrre i vari idrogrammi aggiuntivi rispetto a quelli di via Feltre e Lesmo - Peregallo, poi, si sono confrontati i picchi di portata generati per queste ultime due sezioni con i quantili dimensionali di portata stimati nell'ambito della revisione delle distribuzioni GEV all'interno del Progetto FLORIMAP [4.4](#). Per confronto diretto è emerso che la portata al colmo defluita in via Feltre il 15 Novembre 2014, pari a:

$$Q = 154.096 \text{ m}^3/\text{s}$$

utilizzando la [5.1](#), è molto prossima al quantile decennale di portata per la stessa sezione, in base alle stime effettuate dal Politecnico di Milano [[15](#)], pari a:

$$Q = 160.1 \text{ m}^3/\text{s}$$

con uno scarto del 3.75%. Per questo motivo, al fine di traslare per stima diretta le portate lungo l'asta fluviale del Lambro urbano, è stato costruito un fattore amplificatore verso valle (riduttore verso monte) siffatto:

$$\frac{Q_{\text{colmo, sezione}X}}{Q_{\text{colmo,Feltre}}} = \frac{Q_{\text{colmo,sezione}X}}{160.1}$$

assumendo appunto che l'evento occorso durante il Novembre 2014 abbia una cadenza decennale.

La stessa procedura è stata adottata a partire dalla sezione di Lesmo, per ricostruire gli idrogrammi delle sezioni ad essa più vicine in modo più affidabile, in quanto impensabile ritenere la sola sezione di Feltre significativa per l'intera asta fluviale, pur avendo, come già annunciato, a disposizione dati osservati esclusivamente in due stazioni. Il secondo coefficiente ha quindi la forma:

$$\frac{Q_{\text{colmo, sezione}X}}{Q_{\text{colmo,Lesmo}}} = \frac{Q_{\text{colmo,sezione}X}}{114.2}$$

ove $Q = 114.2 \text{ m}^3/\text{s}$ rappresenta il quantile decennale stimato per la sezione di Lesmo [4.4](#), del 5.8% minore rispetto al colmo ricostruito attraverso la rispettiva scala di deflusso, ovvero $121.23 \text{ m}^3/\text{s}$. I coefficienti sono stati applicati agli idrogrammi di riferimento in modo *pointwise*, quindi per ciascun valore di portata (oraria).

Per la collocazione temporale di ciascun idrogramma è stato utilizzato il metodo cinematico. A partire dalla conoscenza, tramite quaderni tecnici del Centro Funzionale - Soglie idrometriche [[28](#)] ed AIPo - *Agenzia Interregionale per il fiume Po* [[29](#)] della geometria delle sezioni strumentate, si è infatti calcolata una stima di velocità transitante in alveo per le medesime dividendo ciascun valore orario di portata per la rispettiva area, dopodiché si è ricavata una media aritmetica delle velocità desunte. Approssimando a rettangolare la geometria delle sezioni fluviali, poi, si è stimata la celerità di propagazione dell'onda di piena lungo il Lambro come:

$$c = \frac{5}{3} \cdot v$$

ove:

- c = celerità di propagazione della piena [m/s]
- v = velocità della corrente [m/s]

e conoscendo la distanza che separa le varie sezioni, così come la celerità, è stato possibile determinare il ritardo temporale di arrivo dell'onda di piena tra una sezione e la successiva. Di seguito vengono riportate le sezioni di Feltre e Lesmo rilevate da AIPo [[29](#)].

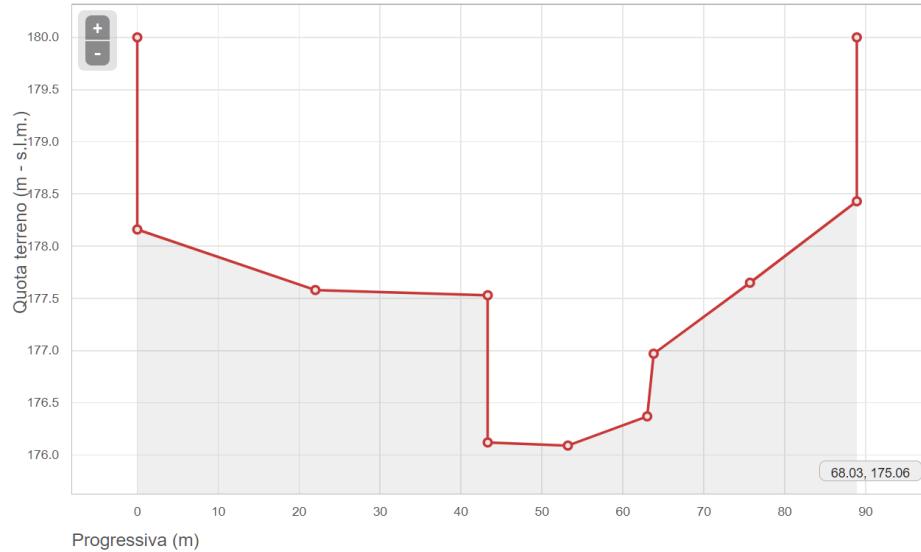


Figura 5.22: Sezione di Feltre, Milano - AIPo [29]

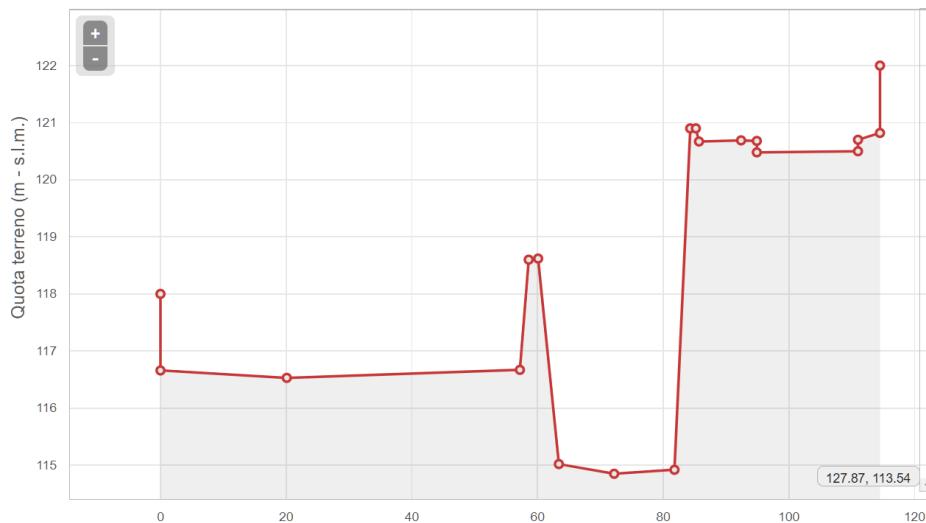


Figura 5.23: Sezione di Lesmo, Monza - AIPo [29]

le aree misurate vengono riportate di seguito ⁴:

- Feltre: 78.6 m^2
- Lesmo: 134.5 m^2

a causa della grande differenza di dimensioni fra le due sezioni, naturalmente anche la celerità stimata è molto diversa (anche perché le portate transitanti a Lesmo sono naturalmente inferiori rispetto a quelle che vengono convogliate a valle, a Feltre, sia a passo orario che in termini di colmo di piena). Di seguito vengono riportati gli idrogrammi richiesti dalle Prof.sse G. Petaccia ed E. Persi dell'Università degli Studi di Pavia, per le sezioni di: *Lesmo, Monza, Martesana, Feltre, Bonfadini*.

⁴in entrambi i casi è stata considerata, cautelativamente, la sezione di magra, in modo tale da ottenere il valore più alto possibile di celerità, che produrrebbe il risultato più problematico ai fini dell'organizzazione dei soccorsi

