POLITECNICO DI MILANO

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

La modellazione della rete di trasporto stradale a supporto della gestione del rischio alluvionale

Anno Accademico 2018/2019

Relatore: Prof.ssa Daniela Molinari

Correlatore: Dott. Guido Minucci

Elaborato di laurea di:

Marco Frattari, 872021

"Tutti sanno che è più necessaria la prevenzione della cura,

ma pochi premiano gli atti di prevenzione."

NASSIM NICHOLAS TALEB

Abstract

La direttiva europea sulle alluvioni (Direttiva 2007/60/CE) indica "la valutazione delle potenziali conseguenze negative associate a diversi scenari di alluvione" come "una base preziosa per la definizione delle priorità e di ulteriori aspetti tecnici, finanziari e politici utili a prendere decisioni riguardanti la gestione del rischio di alluvione". Nonostante ciò, ad oggi gli strumenti di valutazione del danno sono ancora inadeguati a questo scopo.
In questo contesto il presente lavoro mira ad investigare i danni indiretti generati dall'allagamento, ovvero dall'interruzione, delle infrastrutture di trasporto stradale in seguito ad un'alluvione, valutando la risposta della rete in condizioni di scenario ordinario e in condizioni di scenari alluvionali.
Utilizzando come caso studio il Comune di Lodi, in un primo momento si individuano gli strumenti adatti per supportare la gestione dell'emergenza da rischio alluvione; nello specifico, attraverso lo sviluppo di un modello di trasporto locale si dimostra come sia possibile (i) ottimizzare la fase di evacuazione della città e (ii) prevedere le ripercussioni dell'interruzione della rete sulla funzionalità dei servizi critici per l'emergenza, nell'ottica di ridurre i danni diretti e indiretti in caso di evento.
Successivamente, estendendo l'analisi al caso studio della Provincia di Lodi mediante l'uso di un modello di trasporto regionale, si introduce una metodologia di stima per i danni indiretti valutando gli effetti e il danno sistemico che si verrebbero a creare in uno scenario alluvionale in seguito a possibili interruzioni stradali.
Gli strumenti sviluppati hanno come obiettivo quello di contribuire ad un modesto avanzamento dello stato dell'arte sulla valutazione dei danni alluvionali, in grado di poter supportare le decisioni politiche da intraprendere sia nella pianificazione e nella gestione dell'emergenza, sia nella mitigazione del rischio idraulico.

Parole Chiave: rischio idraulico, alluvioni, danni indiretti, infrastrutture di trasporto, rete stradale, modello di trasporto, servizi critici, pianificazione, gestione dell'emergenza

Abstract (English)

The European Floods Directive (Directive 2007/60 / EC) defines "the assessment of potential negative consequences associated with different flood scenarios" as "a valuable basis for defining priorities and additional technical, financial and political aspects to take decisions regarding flood risk management ".
Despite this, to date, damage assessment tools are still inadequate for this purpose.
In this context, the present work aims to investigate the indirect damage caused by flooding, and consequent interruption, of road transport infrastructures in case of flood, evaluating the response of the road network under ordinary scenario conditions and under flood scenarios.
By using as a case study the Municipality of Lodi, first the appropriate tools to support the management of emergency phase are identified. In particular, through the development of a local transport model, it is demonstrated how it is possible (i) to optimize the evacuation phase of the city and (ii) to predict the impact of the network interruptions on the functionality of the critical emergency services, with a view to reducing direct and indirect damage in case of flood.
Subsequently, extending the analysis to the case study of the Province of Lodi with a regional transport model, a methodology for the estimation of indirect damages is introduced, by assessing the effects and systemic damage that would be created in an alluvial scenario, following possible road interruptions.
The tools developed aim to contribute to a modest advancement of the state of the art on the assessment of flood damage, which is able to support the political decisions to be taken both in the planning and management of the emergency and in the mitigation of the flood risk.

Keywords: flood risk, indirect damage, transport infrastructure, road network, transport model, critical services, planning, emergency management

Sommario

1 Introduzione 12
1.1 Il Rischio Idraulico e il danno alluvionale 13
1.1.1 Il danno alluvionale indiretto alla rete stradale 18
1.2 Strumenti normativi per la gestione del rischio 19
1.2.1 Direttiva Alluvioni in Europa e in Italia 19
1.2.2 D.Lgs. 2/01/2018, n. 224 – "Codice della Protezione Civile" 22
1.2.3 Confronto degli strumenti normativi 27
2 Danni alla rete nella pianificazione di emergenza 29
2.1 Caratterizzazione dell'area 31
2.1.1 Infrastrutture di trasporto: rete viaria 33
2.2 Gestione dell'emergenza: i tempi di evacuazione 35
2.2.1 Mappe di pericolosità 35
2.2.2 Modello di traffico 39
2.2.3 Punti di origine e destinazione 47
2.2.4 Individuazione percorsi di evacuazione e zone di evacuazione 50
2.2.5 Tempi di evacuazione 53
2.3 Gestione dell'emergenza: Service Area 60
2.4 Conclusioni preliminari 64
3 Danni alla rete nella pianificazione territoriale 66
3.1 Caratterizzazione dell'area 70
3.2 Mappe di Pericolosità del PGRA 71
3.3 Rete Stradale: Modello di traffico i-TraM 72
3.3.1. Mappe di Esposizione degli archi 78
3.3.2. Vulnerabilità degli archi stradali – analisi dei flussi veicolari 81
3.4 Aree Rilevanti: analisi dei cluster 82
3.4.1. Individuazione degli edifici residenziali, strategici e rilevanti 82
3.4.2. Analisi dei cluster: l'Hot Spot Analysis 89
3.4.3. Mappe degli Hot Spot 90
3.5. Mappe dei ponti compatibili 93
3.6. Criteri di scelta e ipotesi per le simulazioni 94
3.6.1. Ipotesi di Scenario 1 95
3.6.2. Ipotesi di Scenario 2 98

3.6.3. Ipotesi di Scenario 3 101
3.7. Risultati 104
3.7.1. Analisi qualitativa 105
3.7.2. Analisi quantitativa 109
3.8. Conclusioni preliminari 115
4 Conclusioni e discussione dei risultati 118
Bibliografia 123
APPENDICE 126
Analisi dei Cluster 126

Lista delle Figure

Figura 1.1 - Frequenza degli eventi calamitosi in base al tipo di disastro: confronto 2017 con il decennio 2007-2016 (CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2018) .. 14
Figura 1.2 - Numero di persone coinvolte (milioni) in base al tipo di disastro: confronto 2017 con il decennio 2007-2016 (CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2018) 15
Figura 1.3 - Perdite economiche (miliardi $) in base al tipo di disastro: confronto 2017 con il decennio 2007-2016 (CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2018) .. 15
Figura 1.4 - Attività di Prevenzione Non Strutturale e di Prevenzione Strutturale 24
Figura 1.5 - Organizzazione del Servizio Nazionale: Componenti, Strutture Operative e Soggetti Concorrenti 25
Figura 2.1 - Comune di Lodi: ricostruzione del reticolo idrografico a partire dal DB RIRU - Reticolo Idrografico Regionale Unificato (fonte: Regione Lombardia) 31
Figura 2.2 - Classificazione della rete stradale comunale (fonte: PUM 2009 di Lodi); in blu sono rappresentate le strade extraurbane che collegano Lodi al resto della provincia, in verde scuro le strade urbane della viabilità principale e in verde chiaro le strade urbane della viabilità secondaria 34
Figura 2.3 - Team dei Vigili del Fuoco con barche di soccorso (a sinistra). Viale Dalmazia allagata (a destra) 34
Figura 2.4 - Schema di flusso della metodologia utilizzata per la stima dei tempi di evacuazione per una miglior gestione dell'emergenza alluvionale 37
Figura 2.5 - Idrogrammi sintetici per differenti T_R utilizzati in input al Modello idraulico 2D (Gattai, 2019) 38
Figura 2.6 - Mappe di Pericolosità in termini di profondità dei tiranti idrici. Scenario più raro TR=500 anni con difese strutturali in destra idraulica (Gattai, 2019) 39
Figura 2.7 - Grafo orientato composto da archi e nodi interconnessi tra loro 40
Figura 2.8 - Rete stradale: classificazione degli archi per zone extraurbane e urbane 43
Figura 2.9 - Curva Velocità - Tiranti idrici (Pregnolato, et al., 2017) 45
Figura 2.10 - Discretizzazione della curva Velocità - Tiranti idrici utilizzata dal modello 46
Figura 2.11 - Definizione dell'unità minima utilizzata nelle mappe di esposizione (Legnani, 2012) 47
Figura 2.12 - A sinistra è stata mappata l'esposizione delle famiglie mentre a destra è stata mappata l'esposizione dei veicoli 48
Figura 2.13 - Parcheggi di emergenza da utilizzare in caso di alluvione 49
Figura 2.14 - Zone di evacuazione omogeneizzate per destinazione prossima 51
Figura 2.15 - Sistema di percorsi di evacuazione in Sinistra Idrografica 52
Figura 2.16 - Sistema di percorsi di evacuazione in Destra Idrografica 52
Figura 2.17 - Sequenza temporale (timeline) per l'evacuazione di un'area soggetta ad alluvioni (Molinari, 2012/2013) 53
Figura 2.18 – Distribuzione di probabilità cumulate di tipo Warning Time (Lindell, et al., 2007) 56
Figura 2.19 – Distribuzione di probabilità cumulata di tipo Response Time (Lindell, et al., 2007) 57
Figura 2.20 – Distribuzione di probabilità cumulata di tipo TGT ottenuto considerando un allertamento di tipo multiple sources e un tempo di risposta di tipo residents/work 57

Figura 2.21 - Service Area Ospedale Lodi - a) Condizione Ordinaria 100% Vmax; b) Condizione Ordinaria 80% Vmax; c) Condizione Alluvione 100% Vmax; d) Condizione Alluvione 80% Vmax 62
Figura 3.1 - Schema di flusso della metodologia utilizzata per la stima dei danni indiretti alle infrastrutture di trasporto 69
Figura 3.2 - Mappe di Pericolosità presenti nel PGRA del distretto idrografico Padano (PGRA - d.p.c.m. 27/10/16) 72
Figura 3.3 - Foglio campione descrittivo del tipo di arco stradale. Esempio di strada a disturbo locale medio (Beria, et al., 2017) 76
Figura 3.4 - Archi stradali inclusi nell'area di studio 78
Figura 3.5 - Mappa di Esposizione degli archi stradali 79
Figura 3.6 - Mappa di esposizione dei flussi veicolari statisticamente significativi 82
Figura 3.7 - Edifici appartenenti all'Area Residenziale 85
Figura 3.8 - Edifici appartenenti all'Area Servizi 85
Figura 3.9 - Edifici appartenenti all'Area Istruzione (a sinistra). Edifici appartenenti all'Area Industriale - Commerciale (a destra) 86
Figura 3.10 - Screenshot della Strategia di Ricerca utilizzata per estrarre informazioni dal DB AIDA 87
Figura 3.11 - Schema delle procedure per l'analisi dei cluster 89
Figura 3.12 - Mappa degli hot spot dell'Area Residenziale (a sinistra); Mappa degli hot spot dell'Area Servizi (a destra). 91
Figura 3.13 - Mappa degli Hot Spot dell'Area Istruzione (a sinistra); Mappa degli Hot Spot dell'Area Industriale - Commerciale 92
Figura 3.14 - Mappa dei Ponti che rispettano la compatibilità idraulica 94
Figura 3.15 - Ipotesi di Scenario 1: archi significativi e archi non significativi 98
Figura 3.16 - Ipotesi di Scenario 2: archi significativi e archi non significativi 101
Figura 3.17 - Ipotesi di Scenario 3: archi significativi e archi non significativi 104
Figura 3.18 - Scenario SDF: flussogramma 105
Figura 3.19 - Esempi di flussogrammi delle simulazioni a, bacino Adda - Lambro 106
Figura 3.20 - Esempi di flussogrammi delle simulazioni b, bacino Adda 107
Figura 3.21 - Esempi di flussogrammi delle simulazioni c, bacino Lambro 107
Figura 3.22 - Esempi di flussogrammi delle simulazioni d, bacino Po 108
Figura 3.23 - Costo giornaliero dell'interruzione rappresentante il danno indiretto generato, considerando la distinzione fra veicoli leggeri e pesanti 113
Figura 3.24 – Differenze fra la stima dei costi con i veicoli equivalenti fra la stima dei costi distinguendo i veicoli leggeri da quelli pesanti. 114

Lista delle Tabelle

Tabella 1.1 - Autorità competenti, componenti e tipologia di evento emergenziale 24
Tabella 2.1 - Comune di Lodi: ricostruzione del reticolo idrografico a partire dal DB RIRU - Reticolo Idrografico Regionale Unificato (fonte: Regione Lombardia) 32
Tabella 2.2 - Limiti di velocità e portate di servizio per tipo di strada 43
Tabella 2.3 - Velocità media attribuita per tipo di strada sulla base di dati statistici 44
Tabella 2.4 - Limiti di velocità assegnati in condizioni di alluvione in base alla profondità del tirante idrico h 46
Tabella 2.5 - Risultati dell'analisi di esposizione 48
Tabella 2.6 - Fonti dei dati fondamentali per la stima dei tempi di evacuazione 50
Tabella 2.7 - Divisione delle zone in macro aree 51
Tabella 2.8 - Stima del tempo di evacuazione: risultati in termini di ore per la città di Lodi 58
Tabella 2.9 - Livelli idrometrici al Ponte Napoleone Bonaparte per istanti temporali utili all'evacuazione (Scenario più raro T=500 anni con difese strutturali in destra idrografica) 59
Tabella 2.10 - Riduzione VMT e ETE ipotizzando casi con modalità di allertamento differenti 59
Tabella 2.11 - Indirizzo dei servizi critici in base alle fonti di Protezione Civile di Lodi 60
Tabella 2.12 - Dimensioni Service Area per tipologia di servizio critico nelle due condizioni di scenario; Analisi di sensitività $\alpha_{SPEED,SOS}$; Differenze Service Area rappresentanti le riduzioni di accessibilità in seguito ad un'alluvione 63
Tabella 3.1 - Tipi di classe delle rete stradali - Modello i - TraM (Beria et al. 2017) 74
Tabella 3.2 - Principali attributi dello shapefile rete - Modello i – TraM (Beria, et al., 2017) ... 75
Tabella 3.3 - Tipizzazione degli archi in base al livello di disturbo locale al deflusso automobilistico 75
Tabella 3.4 - Corrispondenza delle categorie di arco stradale con il Codice della Strada Italiano 77
Tabella 3.5 - Esposizione degli archi negli ambiti territoriali RP e RSP 79
Tabella 3.6 - Esposizione degli archi in base alla tipizzazione della rete (attributo TipoArco) .. 80
Tabella 3.7 - Statistiche descrittive dei soli archi esposti al pericolo di alluvione 81
Tabella 3.8 - Statistiche descrittive dei soli archi esposti al pericolo di alluvione su cui insistono ponti 81
Tabella 3.9 - Elenco degli edifici strategici e rilevanti differenziati per destinazione d'uso (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2014) 83
Tabella 3.10 - Classificazione Aree Rilevanti e Edifici utilizzata in input 84
Tabella 3.11 - Lista delle Fonti dei DB utilizzati 86
Tabella 3.12 - Procedure analisi dei cluster: reportistica di output per tipologia di Area Rilevante 90
Tabella 3.13 - Ipotesi di Scenario 1: criteri di scelta e Indice di significatività I 96
Tabella 3.14 - Ipotesi di Scenario 1: archi significativi per ambito territoriale e per bacino 97
Tabella 3.15 - Ipotesi di Scenario 1: simulazioni calcolate per bacino 97
Tabella 3.16 - Ipotesi di Scenario 2: criteri di scelta e Indice di significatività I 99
Tabella 3.17 - Ipotesi di Scenario 2: archi significativi per ambito territoriale e per bacino 100
Tabella 3.18 - Ipotesi di Scenario 2: simulazioni calcolate per bacino 100
Tabella 3.19 - Ipotesi di Scenario 3: criteri di scelta e Indice di significatività I 102
Tabella 3.20 - Ipotesi di Scenario 3: archi significativi per ambito territoriale e per bacino 103
Tabella 3.21 - Ipotesi di Scenario 3: simulazioni calcolate per bacino 103

Tabella 3.22 - Range Ordini di grandezza dei flussogrammi per classe di strada..... 106
Tabella 3.23 - Indicatori di viaggio - veicoli equivalenti 110
Tabella 3.24 - Indicatori di viaggio - veicoli leggeri e pesanti..... 110
Tabella 3.25 - Differenze degli indicatori di viaggio fra la Simulazione di Scenario N-esima e lo Scenario SDF - veicoli equivalenti..... 111
Tabella 3.26 - Differenze degli indicatori di viaggio fra la Simulazione di Scenario N-esima e lo Scenario SDF - veicoli leggeri e pesanti 111
Tabella 3.27 - Costi parametrici utilizzati per valutare le variazioni degli indicatori di viaggio 111
Tabella 3.28 - Esempi di valori del tempo per i passeggeri e le merci per motivi del viaggio . 112
Tabella 3.29 - Stima dei danni indiretti causati dall'interruzione di archi stradali a seguito di un'alluvione. In verde la differenza fra veicoli leggeri e pesanti; in arancio quelli invece considerando i veicoli equivalenti..... 112
Tabella 3.30 - Risultati delle variazioni dei volumi delle Autostrade e il mancato guadagno giornaliero 115
Tabella 3.31 - Mancato guadagno giornaliero delle autostrade considerando i veicoli leggeri e pesanti. 115