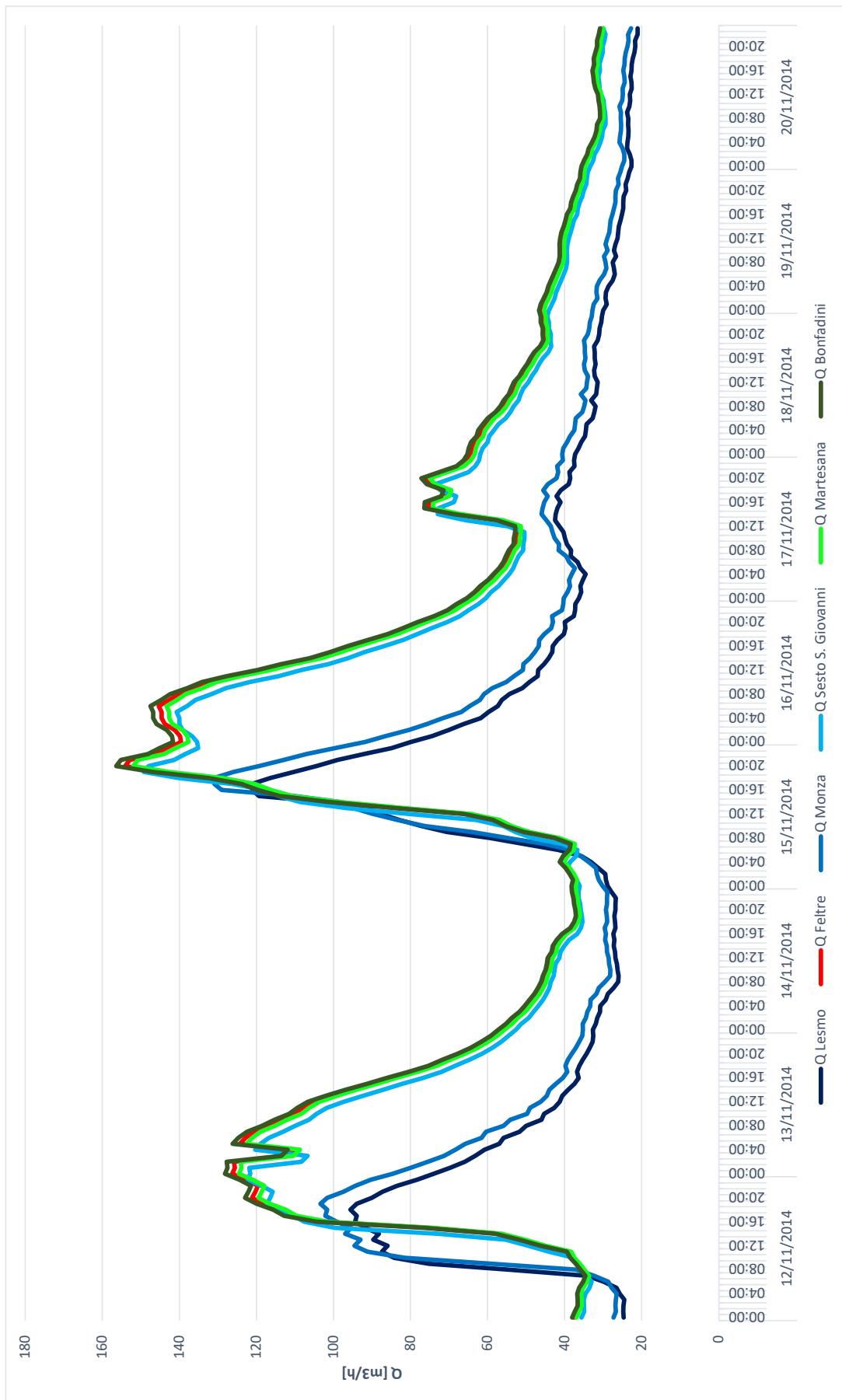


Figura 5.24: Idrogrammi stimati per traslazione diretta

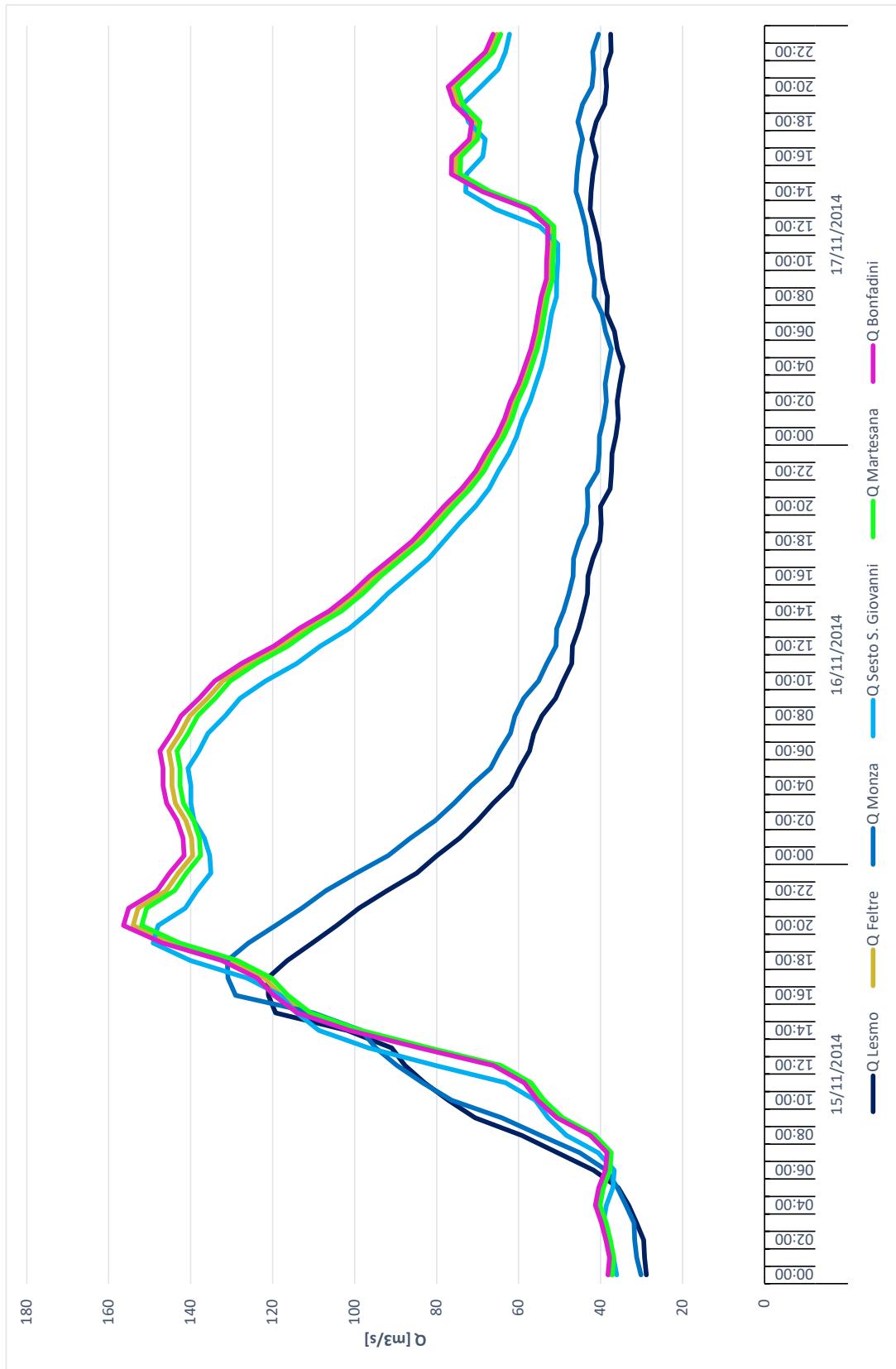


Figura 5.25: Focus sul picco del 15/11/2014

dai grafici appare evidente quanto il ritardo fra l'onda di piena a Monza rispetto a

Lesmo sia maggiore rispetto al ritardo fra le varie sezioni di valle (più vicine fra loro, peraltro), in cui, per ricostruire gli idrogrammi, è stata utilizzata la sezione di Feltre. Inoltre dai grafici risulta evidente l'aumento di deflusso superficiale man mano che ci si sposta da monte verso valle, sia in termini di colmo di piena che di volume d'acqua transitante (area sottesa da ciascun idrogramma).

Di seguito si riportano le mappe di allagamento simulate tramite ORSADEM [13] per l'evento del Novembre 2014⁵ e per TR50, TR200.

⁵La simulazione per l'evento - studio è stata effettuata relativamente al giorno 15/11/2014, con l'ausilio degli idrogrammi presentati in precedenza

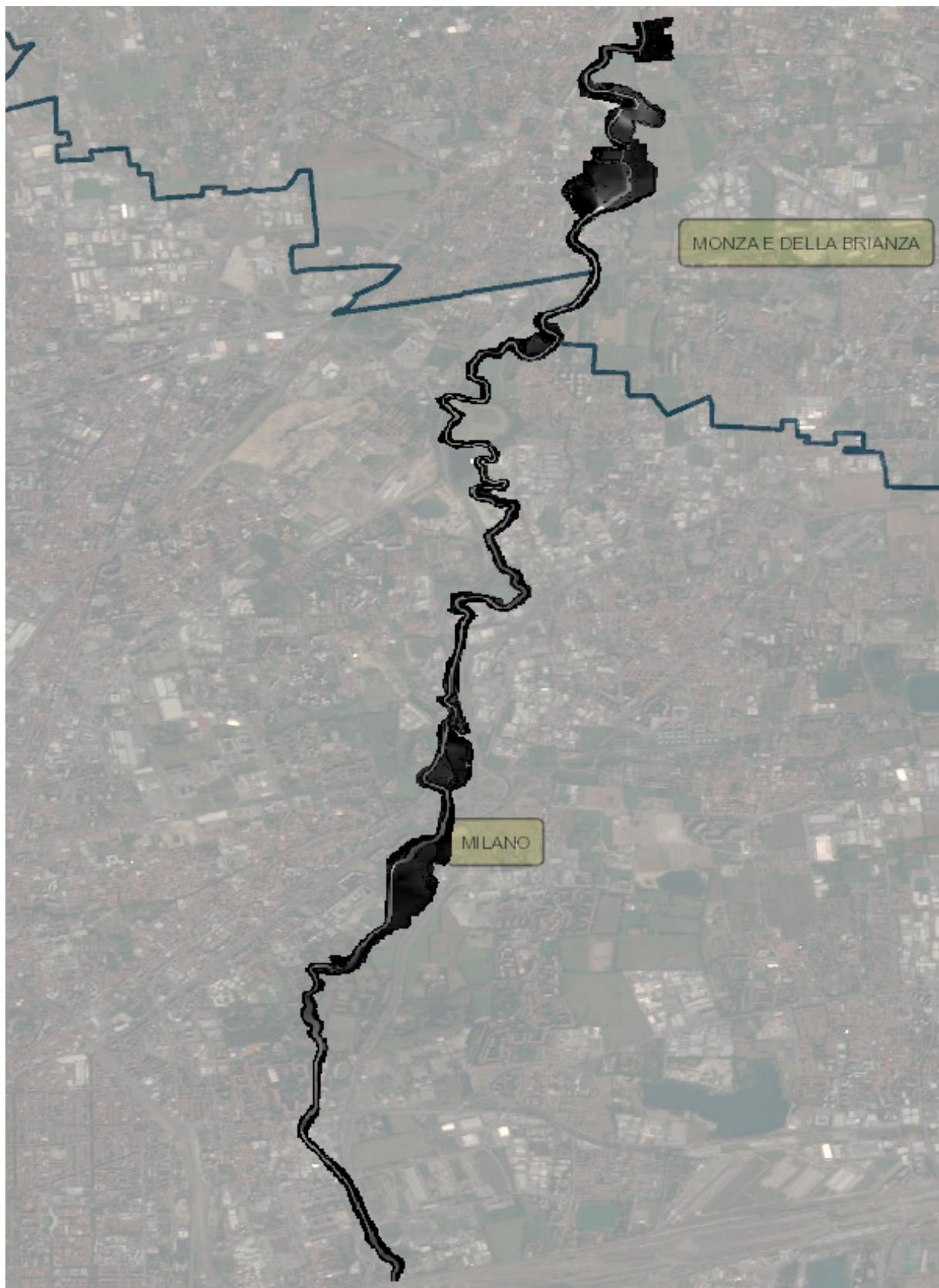


Figura 5.26: Simulazione numerica dell'allagamento 15/11/2014

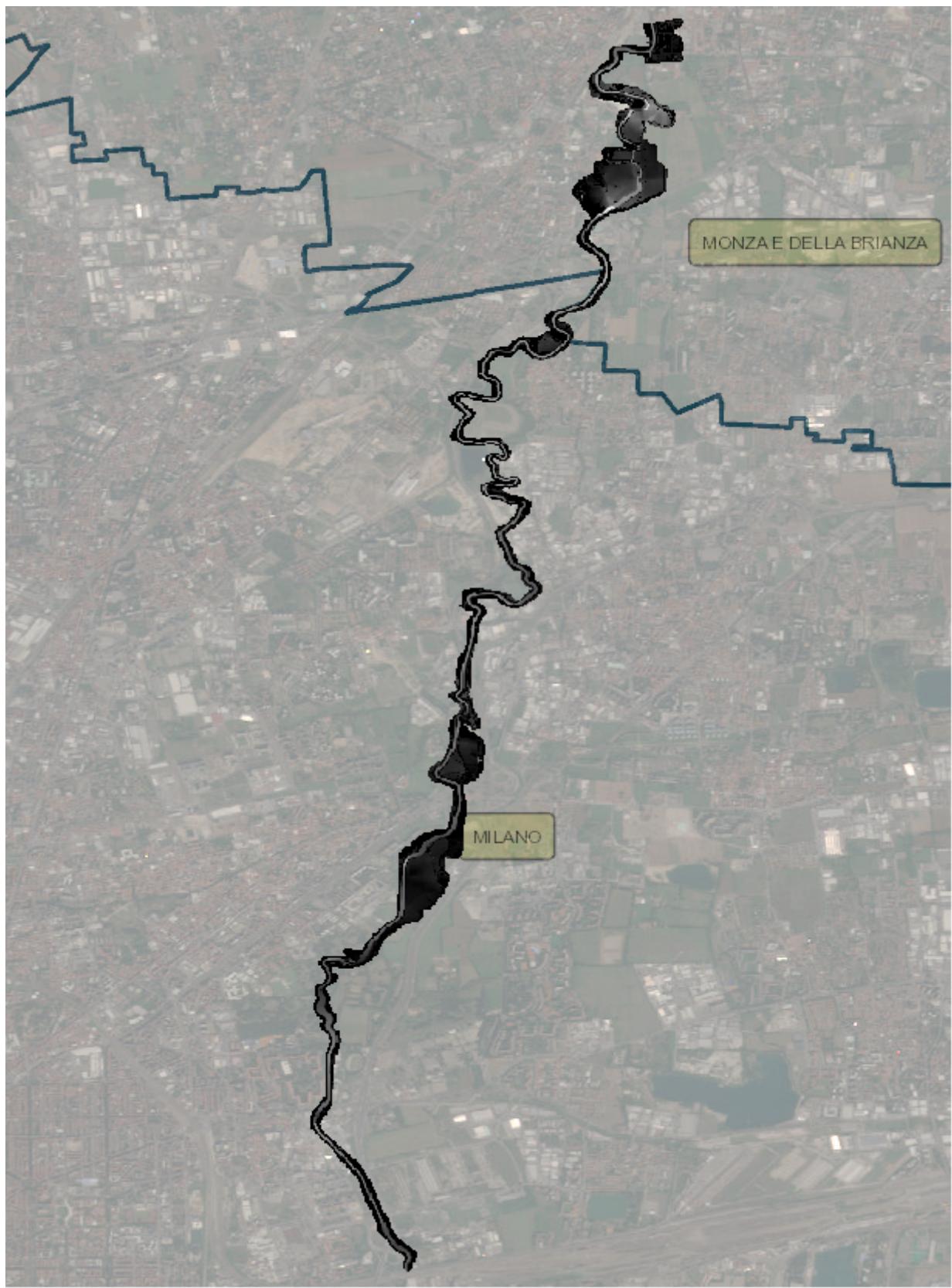


Figura 5.27: Simulazione numerica dell'allagamento per TR50

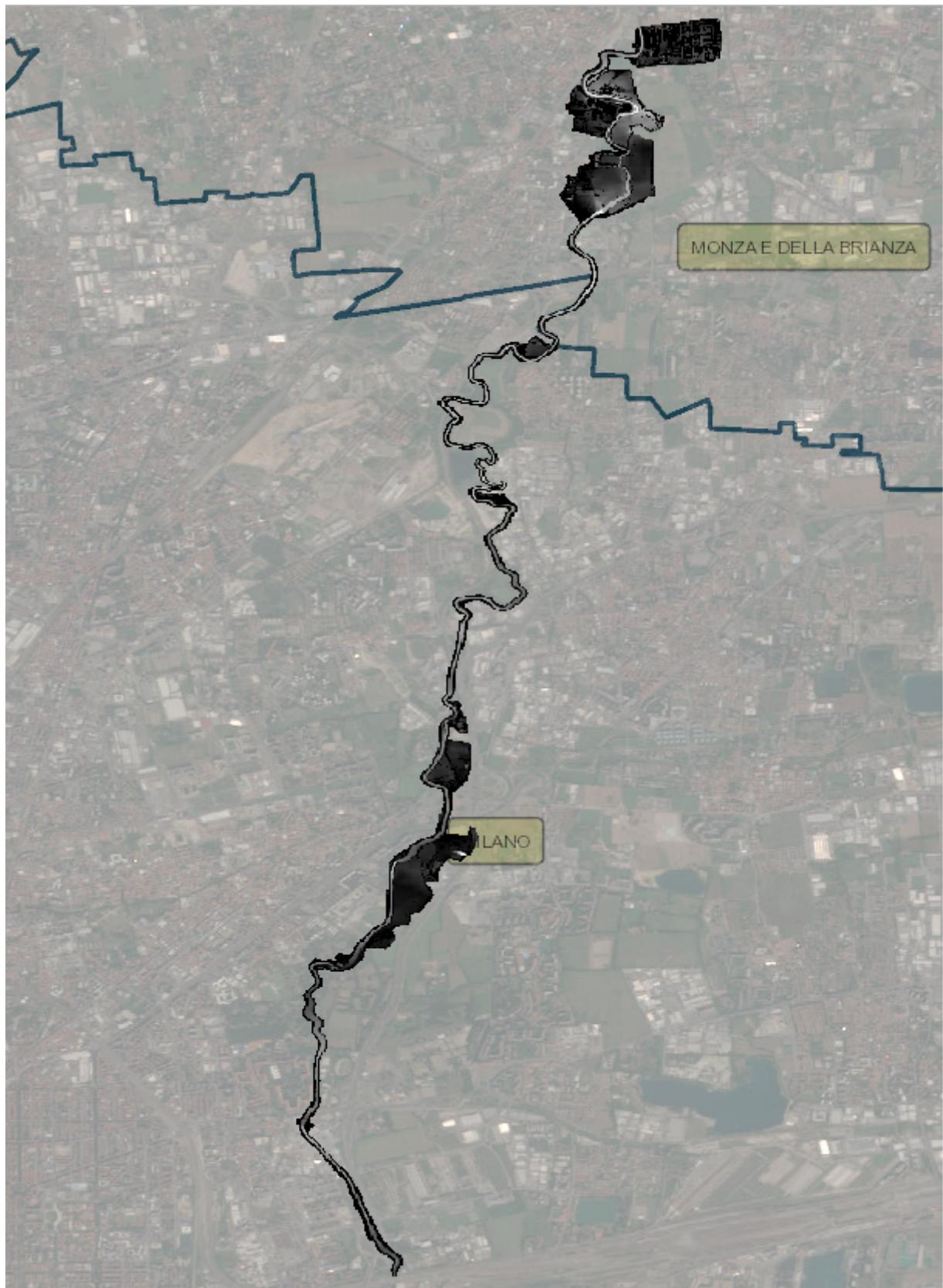


Figura 5.28: Simulazione numerica dell'allagamento per TR200

Analisi dei risultati

Paragrafi

6.1	Individuazione di legame funzionale empirico tirante-danno	80
6.2	Mappa qualitativa dei danni per TR 50	84
6.3	Mappa qualitativa dei danni per TR 200	86
6.4	La classe di esposizione	88
6.5	Il rischio idraulico	90

A partire dai raster forniti dalle Prof.sse Petaccia e Persi, interrogabili tramite GIS - *Geographic Information System*, sono stati individuati i tiranti idrici simulati numericamente nelle aree più colpite dall'alluvione. Confrontando tali tiranti con i valori di danno attribuiti precedentemente 5.11 è stata ricercata una possibile correlazione:

	Popolazione		Oggetti mobili		Amb. Costruito		Amb. Naturale		Globale	
	Tirante	Danno	Tirante	Danno	Tirante	Danno	Tirante	Danno	Tirante	Danno
Exodus	2,1	7	2,1	5	2,1	5	2,1	4	2,1	7
CeAS	3,53	7	3,53	8	3,53	9	3,53	5	3,53	9
Lambrate	1,14	4	1,14	2	1,14	2	1,14	3	1,14	4
Cim Lamb	1,23	4	1,23	4	1,23	3	1,23	3	1,23	4
Via Friuli	1,4	4	1,4	2	1,4	3	1,4	3	1,4	4
Casc Col	1,34	4	1,34	2	1,34	3	1,34	3	1,34	4
Viale Spagna	1,25	4	1,25	4	1,25	3	1,25	2	1,25	4
Cascinazza	1,5	4	1,5	2	1,5	2	1,5	2	1,5	4
Via Occhiate	2,3	6	2,3	5	2,3	4	2,3	3	2,3	6
Stadio Sada	2,49	5	2,49	4	2,49	4	2,49	4	2,49	5
Via Africa	1,66	4	1,66	4	1,66	4	1,66	2	1,66	4
Via Lippi	2,16	4	2,16	4	2,16	4	2,16	4	2,16	6
Depuratore CAP	1,55	4	1,55	3	1,55	4	1,55	3	1,55	4

Figura 6.1: Comparazione danno - tirante per categoria e per posizione

tramite formattazione condizionale viene evidenziato in blu il tirante e in rosso il danno per il medesimo luogo. Nel prossimo capitolo si analizzano i legami funzionali che ne derivano. È da sottolineare come, rispetto al numero di luoghi di cui si sono ritrovate notizie storiche circa l'alluvione 5.11, in questa sede se ne sia considerata una quantità inferiore; tale decisione è stata obbligata dal fatto che la simulazione numerica degli allagamenti è stata effettuata - per economia di tempo e di sforzo computazionale - esclusivamente in un'area di territorio abbastanza prossima alle sponde.

6.1 Individuazione di legame funzionale empirico tirante-danno

Nei grafici vengono rappresentate le relazioni danno-tirante di cui prima 6.1. Come è possibile osservare, utilizzando un modello lineare, si ottiene una rappresentazione abbastanza affidabile di come i danni ad oggetti ed ambiente costruito siano influenzati dal tirante idrico: il rispettivo coefficiente di determinazione infatti - R^2 - è pari a 0.71 e 0.79. Negli altri casi, invece, un modello lineare risulta molto poco rappresentativo di come i danni vengano causati dai (soli) livelli idrici. Il motivo di questa forte differenza nei risultati può essere imputato alla maggiore complessità della fisionomia umana e della costituzione degli elementi afferenti l'ambiente naturale - quali vegetazione, animali ma anche elementi paesaggistici come versanti (soggetti in generale a frane durante alluvioni) e suolo (soggetto a potenziale rilascio di sostanze inquinanti). In tutti questi casi infatti, oltre la mera presenza durante l'allagamento, molti altri fattori possono pregiudicare la stabilità e/o incolumità, come ad esempio stato psicofisico alterato (nel caso di persone), carenza di interventi di sistemazione forestale dei versanti, suolo particolarmente permeabile, vegetazione più o meno resistente nei confronti dell'azione di trascinamento esercitata dalla corrente. Per questi motivi, è sensato ritenere che nel caso di danni ad ambiente naturale e persone non sia sufficiente la esclusiva informazione di livello idrico al fine di stimare in modo affidabile i danni provocati, ma debbano essere coinvolti altri parametri, come la velocità della corrente e la forza di trascinamento.

Ad ogni modo osservando la funzione che lega il tirante ai danni globali, calcolati come massimo danno fra quello di ciascuna delle quattro categorie nello stesso luogo, la dipendenza risulta abbastanza marcata, e il coefficiente di determinazione supera l'80%, indicando la capacità da parte del modello - seppure molto semplice in quanto lineare - di esprimere gran parte della variabilità dei danni al crescere del livello idrico (in base al campione a disposizione).