Capitolo 1
Introduzione

La valutazione delle potenziali conseguenze negative associate a diversi scenari di rischio di alluvione è essenziale per individuare adeguate strategie di mitigazione del rischio. Infatti, una dettagliata analisi del rischio in termini di pericolosità, esposizione e vulnerabilità, permette di valutare al meglio le priorità di intervento e gli ulteriori aspetti, tecnici e finanziari, utili a definire le decisioni politiche da prendere.
I benefici che si ottengono da una buona gestione del rischio di alluvione vengono misurati in base all'impatto evitato o ridotto che le inondazioni future possono avere su gli elementi esposti.
L'incertezza legata alla probabilità di accadimento di un futuro evento alluvionale e la scarsa disponibilità di dati aggregati e utili all'analisi del rischio, rendono la stima di tali benefici poco accurata.
E' necessario dunque definire e aggiornare gli strumenti di valutazione del danno di alluvione, in maniera che considerino non soltanto i danni diretti ma nel contempo anche i danni indiretti i quali, ad oggi, sono poco investigati e quindi non considerati all'interno di analisi costi – benefici.
Questo lavoro si propone di porre l'attenzione proprio sui danni indiretti e come la conoscenza di questi possa essere utile per la gestione del rischio alluvionale.
In particolare, si è scelto di analizzare i danni indiretti causati dal danno diretto alle infrastrutture di trasporto modellando la rete di trasporto stradale.
La definizione delle potenziali conseguenze alle infrastrutture, non tanto in termini di danno fisico diretto ma piuttosto in un'ottica investigativa dei danni indiretti e dei danni sistemici, rappresenta il cuore di questa ricerca che, attraverso l'analisi di due casi studio di differente scala, ha come obiettivo quello di suggerire elementi e strumenti in grado di supportare le decisioni per la gestione del rischio, sia dal punto di vista della pianificazione e gestione dell'emergenza che dal punto di vista della mitigazione del rischio alluvionale.
Nel Capitolo 1, successivamente a questa breve introduzione, si definisce il rischio idraulico e il danno alluvionale alla rete stradale, oltre a fornire un quadro normativo in merito alla gestione di tale rischio in termini sia di pianificazione e gestione dell'emergenza che di pianificazione territoriale, al fine di fornire informazioni e definizioni utili all'obiettivo di ricerca.
Nel Capitolo 2 si pone l'attenzione sulle fasi di emergenza. In particolare, vengono analizzati gli effetti dell'alluvione sulla rete stradale e gli impatti che essi possono avere

su una comunità a livello locale, attraverso lo studio dei percorsi sicuri per l'evacuazione e dell'accessibilità ai servizi critici per l'emergenza stessa, prendendo come spunto il caso studio del Comune di Lodi.
Nel Capitolo 3, invece, si pone l'attenzione sulla stima del danno indiretto dovuto all'interruzione di alcuni tratti della rete stradale, conducendo un'analisi su scala provinciale. Partendo dal caso studio della Provincia di Lodi viene presentata la metodologia di stima e di valutazione del danno indiretto fino a tradurre tale stima in una quantificazione monetaria, che potrebbe essere considerata in future Analisi Costi – Benefici (CBA) al fine di supportare politiche di mitigazione a livello di bacino.
Infine, nel Capitolo 4 vengono discusse le conclusioni dei due casi, evidenziando i risultati ottenuti attraverso affinità, differenze ed approfondimenti futuri di indagine.

1.1 Il Rischio Idraulico e il danno alluvionale

Le alluvioni sono fenomeni naturali che dipendono dalle condizioni meteorologiche, dalla conformazione geologica-morfologica e dalle caratteristiche idrografiche del territorio.
Nei contratti di assicurazione, l'allagamento è definito come una "copertura temporanea del terreno da parte dell'acqua, a causa delle acque superficiali che sfuggono dai loro normali confini o come risultato di forti precipitazioni" (Kron, 2005).

Tra i tipi di alluvione, oltre a quelle causate dalle mareggiate (*storm surges*) distinguiamo le esondazioni fluviali e le alluvioni dovute a condizioni meteorologiche avverse.
Le esondazioni fluviali (*river flood*) sono il risultato di piogge che precipitano su una vasta area del bacino fluviale con una certa intensità e con una durata di giorni o addirittura settimane. A causa di tali piogge, il terreno si satura completamente e viene superata la capacità del suolo di immagazzinare l'acqua, con conseguenti aumenti del deflusso superficiale e quindi delle portate fluviali, finché la capacità portante dell'alveo viene superata e si verificano inondazioni. Tali inondazioni si accumulano gradualmente, anche se a volte, a seconda della risposta del bacino, possono verificarsi in un tempo molto più breve (*flash flood*).
Le alluvioni improvvise (*pluvial flood*), spesso sono la causa di esondazioni fluviali, ma, a differenza delle precedenti, per lo più sono eventi locali di difficile collocazione spazio – temporale. Tali inondazioni sono prodotte da intense piogge su un piccola area. Il terreno di solito non è saturo, ma il tasso di infiltrazione è molto più basso del tasso di precipitazione, generando così deflussi superficiali che ristagnano in aree pianeggianti, dove la pendenza del terreno è troppo piccola per consentire il deflusso immediato dell'acqua piovana. L'acqua si accumula così in superficie, nelle depressioni che a volte non sono nemmeno visibile o in altre zone più basse come sottopassaggi stradali, garage sotterranei e scantinati. Sebbene le alluvioni improvvise si verificano in genere in un'area relativamente piccola e durano solo poche ore, queste hanno un incredibile potenziale di distruzione.
Talvolta, le cause delle inondazioni possono essere attribuite al comportamento antropico. La progressiva urbanizzazione e la conseguente impermeabilizzazione del terreno, infatti, incrementano il ruscellamento superficiale mentre la mancata pulizia e manutenzione dei

corsi d'acqua favorisce l'accumulo di detriti e di vegetazione ostacolando l'ordinario deflusso idrico.

La periodicità degli eventi alluvionali, i cambiamenti climatici, lo sviluppo economico, la crescita della popolazione e la tendenza globale verso la vita nelle aree urbane, fanno sì che il rischio idraulico sia un argomento non solo di attualità ma, soprattutto, di importanza per il futuro.
Secondo gli studiosi, infatti, (Kendon, et al., 2012) (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014), il cambiamento climatico dovrebbe aumentare, in molte parti del mondo, la frequenza e l'intensità degli eventi di pioggia convettiva. Inoltre, la concentrazione di attività economiche e insediamenti in aree a rischio, a causa della drammatica crescita della popolazione mondiale (Kron, 1999) e della mancanza di una pianificazione territoriale adeguata, rappresenta non solo un aumento dell'esposizione ma anche della vulnerabilità al rischio idraulico (Poljanšek, et al., 2017).
Di conseguenza ci si aspetta che l'impatto delle inondazioni urbane possa aumentare, come è confermato dal trend osservabile nelle seguenti figure.
In Fig. 1.1, sono stati riassunti gli eventi calamitosi avvenuti nel 2017 e quelli avvenuti nel precedente decennio 2007-2016, in base alle tipologia di disastri. Dal loro confronto, risulta che solo nel 2017 si sono registrati il 94,6% degli eventi calamitosi registrati nel precedente decennio, in particolare il 77,8% per i disastri idrologici (*Flood*) e il 129,5% per i disastri meteorologici (*Storm*).

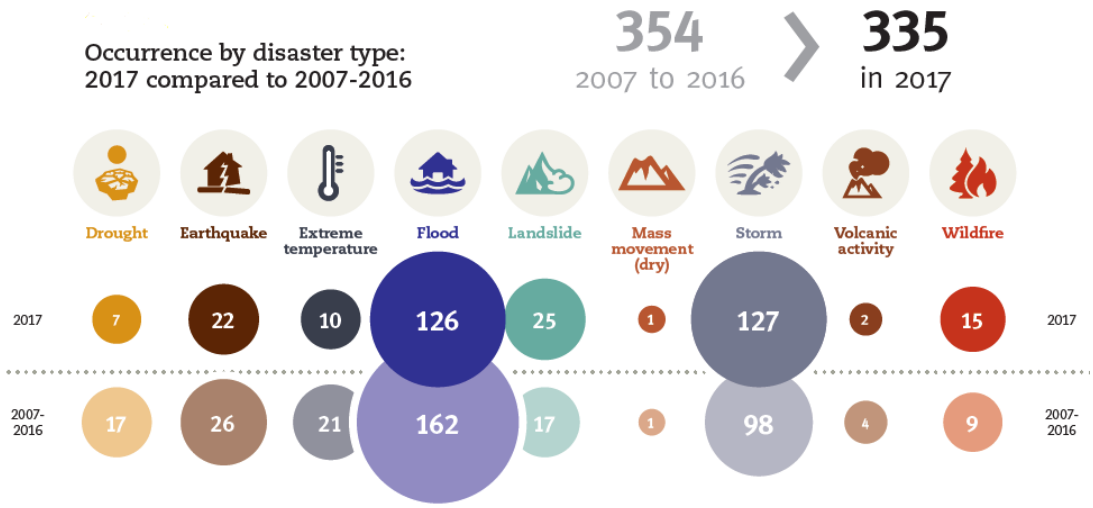


Figura 1.1 - Frequenza degli eventi calamitosi in base al tipo di disastro: confronto 2017 con il decennio 2007-2016 (CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2018)

I disastri idrologici, insieme a quelli meteorologici, causano significanti impatti socio-economici in tutto il mondo (Poljanšek, et al., 2017).
In Fig. 1.2 sono riportati infatti gli impatti umani in termini di persone coinvolte (feriti, senzatetto e coinvolti). Dal confronto fra il 2017 e il precedente decennio 2007-2016, considerando l'insieme degli eventi calamitosi, risulta che solo nel 2017 si sono registrate il 45,7% di persone coinvolte; considerando invece i soli disastri idrologici e i soli danni

meteorologici, solo nel 2017 si sono registrati rispettivamente il 64,7% e il 75,8% delle persone coinvolte nel decennio 2007-2016.