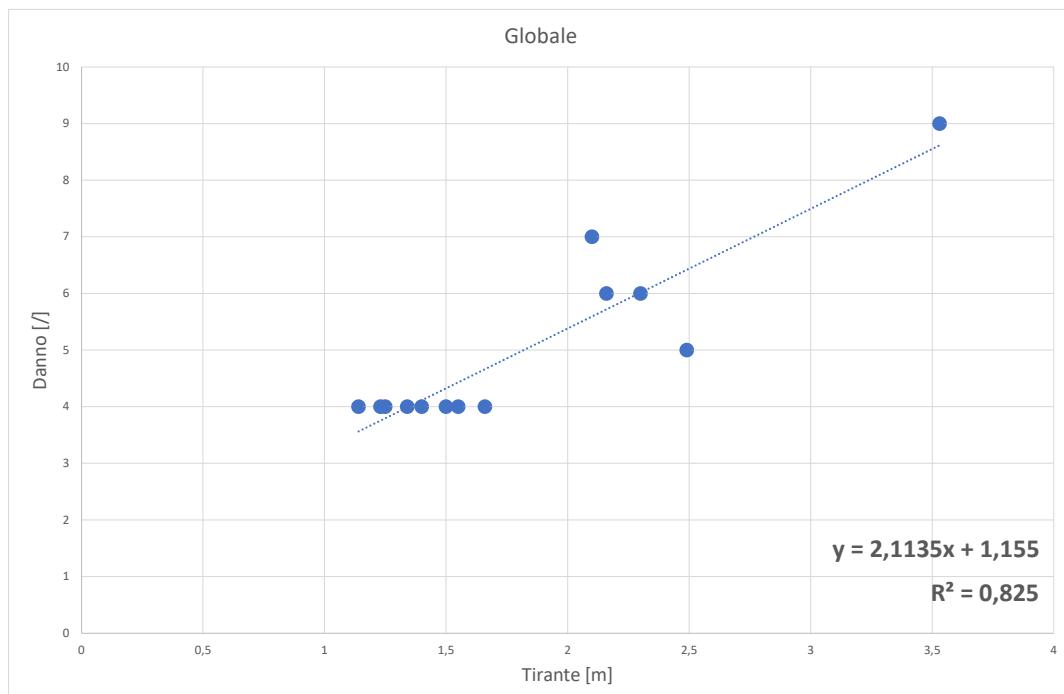


Figura 6.2: Relazione funzionale danno - tirante globale

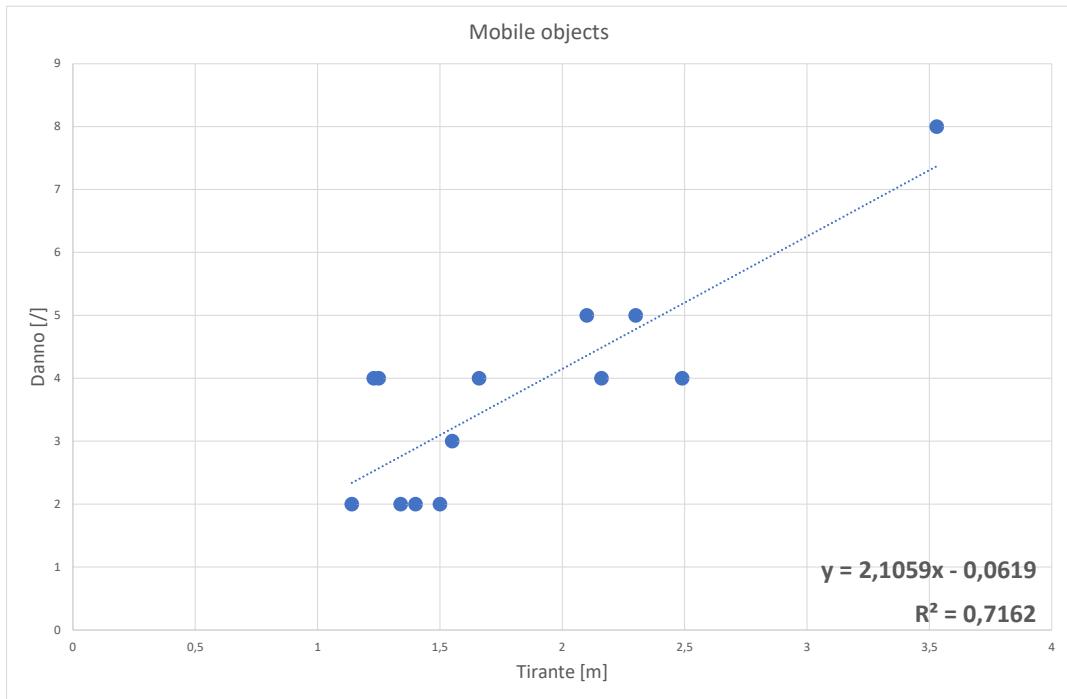


Figura 6.3: Relazione funzionale danno - tirante per la categoria "oggetti mobili"

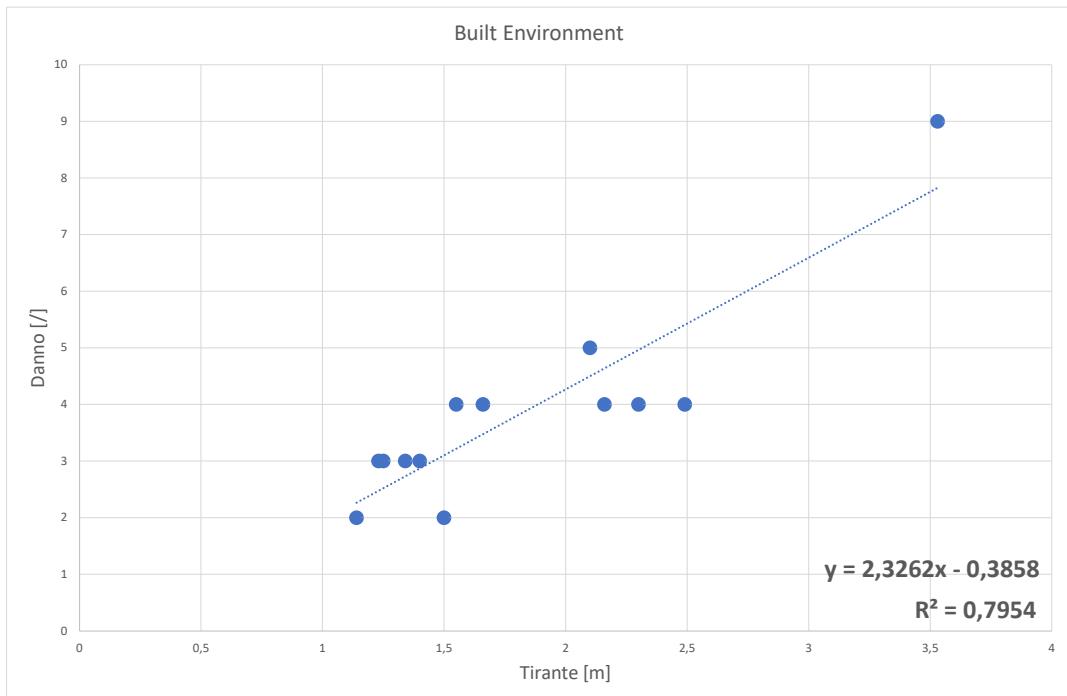


Figura 6.4: Relazione funzionale danno - tirante per la categoria "amb. costruito"

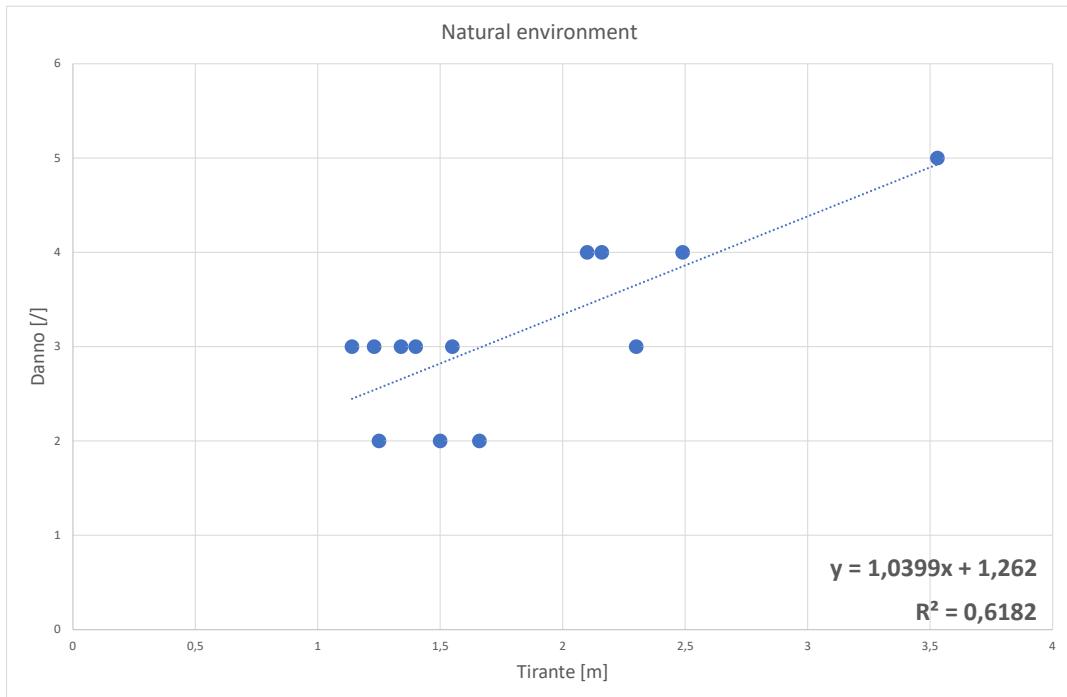


Figura 6.5: Relazione funzionale danno - tirante per la categoria "amb. naturale"

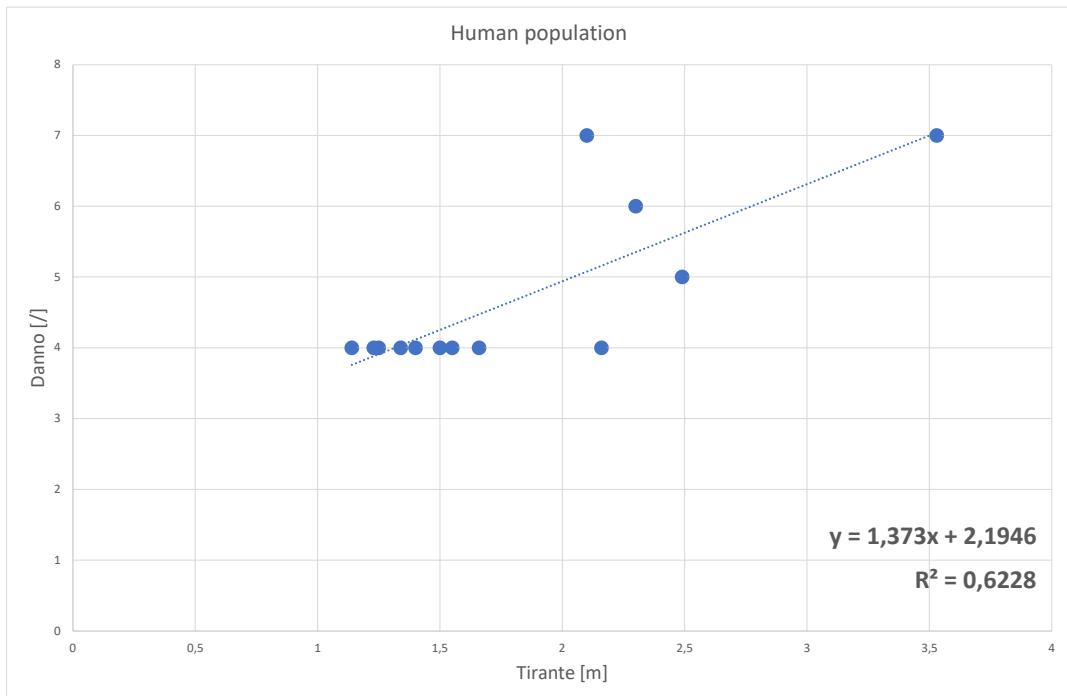


Figura 6.6: Relazione funzionale danno - tirante per la categoria "popolazione"

Sulla base delle relazioni empiriche ricavate per regressione lineare precedentemente, ed interrogando i raster delle simulazioni di allagamento, si riportano le comparazioni tirante - danno in conformità a quanto fatto precedentemente 6.1 e le mappe di danno ottenute per gli scenari di allagamento con tempi di ritorno di 50 e 200 anni.

	Popolazione		Oggetti mobili		Amb. Costruito		Amb. Naturale		Globale	
	Tirante	Danno	Tirante	Danno	Tirante	Danno	Tirante	Danno	Tirante	Danno
Exodus	2,4	5	2,4	5	2,4	5	2,4	4	2,4	6
CeAS	3,4	7	3,4	7	3,4	8	3,4	5	3,4	8
Lambrate	2,21	5	2,21	5	2,21	5	2,21	4	2,21	6
Cim Lamb	2,9	6	2,9	6	2,9	6	2,9	4	2,9	7
Via Friuli	2	5	2	4	2	4	2	3	2	5
Casc Col	2,29	5	2,29	5	2,29	5	2,29	4	2,29	6
Viale Spagna	2,63	6	2,63	5	2,63	6	2,63	4	2,63	7
Cascinazza	3,5	7	3,5	7	3,5	8	3,5	5	3,5	9
Via Occhiate	2,4	5	2,4	5	2,4	5	2,4	4	2,4	6
Stadio Sada	3,8	7	3,8	8	3,8	8	3,8	5	3,8	9
Via Africa	3,2	7	3,2	7	3,2	7	3,2	5	3,2	8
Via Lippi	2,7	6	2,7	6	2,7	6	2,7	4	2,7	7
Depuratore CAP	1,95	5	1,95	4	1,95	4	1,95	3	1,95	5

Figura 6.7: Comparazione danno - tirante per categoria e per posizione, TR50

	Popolazione		Oggetti mobili		Amb. Costruito		Amb. Naturale		Globale	
	Tirante	Danno	Tirante	Danno	Tirante	Danno	Tirante	Danno	Tirante	Danno
Exodus	2,76	6	2,76	6	2,76	6	2,76	4	2,76	7
CeAS	3,3	7	3,3	7	3,3	7	3,3	5	3,3	8
Lambrate	3,8	7	3,8	8	3,8	8	3,8	5	3,8	9
Cim Lamb	3,75	7	3,75	8	3,75	8	3,75	5	3,75	9
Via Friuli	2,42	6	2,42	5	2,42	5	2,42	4	2,42	6
Casc Col	3,23	7	3,23	7	3,23	7	3,23	5	3,23	8
Viale Spagna	3,03	6	3,03	6	3,03	7	3,03	4	3,03	8
Cascinazza	3,85	7	3,85	8	3,85	9	3,85	5	3,85	9
Via Occhiate	2,78	6	2,78	6	2,78	6	2,78	4	2,78	7
Stadio Sada	4,06	8	4,06	8	4,06	9	4,06	5	4,06	10
Via Africa	3,36	7	3,36	7	3,36	7	3,36	5	3,36	8
Via Lippi	3,1	6	3,1	6	3,1	7	3,1	4	3,1	8
Depuratore CAP	2,55	6	2,55	5	2,55	6	2,55	4	2,55	7