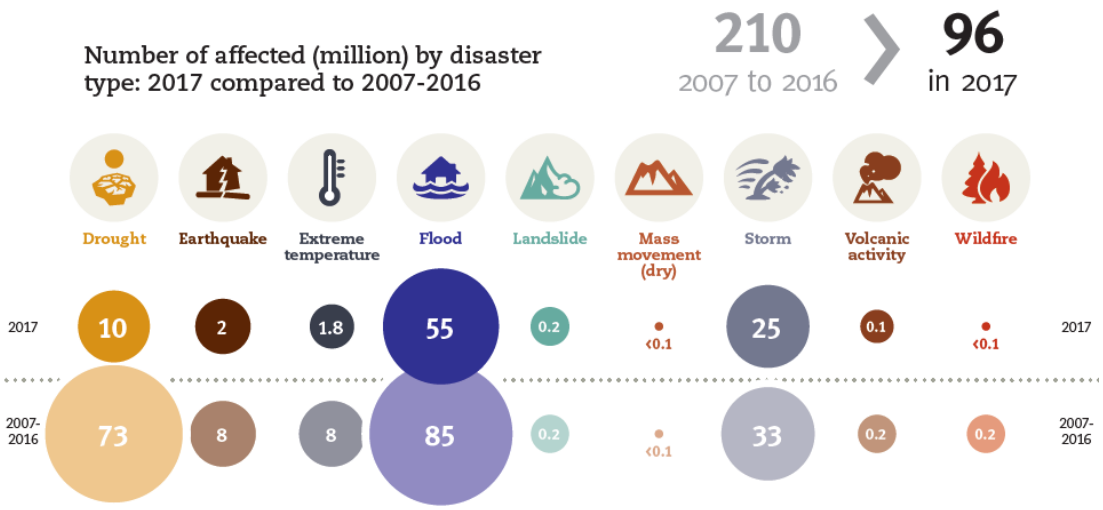


Figura 1.2 - Numero di persone coinvolte (milioni) in base al tipo di disastro: confronto 2017 con il decennio 2007-2016 (CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2018)

Infine, in Fig. 1.3, sono riportati gli impatti economici in termini di miliardi di dollari persi. Nel 2017 si sono persi il 135,2% di miliardi di dollari in più rispetto al precedente decennio considerando l'insieme degli eventi calamitosi, mentre per i soli disastri idrologici nel 2017 si è registrata una perdita del 55,3% di miliardi di dollari rispetto al decennio 2007-2016. Nel 2017, considerando invece i soli disastri meteorologici, si sono persi il 530% di miliardi di dollari in più rispetto al decennio precedente.

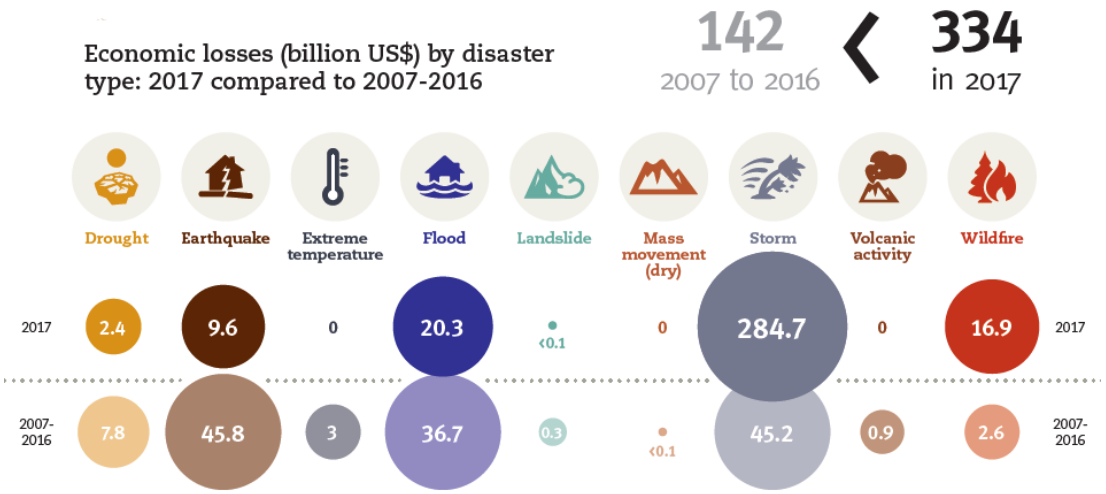


Figura 1.3 - Perdite economiche (miliardi $) in base al tipo di disastro: confronto 2017 con il decennio 2007-2016 (CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2018)

Osservando la storia delle alluvioni negli ultimi cinquant'anni circa, in Italia ci sono stati eventi che più di altri sono rimasti nella memoria comune, per aspetti diversi.

Fra queste, ricordiamo l'alluvione che colpì Firenze nel 1966 il cui impatto emotivo, suscitato dai danni provocati dall'alluvione al patrimonio artistico e culturale, fece scattare una mobilitazione generale, le alluvioni del Tanaro nel 1994 e del Po nel 2000, con le migliaia di sfollati e le immagini di strade interrotte, ponti crollati, abitazioni e aziende sommerse.
In Italia ci sono 32.960 km^2 di aree a pericolosità idraulica (il 10,9 % del territorio italiano), di cui 4.598,8 km^2 solo in Lombardia (19,3 % del territorio lombardo) e 276,1 km^2 solo nella Provincia di Lodi (35,3 % del territorio provinciale lodigiano) (fonte: Dati ISPRA).
Considerando invece la popolazione residente in aree a pericolosità idraulica, in Italia ci sono 9.341.533 abitanti (il 15,7 % della popolazione italiana), di cui solo 1.279.076 in Lombardia (13,2 % della popolazione lombarda) e solo 26.327 nella Provincia di Lodi (11,8 % della popolazione provinciale lodigiana) (fonte: Dati ISPRA e Dati ISTAT 2011 per la popolazione).
Considerando le statistiche delle alluvioni passate, dal 1968 al 2017 tutte le 20 Regioni di Italia sono state colpite almeno una volta da alluvioni, e solo nel 2018 le Regioni colpite da queste catastrofi sono state 11 (55 % delle Regioni italiane) (fonte: Dati CNR IRPI).
Essendo dunque il rischio alluvionale un problema globale, occorre capirne le cause, valutarne le conseguenze e individuare strategie per la riduzione del rischio stesso.

Il concetto di rischio viene inteso in maniera differente da persone diverse. Da un punto di vista scientifico, si concorda ampiamente che il rischio R è definito come il danno atteso su base annuale, calcolabile come l'integrale delle conseguenze negative D che si registrano in un determinato evento espresse in base ad una certa probabilità di accadimento p delle stesse condizioni negative.

$$R = \int D(p)dp = f(H, E, V)$$

Le conseguenze negative D, rappresentano quindi il danno che i valori esposti possono subire in relazione ad un evento pericoloso.
Dove non ci sono persone o valori che possono essere influenzati da un fenomeno naturale, non vi è alcun rischio, mentre un disastro può verificarsi solo quando le persone, i loro beni e il patrimonio culturale, urbanistico e ambientale comune vengono danneggiati.
Il danno atteso, è dunque funzione delle tre componenti di rischio seguenti:

- Il Pericolo H: considera la probabilità di accadimento dell'evento naturale catastrofico e la sua intensità (es. l'estensione spazio – temporale, la durata dell'evento di piena, il tirante idrico, la velocità dell'onda di piena, l'accelerazione massima del suolo PGA, l'area di una frana, ecc.);
- L'Esposizione E: considera il valore o i valori a rischio, come edifici, oggetti, persone, presenti appunto nella zona soggetta al pericolo;
- La Vulnerabilità V: la suscettibilità al danneggiamento.

Con riferimento alle alluvioni, il danno alluvionale può essere definito come l'insieme dei potenziali effetti nocivi causati da un'alluvione nei confronti delle componenti della

società e dell'ambiente (persone, proprietà, infrastrutture, produzione, patrimonio culturale, urbanistico e ambientale) (Galliani, 2017).
I danni alluvionali possono essere classificati (Merz, et al., 2010) in:

- Danni diretti: sono i danni causati dal contatto fisico dell'acqua con persone, proprietà o qualsiasi altro oggetto.
- Danni indiretti: sono i danni indotti da un impatto diretto e consistono nei danni che, a livello spazio – temporale, si verificano al di fuori dell'area dell'evento alluvionale con ripercussioni prolungate anche nel tempo.

Entrambi questi tipi di danni possono essere ulteriormente classificati (Parker, et al., 1987) (Smith, et al., 1998) in:

- Danni tangibili: sono quei danni diretti o indiretti che possono essere tradotti in termini monetari;
- Danni intangibili: rappresentano quei danni diretti o indiretti che invece non possono essere valutati in termini monetari.

Sebbene ci sia consenso sul come possono essere definiti i danni diretti, i quali possono essere valutati attraverso dei modelli di danno basati su parametri di pericolosità, esposizione e vulnerabilità (Merz, et al., 2010), lo stesso non si può dire dei danni indiretti.
La stima dei danni indiretti infatti, è meno semplice in quanto, come sostengono alcuni, sono in realtà dei "costi nascosti" che ad oggi non si è in grado di stimarli in modo soddisfacente, ed è per questo che non vengono considerati nelle stime di danno, in cui compaiono solo i danni diretti. Per questo motivo ad oggi non sappiamo se i danni indiretti possano essere maggiori o minori dei danni diretti.
Tra i danni indiretti sono inclusi, ad esempio, le interruzioni lavorative dell'attività industriali e commerciali con conseguenze negative sui mercati e sulle condizioni dei lavoratori con il rischio di indennizzi per disoccupazioni (Molinari, et al., 2014).
La stima dei danni diretti e indiretti è funzione della scala spaziale. In genere, vengono distinte tre scale spaziali (Merz, et al., 2010):

- Macro – scala: viene utilizzata per il calcolo del danno su aree di elevate dimensioni, in genere unità amministrative come regioni, nazioni, comuni.
- Meso – scala: utilizza per unità più piccole basate sull'aggregazione spaziale di informazioni come l'uso del suolo (aree residenziali o industriali)
- Micro – scala: utilizzata per una valutazione del rischio al singolo bene (edificio, infrastruttura)

La scelta della scala spaziale del danno da investigare dipende dal livello di gestione e mitigazione del rischio.
Generalmente gli studi correlati all'esigenza di definire politiche nazionali di mitigazione del rischio sono condotti utilizzando un approccio alla macro scala. Di contro per supportare le politiche a livello regionale viene utilizzato un approccio alla meso – scala mentre per la definizione di misure di protezione ai singoli beni si utilizza la micro – scala (FLOODsite, 2017).