Figura 6.8: Comparazione danno - tirante per categoria e per posizione, TR200

6.2 Mappa qualitativa dei danni per TR 50

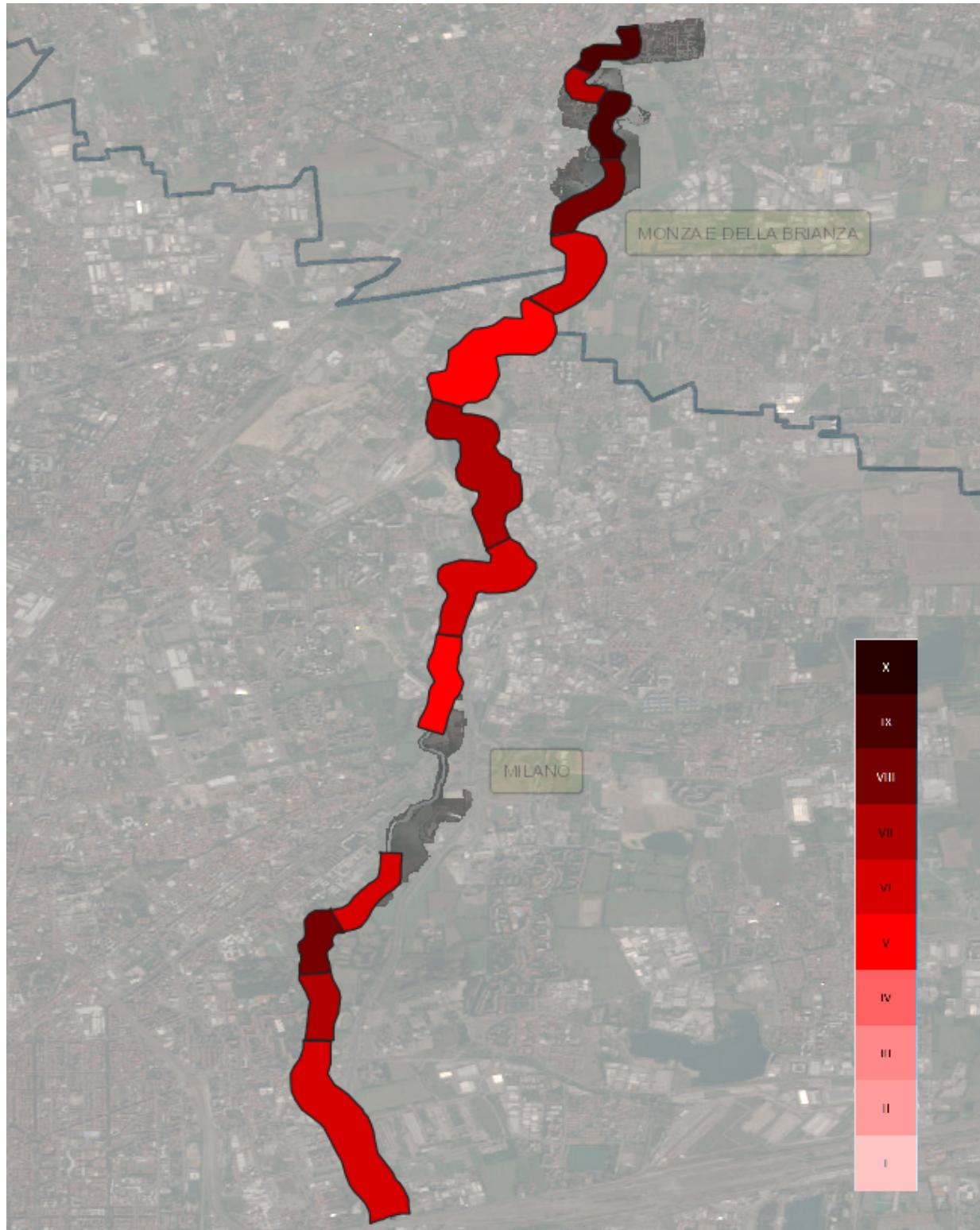


Figura 6.9: Mappa globale di massimo danno per TR50

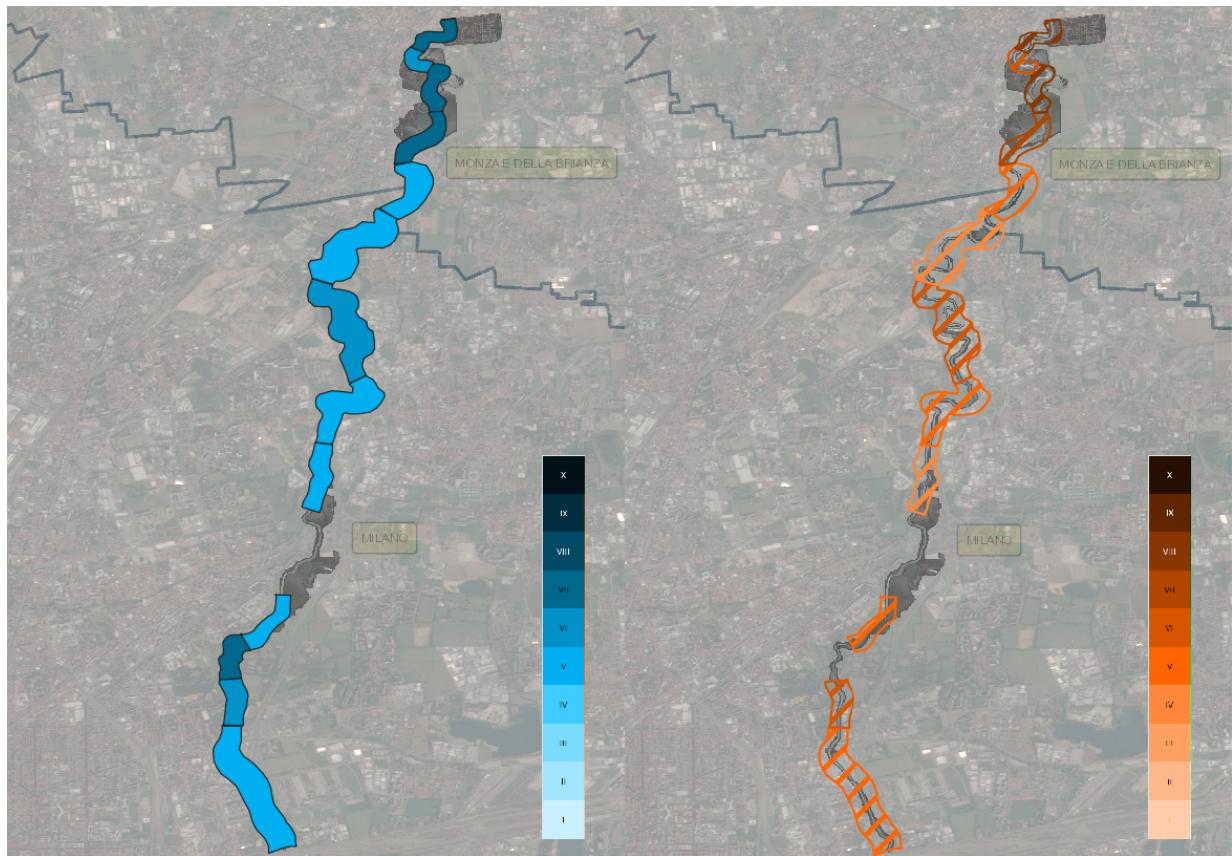


Figura 6.10: Mappa di danni a persone e amb. costruito per TR50

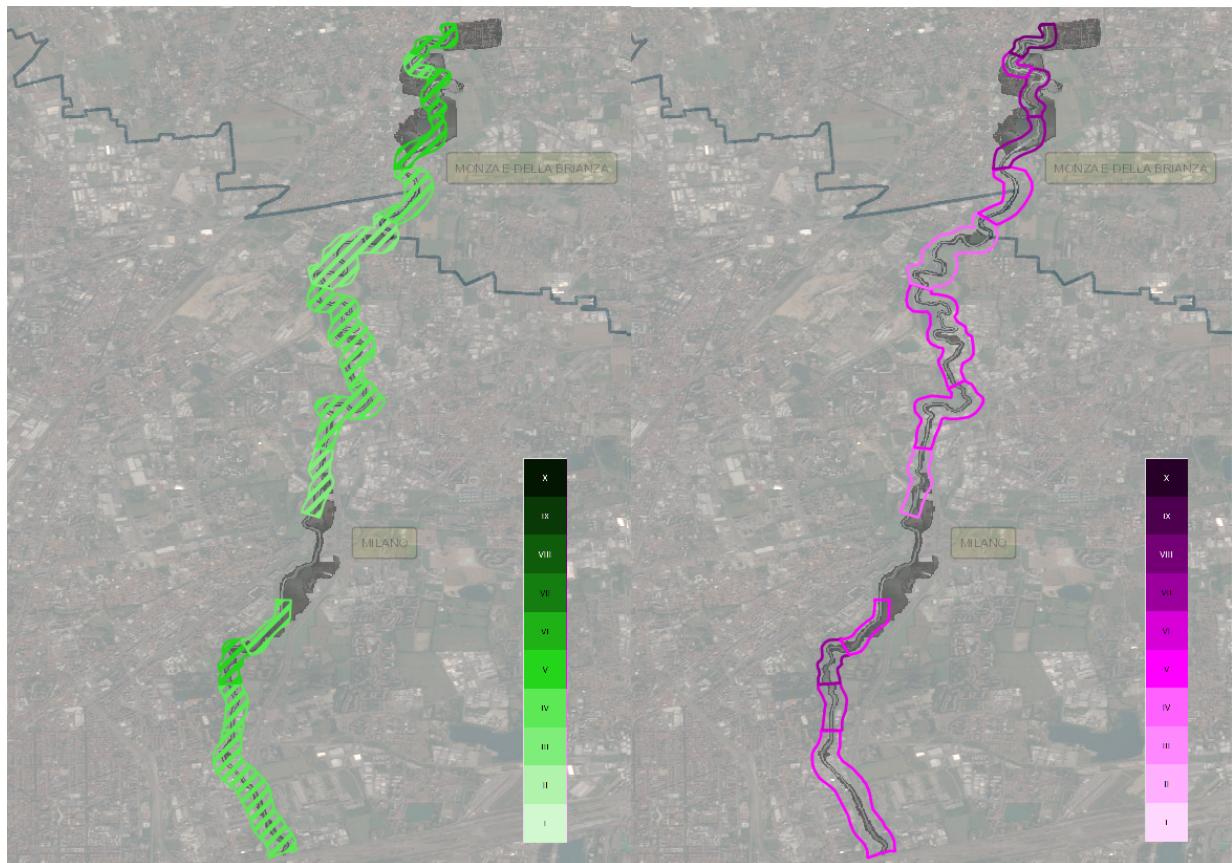


Figura 6.11: Mappa di danni ad amb. naturale e oggetti mobili per TR50

6.3 Mappa qualitativa dei danni per TR 200

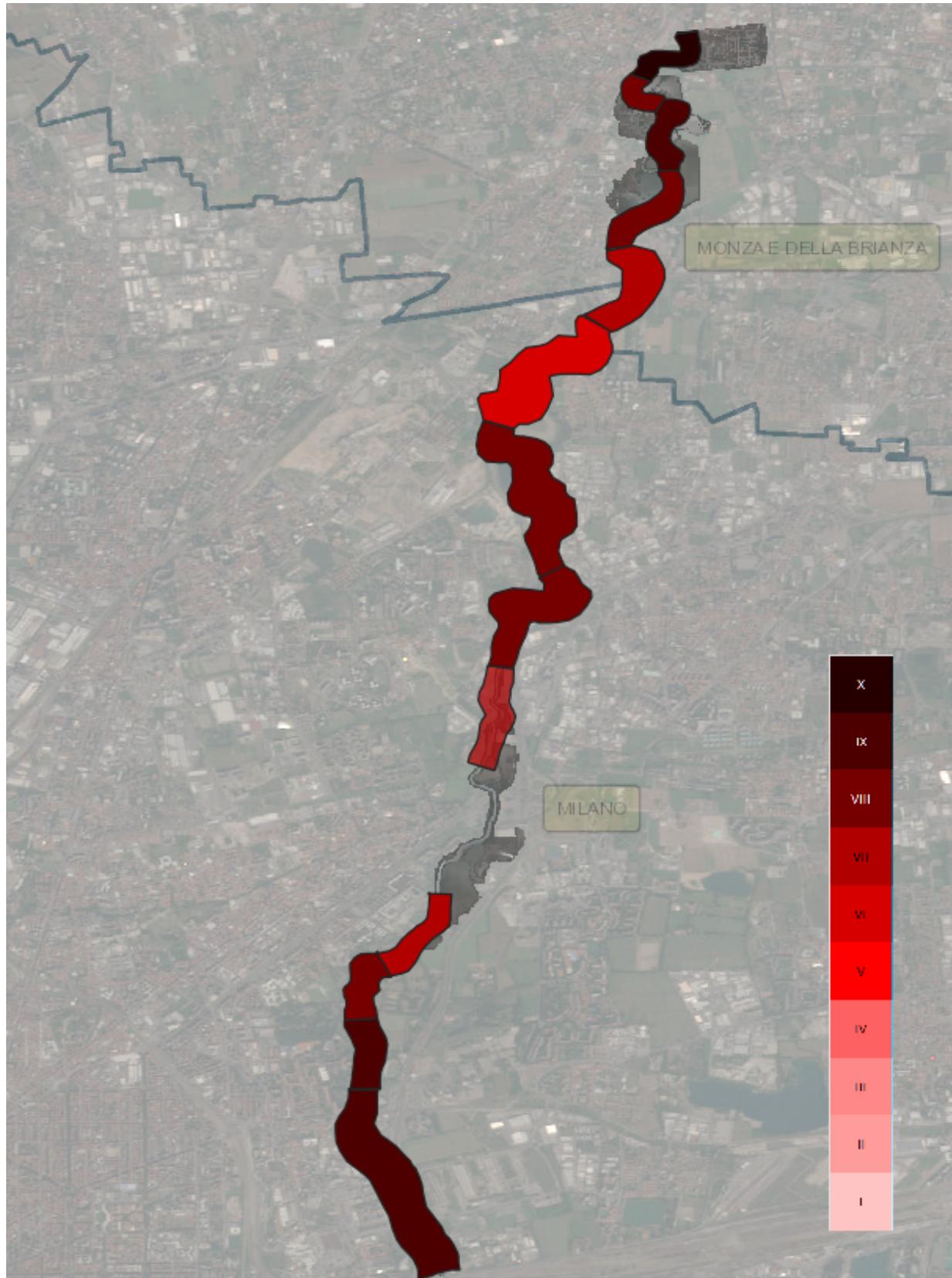


Figura 6.12: Mappa globale di massimo danno per TR200

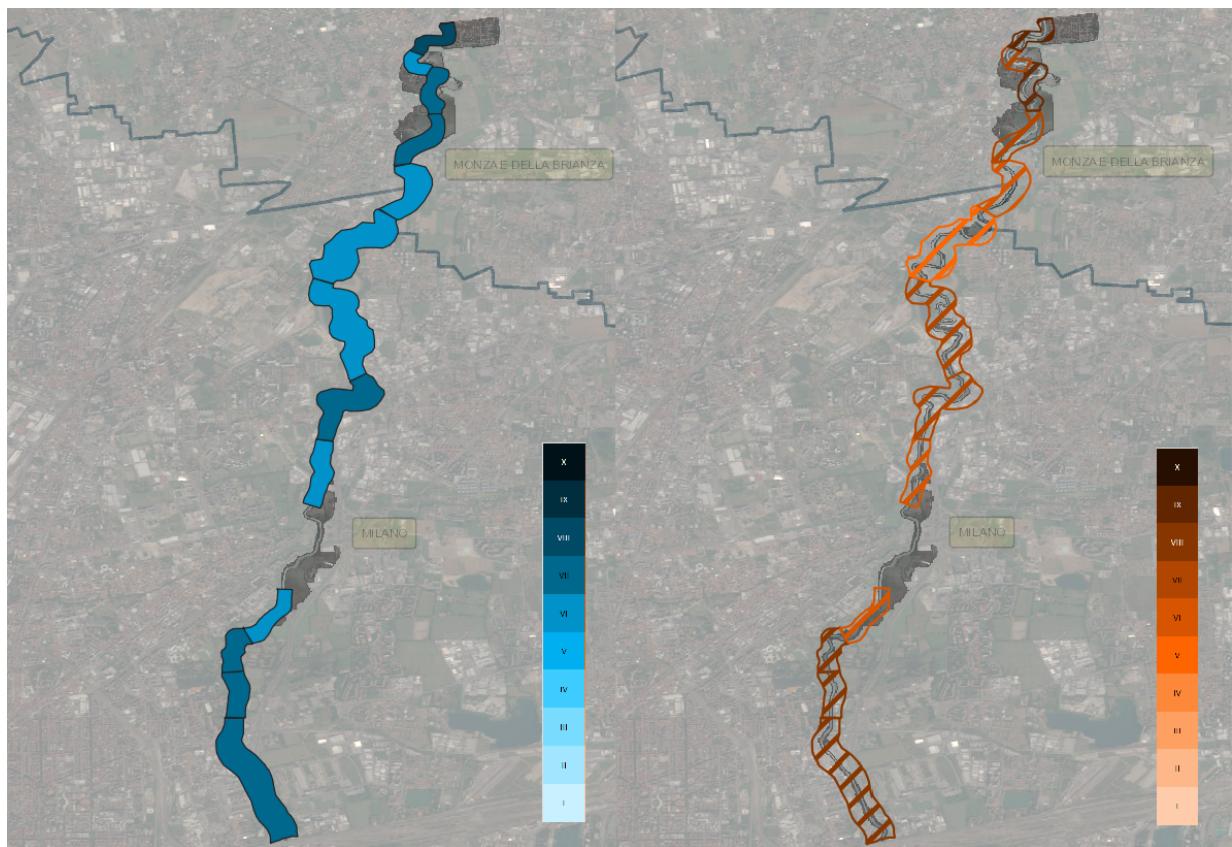


Figura 6.13: Mappa di danni a persone e amb. costruito per TR200

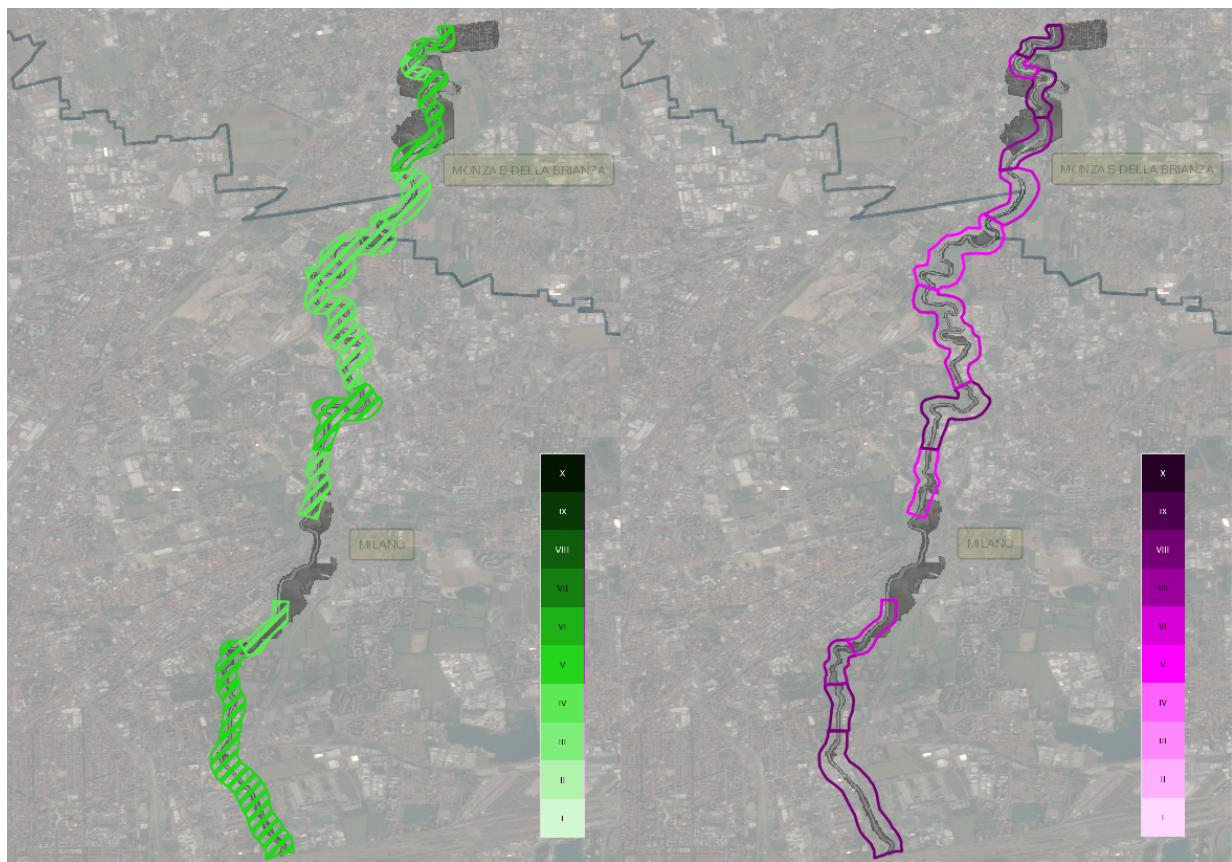


Figura 6.14: Mappa di danni ad amb. naturale e oggetti mobili per TR200

6.4 La classe di esposizione

Successivamente alla costruzione delle mappe qualitative di danno, si è proceduto con la mappatura della classe di esposizione, che, ai sensi del DPCM 29/09/98 - aggiornato al *Dlgs 49/2010* [30], indica gli elementi a rischio, costituiti da persone e cose suscettibili degli effetti nefasti degli eventi calamitosi. Si identificano tipicamente quattro classi, ciascuna associata ad un determinato peso, compreso fra zero ed uno. Di seguito si riporta la classificazione degli elementi a rischio, con relativo peso:

Classe	Elementi a rischio	Peso
E_1	Aree libere da insediamenti e aree improduttive; zona boschiva; zona agricola non edificabile; demanio pubblico non edificato e/o edificabile	0.25
E_2	Aree con limitata presenza di persone; aree extraurbane, poco abitate; edifici sparsi. Zona agricola generica (con possibilità di edificazione); zona di protezione ambientale, rispetto, verde privato; Parchi, verde pubblico non edificato; infrastrutture secondarie	0.50
E_3	Nuclei urbani non densamente popolati; infrastrutture pubbliche (strade statali provinciali e comunali strategiche, ferrovie, lifelines, oleodotti, elettrodotti, acquedotti); aree sedi di significative attività produttive (insediamenti artigianali, industriali, commerciali minori); zone per impianti tecnologici e discariche RSU o inerti, zone a cava	0.75
E_4	Centri urbani ed aree urbanizzate con continuità (densità abitativa superiore al 20% della superficie fondiaria); nuclei rurali minori di particolare pregio; zone di completamento; zone di espansione; grandi insediamenti industriali e commerciali; servizi pubblici prevalentemente con fabbricati di rilevante interesse sociale; infrastrutture pubbliche (infrastrutture viarie principali strategiche); zona discarica speciali o tossico nocivi; zona alberghiera; zona campeggi e villaggi turistici; beni architettonici, storici e artistici	1

Tabella 6.1: Elementi a rischio ai sensi del DPCM 29/09/98

analizzando lo sviluppo del tessuto urbano nel tratto di Lambro considerato, così come quello del tessuto industriale e delle infrastrutture presenti, sono stati attribuiti i pesi di cui prima ai luoghi interessati dall'alluvione del Novembre 2014. Di seguito si riportano i risultati in formato di mappa, in cui i vari pesi vengono indicati con pedici 1, 2, 3, 4 delle rispettive classi di esposizione, a cui sono associati i pesi: 0.25, 0.50, 0.75, 1. Da notare come, dal punto di vista degli elementi esposti, la zona di Lambrate sia particolarmente vulnerabile a causa dell'alta densità abitativa del quartiere. Lo stesso problema, anche se in misura minore, è riscontrato presso San Maurizio al Lambro e immediatamente a Sud di Monza, ove vi è un non trascurabile numero di abitazioni

condominiali a ridosso delle sponde del fiume. Diametralmente opposte le condizioni del Parco Lambro - che pur ospitando la *CEaS* e la Fondazione Exodus è complessivamente poco edificato, e dell'area a Nord di San Maurizio al Lambro, così come anche l'area della *Cascinazza* vicino Monza, ove l'ambiente prevalentemente rurale garantisce una riduzione complessiva del rischio locale.



Figura 6.15: Mappa degli elementi a rischio inondazione lungo il Lambro urbano

6.5 Il rischio idraulico

Infine, rispettando la definizione di *rischio idraulico* fornita nei precedenti capitoli 3.2, è stato calcolato quest'ultimo per l'area geografica sotto indagine. A tal fine sono state utilizzate le estensioni delle simulazioni di allagamento per TR50, TR200 gentilmente fornite dalle Prof.sse Petaccia, Persi di UniPV, i pesi di danneggiamento (convertiti in valori percentuali, *e.g.*: 9 convertito in 90%) qualitativo globale per ciascun luogo e le classi di esposizione descritte nella sezione precedente. Di seguito si riporta la classificazione del rischio idrologico-idraulico secondo il DPCM 29/09/98:

Rischio idraulico totale	Classe	Intensità	Valore	Descrizione degli effetti
R_1	Moderata		≤ 0.002	danni sociali, economici e al patrimonio ambientale marginali
R_2	Media		≤ 0.005	sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità del personale, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche
R_3	Elevata		≤ 0.01	sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socio-economiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale
R_4	Molto elevata		≤ 0.02	sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione delle attività socio-economiche

Tabella 6.2: Classi di rischio idrologico-idraulico ai sensi del DPCM 29/09/98

si riporta altresì la mappa del rischio idraulico ottenuta secondo il procedimento descritto.