1.1.1 Il danno alluvionale indiretto alla rete stradale

In caso di eventi meteorologici estremi, le infrastrutture di trasporto possono essere danneggiate direttamente o indirettamente, rappresentando una minaccia per la sicurezza umana e provocando gravi disagi e associati impatti economici e sociali (Pregnolato, et al., 2017).
Le reti infrastrutturali, infatti, sono spesso considerate la spina dorsale delle città. Garantire la loro capacità di recupero è diventato un aspetto vitale per governare e gestire una città economicamente vitale e vivibile. In particolare, le reti di trasporto supportano la sicurezza e la ricchezza delle comunità, specialmente nel contesto di un'economia globale che dipende sempre più dalla mobilità di beni, informazioni e persone (Pregnolato, et al., 2017).
Per questo, lo studio di un modello a supporto della previsione del danno atteso alle infrastrutture a rete in caso di alluvione è utile sia ai gestori sia agli entri territoriali preposti alla gestione del rischio alluvionale per la definizione delle strategie di riduzione e mitigazione degli impatti attesi a seguito di un'inondazione (Molinari, et al., 2019).
Le reti stradali di trasporto sono state identificate come particolarmente vulnerabili alle condizioni meteorologiche estreme e ai cambiamenti climatici, poiché le strade sono in genere costituite da materiali impermeabili e quindi particolarmente sensibili alle interruzioni per via di inondazioni dovute a deflussi superficiali (Hooper, et al., 2014).
Questo riduce la loro capacità, sia direttamente come risultato di danni che rendono la strada inutilizzabile o a causa di acque profonde che rendono comunque impraticabile la strada.
Un certo numero di studi ha specificamente esaminato gli impatti delle alluvioni sui trasporti urbani. Questo include il lavoro di Suarez et al. (2005), che ha calcolato che l'aumento delle inondazioni costiere e fluviali avrebbe quasi raddoppiato i ritardi nelle percorrenze e rinunce di viaggio tra il 2000 e il 2100, e il lavoro di Chang et al. (2010), che ha studiato l'impatto di un aumento delle chiusure stradali a seguito di inondazioni fluviali a Portland, in Oregon, presumendo che le strade allagate al di sotto dei 3 – 5 cm, fossero pienamente operative e oltre quella soglia venissero interrotte (Potential impacts of climate change on flood-induced travel disruptions: a case study of Portland, Oregon, USA, 2010) (Penning-Rowsell, et al., 2013).
Sebbene la letteratura dia qualche informazioni riguardo i modelli di danno alle infrastrutture di trasporto, ad oggi sono pochi gli strumenti che permettono di valutare in modo esaustivo le varie tipologie di danno atteso ad una rete al verificarsi di un fenomeno alluvionale, descrivendo in modo completo la vulnerabilità della rete.
Una rete può essere vulnerabili sotto vari punti di vista (Molinari, et al., 2019), come:

- La vulnerabilità fisica, ovvero la propensione a subire danni diretti dovuti al contatto con l'acqua e quindi dal punto di vista fisico.
- La vulnerabilità funzionale, ovvero la propensione a subire danni funzionali o malfunzionamenti.
- La vulnerabilità sistemica, ovvero la propensione a subire danni indiretti a causa delle interconnessioni esistenti tra gli elementi di una stessa rete e/o di altre reti a questa collegata.

L'obiettivo di questo studio è dunque quello di investigare il danno alluvionale alla infrastrutture a rete in particolare alla rete stradale, cercando metodologie e strumenti in grado di valutare la vulnerabilità funzionale e quella sistemica della rete intesa come stima dei danni indiretti causati da interruzioni o perdite di funzionalità delle strade.

1.2 Strumenti normativi per la gestione del rischio

Gli strumenti normativi evidenziano come il rischio alluvionale sia un problema globale che deve essere affrontato con un meccanismo comunitario inteso ad agevolare una cooperazione rafforzata negli interventi di soccorso della Protezione Civile.
Di seguito si riportano i riferimenti normativi salienti che aiutano a comprendere le scelte metodologiche elaborate e utilizzate in questa trattazione:

- Direttiva 2007/60/CE – "Direttiva Alluvioni" e D.Lgs. 23/02/2010, n. 49 – "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni".
- D.Lgs. 2/01/2018, n.224 – "Codice della Protezione Civile".

Attraverso la sintesi dei capi di legge e degli articoli normativi, viene delineata una strategia di gestione del rischio di alluvioni incentrata sulla prevenzione, sulla protezione e sulla preparazione.

1.2.1 Direttiva Alluvioni in Europa e in Italia

La Direttiva 2007/60/CE è composta da 19 articoli, suddivisi in 8 capi:

Capo I.	Disposizioni Generali
Capo II.	Valutazione Preliminare del Rischio di Alluvioni
Capo III.	Mappe della Pericolosità e Mappe del Rischio di Alluvioni
Capo IV.	Piani di gestione del Rischio di Alluvioni
Capo V.	Coordinamento con la Direttiva 2000/60/CE, Informazione e Consultazione del Pubblico
Capo VI.	Misure di Attuazione e Modificazioni
Capo VII.	Misure Transitorie
Capo VIII.	Riesami, Relazioni e Disposizioni Finali

Gli articoli sono preceduti da 25 considerazioni che pongono l'attenzione su:

- Le <u>cause</u> che aumentano la probabilità e gli impatti negativi delle alluvioni, in particolare i cambiamenti climatici e alcune attività umane, come l'urbanizzazione di pianure alluvionali con conseguente diminuzione della permeabilità del suolo e aumento dei deflussi.
- Le <u>conseguenze</u> delle alluvioni, le quali possono provocare vittime, evacuazioni di persone, danni all'ambiente, compromettere gravemente lo sviluppo economico e mettere in pericolo le attività economiche della Comunità.
- L'importanza della <u>riduzione del rischio alluvionale</u>, attraverso piani di gestione pensati con un approccio comunitario degli Stati membri e che prevedano misure

di mitigazione coordinate a livello di bacino idrografico, in base alle condizioni locali e regionali.

Nel Capo I: Disposizioni Generali sono riportati gli scopi della direttiva, le definizioni e le disposizioni riguardanti le autorità competenti, in accordo alla Direttiva 2000/60/CE.
Lo scopo principale della direttiva è instituire un quadro per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni volto a ridurre le conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche connesse con le alluvioni all'interno della Comunità.
Tra le definizioni, oltre quelle riportate nella Direttiva 2000/60/CE, si evidenziano le seguenti:

» Alluvione: l'allagamento temporaneo di aree che abitualmente non sono coperte d'acqua. Ciò include le inondazioni causate da fiumi, torrenti di montagna, corsi d'acqua temporanei mediterranei e le inondazioni marine delle zone costiere e può escludere gli allagamenti causati dagli impianti fognari;
» Rischio di Alluvioni: la combinazione della pericolosità di un evento alluvionale e delle potenziali conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e l'attività economica derivanti da tale evento.

Per ciascun distretto idrografico gli Stati membri svolgono una valutazione preliminare del rischio di alluvioni come descritto nel Capo II. Tale valutazione preliminare volta a valutare rischi potenziali è basata su mappe in scala appropriata del distretto idrografico e su dati disponibili registrati da eventi passati o risultanti da studi idraulici. Avere memoria storica di eventi alluvionali passati è essenziale per valutare le potenziali conseguenze negative di future alluvioni, tenendo anche conto per quanto possibile di elementi quali la topografia, la posizione dei corsi d'acqua e le loro caratteristiche idrologiche e geomorfologiche generali, l'efficacia delle infrastrutture esistenti, la posizione delle zone popolate e delle zone in cui insistono attività economiche.
Le zone individuate dalla valutazione preliminare di rischio di alluvioni devono essere mappate come descritto nel Capo III. In particolare, ogni Stato membro deve produrre due tipi di Mappe:

- Mappe della Pericolosità: contengono la perimetrazione delle aree geografiche che potrebbero essere interessate da alluvioni secondo i seguenti scenari:
  a) Scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi;
  b) Media probabilità di alluvioni (tempo di ritorno probabile ≥ cento anni);
  c) Elevata probabilità di alluvioni, se opportuno.

  Per ciascuno degli scenari suddetti è necessario indicare i seguenti elementi:
  i. Portata della piena;
  ii. Profondità delle acque o, se del caso, livello delle acque;
  iii. Se opportuno, velocità del flusso o flusso d'acqua considerato.
- Mappe del Rischio di Alluvioni: indicano le potenziali conseguenze negative derivanti dalle alluvioni nell'ambito degli scenari descritti precedentemente ed espresse in termini di:
  a) Numero indicativo degli abitanti potenzialmente interessati;
  b) Tipo di attività economiche insistenti sull'area potenzialmente interessata;

c) Impianti di cui all'allegato I della direttiva 96/61/CE del Consiglio, del 24 settembre 1996, sulla prevenzione e la riduzione integrate dell'inquinamento (1), che potrebbero provocare inquinamento accidentale in caso di alluvione e aree protette potenzialmente interessate, individuate nell'allegato IV, paragrafo 1, punti i), iii) e v) della direttiva 2000/60/CE;
d) Altre informazioni considerate utili dagli Stati membri, come l'indicazione delle aree in cui possono verificarsi alluvioni con elevato volume di sedimenti trasportati e colate detritiche e informazioni su altre notevoli fonti di inquinamento.

Sulla base delle mappe appena descritte, gli Stati membri stabiliscono piani di gestione del rischio di alluvioni coordinati a livello di distretto idrografico, per le zone individuate dagli scenari (Capo IV).
I Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni tengono conto degli aspetti pertinenti quali:

- i costi e benefici;
- la portata della piena;
- le vie di deflusso delle acque e le zone con capacità di espansione delle piene come le pianure alluvionali naturali;
- gli obiettivi ambientali della Direttiva 2000/60/CE;
- la gestione del suolo e delle acque;
- la pianificazione del territorio
- l'utilizzo del territorio;
- la conservazione della natura;
- la navigazione e le infrastrutture portuali.

I Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni riguardano tutti gli aspetti della gestione del rischio di alluvioni e in particolare la prevenzione, la protezione e la preparazione, comprese le previsioni di alluvioni e i sistemi di allertamento, e tengono conto delle caratteristiche del bacino idrografico o del sottobacino interessato.
Nel Capo V si rimarca la necessità che la stesura e l'aggiornamento delle Mappe della Pericolosità, delle Mappe del Rischio di Alluvioni e i Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni e devono essere effettuati in coordinamento con la Direttiva Quadro Acque (Direttiva 2000/60/CE). Si rimarca inoltre la Valutazione Preliminare del Rischio di Alluvioni, le Mappe della Pericolosità e del Rischio di Alluvioni e i Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni sono a disposizione del pubblico. Gli Stati membri inoltre, incoraggiano la partecipazione attiva delle parti interessate all'elaborazione, al riesame e all'aggiornamento dei piani.
Infine si sottolineano i contenuti del Capo VIII in cui viene disposto che la Valutazione Preliminare del Rischio Alluvioni, le Mappe della Pericolosità e del Rischio di Alluvioni nonché i Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni devono essere riesaminati ogni sei anni tenendo conto anche del probabile impatto dei cambiamenti climatici sul verificarsi di alluvioni.

Il D.Lgs. n. 49 del 23/02/2010 è stato emanato in Italia come attuazione della Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni.
Tale decreto recepisce e considera tutte le disposizioni della Direttiva 2007/60/CE aggiungendo indirizzi e precisando i riferimenti di legge nazionali, come la Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE che è tradotta nel corrispondente D.Lgs. n.152 3/04/2006.
Si evidenzia come la normativa italiana (D. Lgs. 23/10/2010 n.49) espliciti, in aggiunta alla Direttiva Alluvioni europea, un'attenzione particolare anche al territorio, ai beni e alle attività sociali considerando anche le infrastrutture e le strutture strategiche e rilevanti (autostrade, strade, ferrovie, ospedali, scuole, etc.).

1.2.2 D.Lgs. 2/01/2018, n. 224 – "Codice della Protezione Civile"

La normativa di Protezione Civile è molto vasta e dettagliata per questo si riportano di seguito solo i contenuti inerenti alla trattazione delle tematiche dell'elaborato, riportando definizioni e contenuti utili ed evidenziando i punti di contatto con la Direttiva Alluvioni.
Il D.Lgs. 2/01/2018, n.224 – "Codice della Protezione Civile" è suddiviso in 7 Capi:

- Capo I. Finalità, Attività e Composizione del Servizio Nazionale della Protezione Civile
- Capo II. Organizzazione del Servizio Nazionale della Protezione Civile
  - Sezione I. Eventi di Protezione Civile
  - Sezione II. Organizzazione del Servizio Nazionale della Protezione Civile
  - Sezione III. Strumenti di Coordinamento e Integrazione del Servizio Nazionale della Protezione Civile
- Capo III. Attività per la Previsione e Prevenzione dei Rischi
- Capo IV. Gestione delle Emergenze di Rilievo Nazionale
- Capo V. Partecipazione dei Cittadini e Volontariato Organizzato di Protezione Civile
  - Sezione I. Cittadinanza Attiva e Partecipazione
  - Sezione II. Disciplina della Partecipazione del Volontariato Organizzato alle Attività di Protezione Civile
- Capo VI. Misure e Strumenti Organizzativi e Finanziari per la Realizzazione delle Attività di Protezione Civile
- Capo VII. Norme Transitorie, di Coordinamento e Finali

Nel Capo I viene definito il Servizio Nazionale della Protezione Civile come quel servizio nazionale, di pubblica utilità, che esercita la Funzione di Protezione Civile.
Per Funzione di Protezione Civile si intende l'insieme delle competenze e delle attività volte a tutelare la vita, l'integrità fisica, i beni, gli insediamenti, gli animali e l'ambiente dai danni o dal pericolo di danni derivanti da eventi calamitosi di origine naturale o derivanti dall'attività dell'uomo.
Vengono definite inoltre le seguenti attività di Protezione Civile:

- Previsione: insieme delle attività svolte all'identificazione e allo studio degli scenari di rischio possibili per le esigenze di allertamento del Servizio Nazionale, ove possibile, e di pianificazione di Protezione Civile.

- Prevenzione: insieme delle attività di natura strutturale e non strutturale svolte anche in forma integrata, dirette a evitare o a ridurre la possibilità che si verifichino danni conseguenti a eventi calamitosi
- Gestione dell'emergenza: l'insieme integrato e coordinato delle misure e degli interventi diretti ad assicurare il soccorso e l'assistenza alle popolazioni colpite dagli eventi calamitosi e agli animali e la riduzione del relativo impatto e la relativa attività di informazione.
- Superamento dell'emergenza: attuazione delle misure volte a rimuovere gli ostacoli alla ripresa delle normali condizioni di vita e di lavoro per ripristinare i servizi essenziali e per ridurre il rischio residuo nelle aree colpite dagli eventi calamitosi, oltre alla ricognizione dei fabbisogni per il ripristino delle strutture e delle infrastrutture pubbliche e private danneggiate, nonché dei danni subiti dalle attività economiche e produttive, dai beni culturali e dal patrimonio edilizio.

In Fig. 1.4 sono riportate le attività di prevenzione distinte in prevenzione non strutturale e prevenzione strutturale.
Il Capo I si conclude con la descrizione delle Autorità di Protezione Civile e delle Componenti di Protezione Civile.
La spiegazione di come il Servizio Nazionale è strutturato prosegue nel Capo II con la definizione delle Strutture Operative e dei Soggetti Concorrenti. Si definiscono inoltre le seguenti tipologie di eventi emergenziali:

Tipo A. Emergenze connesse con eventi calamitosi di origine naturale o derivanti dall'attività dell'uomo che possono essere fronteggiati mediante interventi attuabili, dai singoli enti e amministrazioni competenti in via ordinaria;

Tipo B. Emergenze connesse con eventi calamitosi di origine naturale o derivanti dall'attività dell'uomo che per loro natura o estensione comportano l'intervento coordinato di più enti o amministrazioni, e debbono essere fronteggiati con mezzi e poteri straordinari da impiegare durante limitati e predefiniti periodi di tempo, disciplinati dalle Regioni e dalle Province autonome di Trento e di Bolzano nell'esercizio della rispettiva potestà legislativa;

Tipo C. Emergenze di rilievo nazionale connesse con eventi calamitosi di origine naturale o derivanti dall'attività dell'uomo che in ragione della loro intensità o estensione debbono, con immediatezza d'intervento, essere fronteggiate con mezzi e poteri straordinari da impiegare durante limitati e predefiniti periodi di tempo.

In Tab. 1.1 e in Fig. 1.5 sono riportati dei grafici riassuntivi di quanto contenuto in questi due capi di legge.