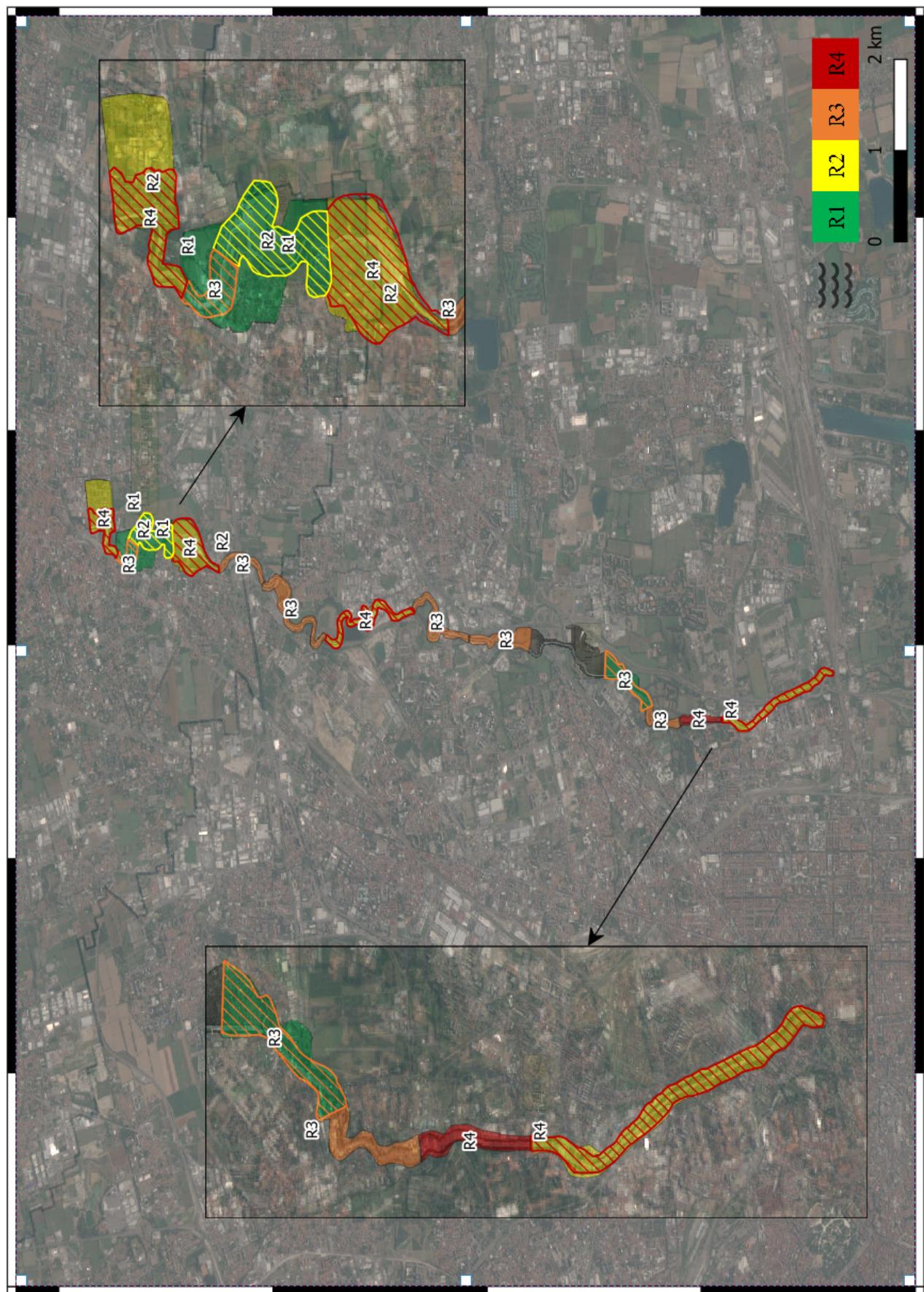


Figura 6.16: Mappa del rischio idraulico sul Lambro urbano, qui il PDF originale

Considerazioni conclusive

Alla luce dei risultati, è opportuno fare alcune riflessioni circa la rappresentazione 6.16 del rischio idraulico proposta.

In primo luogo, la soggettività intrinseca del processo che ha portato alla costruzione delle mappe di questa tesi impone cautela nel loro utilizzo, esse infatti non possono essere adoperate in maniera acritica e meccanica, né tantomeno questo lavoro è accompagnato dalla presunzione di poter offrire uno strumento completamente affidabile per determinare il rischio idraulico, vista appunto la arbitrarietà sostanziale con cui le mappe di danno sono state realizzate. Allo stesso tempo però, a partire dalle stesse mappe di danno prodotte, è stato possibile pervenire alla rappresentazione grafica delle potenziali conseguenze che le inondazioni sortirebbero lungo il Lambro urbano, in conformità con lo spirito di fondo del suddetto lavoro, ossia tentando di migliorare la leggibilità del pericolo, scaturito da una alluvione, che in linea generale metterebbe a rischio l'incolumità delle persone e comprometterebbe il funzionamento e/o stabilità delle infrastrutture.

Analizzando i risultati 6.16, è significativa la differenza fra le aree allagate, e dunque equivalentemente fra le aree soggette a rischio, con periodo di ritorno di 50 e 200 anni soprattutto a Sud di Monza e a Nord del Parco Lambro, ovvero nelle aree con alta urbanizzazione, e quindi con un'alta percentuale di superfici asfaltate, a causa di cui la ritenzione del suolo è pressoché nulla e dunque la produzione di deflusso superficiale, a parità di portata inondante, è ben maggiore, così come l'allagamento è ben più esteso. Di contro, nelle - rare - aree verdi che separano i centri urbani fra Monza e San Donato Milanese, a causa di una maggiore capacità di ritenzione del suolo la differenza di estensione dell'allagamento, fra un evento estremo con tempo di ritorno di 50 e 200 anni, è molto modesta, e secondo le stime delle simulazioni *ORSADEM* del tutto trascurabile.

Durante questo lavoro di tesi è stato utilizzato esclusivamente il tirante idrico come variabile indipendente delle funzioni sperimentali di danneggiamento tematico, evitando cioè di introdurre anche la dipendenza di queste dal campo delle velocità, in quanto l'unico modo disponibile per ricostruire il medesimo sarebbe stato partendo dalle simulazioni numeriche, che però non sono state considerate sufficientemente realistiche. Si rimanda dunque ad ulteriori analisi in condizioni di disponibilità di misurazioni dirette di velocità della corrente al fine di legare tale parametro, assieme al livello idrico, ai danni provocati.

In conclusione, pur riconoscendo l'oggettività e la maggior cautela nel non approfondire il grado di danneggiamento potenziale provocato da un'alluvione, fissando deliberatamente la vulnerabilità pari al valore unitario ovunque, ottenendo di conseguenza le tipiche mappe del rischio idraulico, d'altro canto è evidente l'importanza dell'approfondimento di cui prima se si vuole avvicinare la popolazione al tema delle alluvioni e delle loro conseguenze distruttive.

Ringraziamenti

Al Professor Bocchiola.

Alla mia famiglia.

Ad Antonietta.

Ai miei amici.

Ogni specificazione sarebbe limitante e riduttiva. Grazie.

Sitografia

- ◊ Quando il Lambro allagò il canile di via Aquila. "Colpa dei lavori lungo l'argine" - Cronaca (ilgiorno.it)
- ◊ Esondazione Lambro: situazione drammatica in via Corelli (z3xmi.it)
- ◊ Maltempo: a Milano il fango travolge sede Exodus, evacuati ragazzi (adnkronos.com)
- ◊ Allagamento centro ambrosiano (milano.corriere.it)
- ◊ Alluvione Milano: chiusi gli svincoli della tangenziale est (meteoweb.eu)
- ◊ ESONDATI SEVESO E LAMBRO / Allerta meteo in Lombardia, Milano sott'acqua: centinaia di uomini e mezzi al lavoro (oggi 16 novembre 2014) (ilsussidiario.net)
- ◊ Esondazione Lambro | Cimitero Lambrate allagato Milano (milanotoday.it)
- ◊ Allegato C -Soccorso alla popolazione e prima emergenza - OCDPC 226.xlsx (regione.lombardia.it)
- ◊ Milano in tilt: esondano Seveso e Lambro, chiuse scuole nella zona 9 - Corriere.it
- ◊ Monza, due anni dopo la grande alluvione: ieri e oggi
- ◊ Sesto San Giovanni: rischio esondazione Lambro (milanotoday.it)
- ◊ Alluvione in Brianza, situazione critica: fiumi esondati, tanti sfollati (meteoweb.eu)
- ◊ Martesana maltempo aggiornamenti allerta lambro. Strade chiuse. Blackout in diverse città. Cernusco allagata. - Fuori dal Comune
- ◊ Lambro | Esondazione | Allagamenti | Monza (monzatoday.it)
- ◊ Maltempo, esonda il Lambro: famiglie sfollate a Biassono, scuole chiuse ad Arcore - Cronaca (ilgiorno.it)
- ◊ Strade chiuse | Monza | Lambro | Allagamenti | 5 novembre 2014 (monzatoday.it)
- ◊ Il Lambro fa paura: Brugherio resta con il fiato sospeso - MBNews
- ◊ Monza allagata: è stato di allerta per il Lambro, si va verso criticità elevata - MBNews
- ◊ Lambro | Vie allagate | Monza (monzatoday.it)
- ◊ Emergenza Lambro, Monza fa i conti: danni per 5,7 milioni di euro - MBNews
- ◊ Milano in tilt: esondano Seveso e Lambro, chiuse scuole nella zona 9 - Corriere.it
- ◊ Associazione Nazionale Carabinieri - 168° Nucleo Sesto San Giovanni
- ◊ Esondazione del Lambro. Danni ingenti alla Cascina Ambrosiana
- ◊ *NASA - Earth Data: Open Access for Open Science*
- ◊ Noibrugherio - anno XII - n. 40 - sabato 22 novembre 2014
- ◊ ORSADEM - UNIPV

Bibliografia

- [1] R. Renzo, “Previsione e percezione del rischio alluvionale: i numeri non bastano,” *ilfattoquotidiano.it*, 5 2021.
- [2] M. Diakakis, G. Deligiannakis, Z. Antoniadis, M. Melaki, N. K. Katsetsiadou, E. Andreadakis, N. I. Spyrou, and M. Gogou, “Proposal of a flash flood impact severity scale for the classification and mapping of flash flood impacts,” *Journal of Hydrology*, vol. 590, 11 2020.
- [3] R. Renzo, “Smart flood risk management policies - florimap proposal,” 2016.
- [4] I. S. per la Protezione e la Ricerca Ambientale, “Dissesto idrogeologico in italia,” 2018.
- [5] ISPRA, “Popolazione a rischio alluvione,” 2018.
- [6] S. N. per la Protezione dell’Ambiente, “Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici, edizione 2021,” 2021.
- [7] R. Renzo, “Mappatura dell’indice di assorbimento e del massimo volume specifico di ritenzione potenziale del terreno,” *ARPA Lombardia*, 2004.
- [8] C. M. di Milano, “Dall’analisi delle vulnerabilità climatiche alle misure di adattamento con soluzione naturalistiche,” 2020.
- [9] C. comunale di Milano, “Quadro di riferimento territoriale e ambientale,” 2019.
- [10] R. Renzo, *Manuale di Protezione Idraulica del Territorio - Ristampa*. Independently published, ii ed., 2018.
- [11] M. dei lavori pubblici e Ministero dell’ambiente, “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo,” 1989.
- [12] M. dell’Ambiente, “Decreto legislativo 49/2010 - aggiornamento 2014,” 2014.
- [13] G. Petaccia and E. Natale, “Orsadem: A one-dimensional shallow water code for flood inundation modelling,” *Irrigation and Drainage*, vol. 62, pp. 29–40, 12 2013.
- [14] P. R. Ranzi, “Smart flood risk management policies – (florimap),” 2017.

- [15] B. Daniele, G. Mattia, and R. Renzo, “Revisione del metodo vapi.”
- [16] G. N. P. la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, “Progetto vapi,” 2001.
- [17] N. Rosa and G. Germana, “Scala mercalli ingv,” *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*.
- [18] U. degli Studi di Ferrara, “Sismologia e rischio sismico,” 2018.
- [19] R. Lombardia, “Regione lombardia: Portale istituzionale,” 2018.
- [20] A. di Bacino del Po, “Linee generali di assetto idraulico e idrogeologico.”
- [21] C. M. Lombardo, “16 novembre - tra un’alluvione e l’altra,” 11 2014.
- [22] Google, “Google earth pro.”
- [23] E. S. Agency, “Sentinel-1 product definition,” 3 2016.
- [24] A. Lombardia, “Arpa lombardia - meteorologia.”
- [25] P. P. a rischio da frana e da inondazione in Italia, “Una storia di alluvioni in italia (1951-2018).”
- [26] Inarsind, “Alluvioni e inondazioni in italia.”
- [27] A. Lombardia, “Area download del portale idrologico geografico di arpa lombardia.”
- [28] P. Fassi, A. Cucchi, and I. Valsecchi, “Quaderni tecnici del centro funzionale-soglie idrometriche,” 2008.
- [29] A. I. per il fiume Po, “Geoportale aipo.”
- [30] M. D. della tutela del territorio e del mare, “Dlgs 49/2010,”