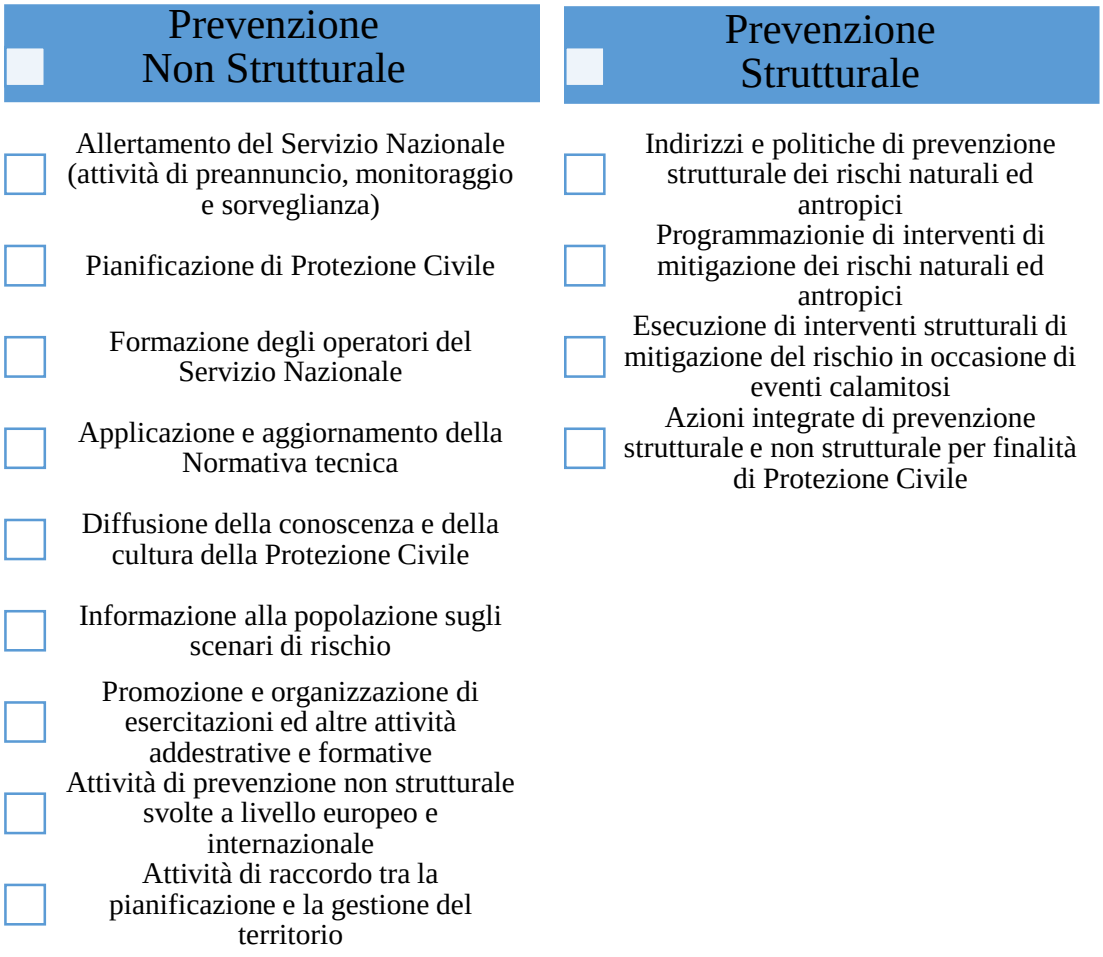


Figura 1.4 - Attività di Prevenzione Non Strutturale e di Prevenzione Strutturale

Autorità Competente di Protezione Civile	**Componente del Servizio Nazionale**	**Tipologia di Evento Emergenziale di competenza**
Presidente del Consiglio dei Ministri	Dipartimento della Protezione Civile	Tipo C
	Prefetture – Uffici Territoriali di Governo	Tipo C e Tipo B
Presidenti delle Regioni e delle Province Autonome di Trento e di Bolzano	Regioni e Province Autonome di Trento e di Bolzano	Tipo B
Sindaci	Città Metropolitane e Comuni	Tipo A

Tabella 1.1 - Autorità competenti, componenti e tipologia di evento emergenziale

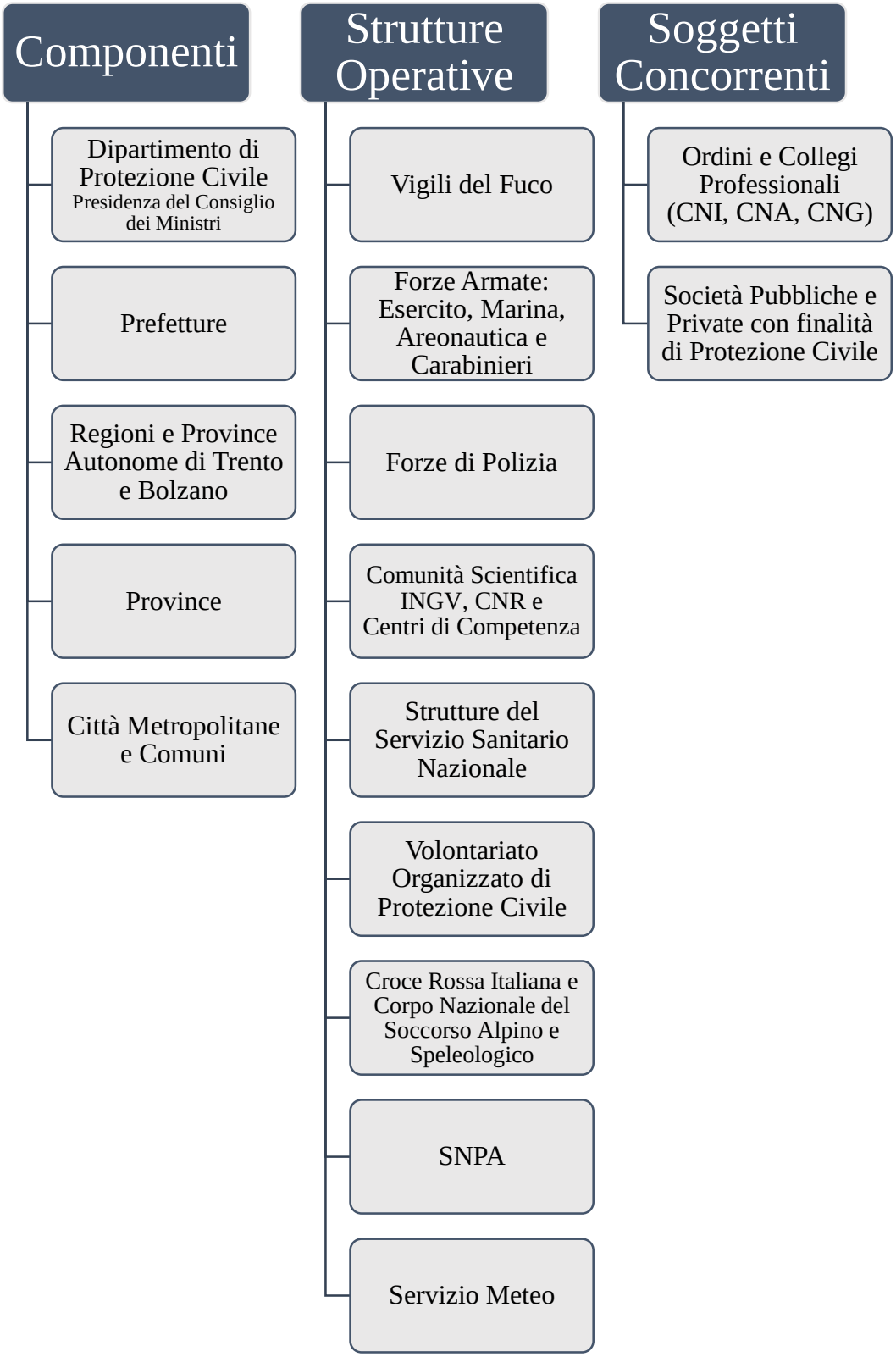


Figura 1.5 - Organizzazione del Servizio Nazionale: Componenti, Strutture Operative e Soggetti Concorrenti

Si precisa che in caso di eventi emergenziali di tipologia superiore le componenti e quindi le Autorità Territoriali di Protezione Civile sono comunque responsabili in base alla loro competenza. Ad esempio nel caso di evento emergenziale di Tipo B il Sindaco resta comunque Autorità Territoriale di Protezione Civile e deve adempiere alle sue responsabilità garantendo sempre la Funzione di Protezione Civile.
Nel Capo III viene specificato che:

- L'azione del Servizio Nazionale si esplica in relazione alla tipologia di rischio, in particolare come quello idraulico, idrogeologico e da fenomeni meteorologici avversi;
- L'allertamento del Servizio Nazionale di Protezione Civile è articolato in un sistema statale e regionale costituito dagli strumenti, dai metodi e dalle modalità stabiliti per sviluppare e acquisire, in tempo reale, la conoscenza, le informazioni e le valutazioni relativi, al preannuncio in termini probabilistici (ove possibile), al monitoraggio e alla sorveglianza in tempo reale degli eventi e della conseguente evoluzione degli scenari di rischio, al fine di attivare il Servizio Nazionale della Protezione Civile ai diversi livelli territoriali. Per il rischio idraulico, idrogeologico e da fenomeni meteorologici avversi, la rete dei Centri Funzionali, insieme ai Centri di Competenza e alle strutture preposte alla gestione dei servizi meteorologici a livello nazionale e regionale garantiscono il Sistema di Allerta Nazionale e Regionale, coordinato dalle componenti di riferimento (Dipartimento della Protezione Civile e Regione);
- La pianificazione di Protezione Civile ai diversi livelli territoriali è l'attività di prevenzione non strutturale, basata sulle attività di previsione e, in particolare, di identificazione degli scenari, finalizzata:
    a. Alla definizione delle strategie operative e del modello di intervento contenente l'organizzazione delle strutture per lo svolgimento, in forma coordinata, delle attività di Protezione Civile e della risposta operativa per la gestione degli eventi calamitosi previsti o in atto, garantendo l'effettività delle funzioni da svolgere con particolare riguardo alle persone in condizioni di fragilità sociale e con disabilità;
    b. Ad assicurare il necessario raccordo informativo con le strutture preposte all'allertamento del Servizio Nazionale
    c. Alla definizione dei flussi di comunicazione tra le componenti e strutture operative del Servizio Nazionale interessate;
    d. Alla definizione dei meccanismi e delle procedure per la revisione e l'aggiornamento della pianificazione, per l'organizzazione di esercitazioni e per la relativa informazione alla popolazione, da assicurare anche in corso di evento

Nei restanti capi di legge vengono definite una serie di norme concernenti la gestione dell'emergenza di rilievo nazionale, il rapporto dei Cittadini e del Volontariato in relazione al Servizio Nazionale i mezzi e le risorse economiche, che esulano dagli aspetti e dagli obiettivi di questo elaborato.

1.2.3 Confronto degli strumenti normativi

Dall'analisi degli strumenti normativi, risulta che la Direttiva Alluvioni e il Codice di Protezione Civile, nonostante anacronistiche, si intersecano con una logica del tutto coerente, seppur complessa.
L'obiettivo legislativo che le accumuna è quello di normare un sistema che garantisca la Funzione di Protezione Civile, cioè l'insieme delle competenze e delle attività volte a tutelare la vita, l'integrità fisica, i beni, gli insediamenti, gli animali e l'ambiente dai danni o dal pericolo di danni derivanti da eventi calamitosi di origine naturale o derivanti dall'attività dell'uomo.
Nello specifico la Direttiva Alluvioni fa riferimento solo ad eventi calamitosi di origine naturale, ovvero le alluvioni, cioè allagamenti temporanei di aree che abitualmente non sono coperte d'acqua includendo le inondazioni causate da fiumi, torrenti di montagna, corsi d'acqua temporanei mediterranei e le inondazioni marine delle zone costiere ed escludendo gli allagamenti causati dagli impianti fognari.
In quest'ottica, le ragioni che portano alle analisi di questo elaborato sono volte a garantire la Funzione di Protezione Civile, in quanto attraverso le analisi dei danni indiretti generati dalle interruzioni della rete stradale si vuole tutelare i soggetti e gli oggetti, citati nelle norme, dai danni derivanti dalle alluvioni.
Le disposizioni europee riguardo l'approccio di valutazione e di gestione del rischio alluvionale a livello territoriale di bacini e sottobacini idrografici, sono state assorbite dalla normativa italiana nella quale vengono per di più precisati i ruoli delle autorità territoriali e delle componenti in base alla tipologia d'evento (Tab. 1.1).
Attraverso la modellazione della rete di trasporto stradale, si vuole dunque condurre delle analisi che possano essere di supporto non solo alle autorità territoriali e alle componenti (Tab. 1.1) ma anche a tutte le strutture operative, responsabili della pianificazione e della gestione dell'emergenza (Fig. 1.5), che durante un alluvione necessitano di infrastrutture di trasporto resilienti.
Gli strumenti normativi rimarcano il fatto che il rischio alluvionale, conseguente a fenomeni idraulici, idrogeologici e/o fenomeni meteorologici avversi, può essere contrastato valutando le conseguenze negative, ovvero i danni, che esso comporta.
Strumenti come le Mappe di Pericolosità e Mappe di Rischio a servizio di Piani di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) e dei Piani di Protezione Civile Comunali (PPCC), possono garantire una risposta adeguata alle popolazioni colpite, migliorandone la preparazione e la capacità di far fronte a queste calamità.
Tali strumenti devono essere basati sulle "migliori pratiche" e sulle "migliori tecnologie disponibili" affinché siano appropriati e non comportino costi eccessivi nella gestione dei rischi alluvionali.
A questo proposito, la modellazione di una rete di trasporto stradale a supporto della gestione del rischio alluvionale può individuare strategie e misure di risposta appropriate e inoltre, stimando i danni indiretti generati dalle interruzioni di strade allagate, può essere valutata all'interno di un'analisi costi – benefici della mitigazione del rischio alluvionale.
I sistemi informativi territoriali (SIT), come suggerisce la normativa italiana, possono essere di grande aiuto nella valutazione e nella gestione del rischio alluvionale, per questo la metodologia di modellazione della rete è basata interamente sui SIT.

Infine, si evidenzia come questo studio sia in linea con i principi esposti nella normativa italiana (D. Lgs. 23 Febbraio 2010, 2010), (D. Lgs. 2 Gennaio 2018, 2018) nella quale si esplicita, in aggiunta alla Direttiva Alluvioni europea, un'attenzione particolare anche al territorio, ai beni e alle attività sociali considerando anche le infrastrutture e le strutture strategiche e rilevanti come autostrade, strade, ospedali, caserme, ecc.

Capitolo 2

Danni alla rete nella pianificazione di emergenza

Le strade, sostenendo la mobilità all'interno delle aree urbane, assumono particolare importanza in un contesto emergenziale in quanto la resilienza di una comunità dipende anche da una connessione sicura, continua e veloce fra punti strategici della rete, come aree di emergenza e strutture critiche (Ospedali e Stazioni di Soccorso), e fra infrastrutture critiche.
Durante le attività di emergenza, la preoccupazione è sempre rivolta alla logistica delle operazioni e all'accessibilità della rete stradale, con l'obiettivo di assicurare il soccorso.
Tali attività possono essere garantite attraverso una pianificazione dell'emergenza basata sull'analisi della risposta della rete stradale agli eventi estremi.
L'obiettivo di questo capitolo, attraverso la modellazione di una rete di trasporto locale, è quello di valutare la risposta della rete stradale in un contesto emergenziale, al fine di pianificare uno scenario di evacuazione e di garantire i soccorsi durante un evento alluvionale.
Sulla base del caso studio del Comune di Lodi, considerando uno scenario di pericolosità possibile con determinate caratteristiche di portata e tempi di ritorno, è stata modellata una rete di trasporto stradale valutandone la sua risposta prima in uno scenario ordinario e poi in uno scenario alluvionale.
Successivamente, attraverso il modello di traffico costruito, si è cercato di stimare i tempi di evacuazione (ETE) delle aree a rischio, individuando i percorsi sicuri per l'evacuazione, in base alla domanda di traffico calcolata su una stima dei veicoli esposti, sulla capacità veicolare portante e sui punti di origine e destinazione propri dei percorsi di evacuazione.
Infine, a partire dai dati contenuti nel Piano di Protezione Civile Comunale, si sono identificati i servizi critici responsabili per il soccorso durante l'emergenza alluvionale e, sempre con l'ausilio del modello di trasporto, sono state valutate le rispettive *service area*, confrontando i risultati nello scenario ordinario e nello scenario alluvionale, valutando con un'analisi di sensitività le diverse ipotesi di velocità di percorrenza dei mezzi di soccorso.

I risultati dell'analisi, potrebbero fornire disposizioni di prevenzione e di emergenza che servono principalmente a pianificare la preparazione e limitare l'impatto di eventi pericolosi, come le inondazioni.
In realtà, i piani di emergenza relativi al rischio alluvione dovrebbero già contenere tali disposizioni, anche se di solito non contengono informazioni dettagliate sull'accessibilità e sulle operazioni di evacuazione, basate sull'analisi di infrastrutture reticolari e di strutture critiche (Arrighi, et al., 2019).
Identificare l'effetto delle inondazioni su una comunità e documentare una gamma di strategie di risposta sono solo una parte della soluzione di gestione del rischio.
Secondo vari studi (Opper, et al., 2010); (Lindell, et al., 2007) le strategie identificate devono essere in grado di essere implementate durante le alluvioni, considerando che la gestione del tempo è fondamentale per una corretta gestione del rischio e soprattutto dell'emergenza, specie in caso di operazioni di evacuazione.
L'evacuazione in seguito ad un evento alluvionale è considerata una misura di risposta all'emergenza e in quanto tale parte di una completa gestione del rischio. Tale risposta deve essere dunque pianificata e testata, in quanto, nel caso più estremo di mancata evacuazione di intere comunità, le conseguenze possono essere fatali, anche su larga scala (Opper, et al., 2010).
E' probabile infatti che gli ingenti volumi di traffico coinvolti nelle evacuazioni di massa superino la capacità delle reti stradali, a meno che le operazioni di evacuazioni siano attivate con un certo anticipo tale da evacuare l'area a rischio prima che arrivi l'ondata di piena.
La quantità di tempo necessaria per evacuare è determinata dunque dalla capacità di un sistema di percorsi sicuri, in grado di gestire la domanda di traffico, e che dovrebbe essere determinato a priori in tempo di pace, ovvero in condizioni ordinarie.
Bisogna considerare inoltre che evacuare un'area non è affatto banale. Infatti occorre tenere presente che attendere troppo può essere fatale, ma che evacuare in anticipo può avere un costo elevato, inutile e a volte deleterio nel caso in cui un'alluvione preannunciata non si verifichi.
Pertanto, i gestori dell'emergenza hanno necessità di stimare con una certa affidabilità i tempi di evacuazione (ETE) (Lindell, et al., 2007).
Attraverso l'identificazione di punti strategici e rilevanti per una pronta gestione dell'emergenza, è possibile valutare l'accessibilità a servizi critici che le interconnessioni stradali devono garantire, stimando una riduzione della copertura di determinati servizi ed organizzando contromisure per ripristinare i servizi critici colpiti.
Per tutti questi motivi, la pianificazione dell'emergenza dovrebbe valutare la perdita di funzionalità delle infrastrutture stradali e dei servizi critici.

2.1 Caratterizzazione dell'area

Lodi è una città del Nord Italia, Capoluogo di Provincia, situata in Lombardia ad un'altitudine media 87 m s.l.m.
Il territorio comunale si estende nella bassa Val Padana su una superficie di 41 km^2 lungo il fiume Adda ed è popolata da 45.765 abitanti (fonte Ufficio Anagrafe del Comune di Lodi, 2018), con una densità abitativa di circa 1.165 ab/km^2.
Il clima della regione è analogo al resto della Pianura Padana. La distribuzione annuale delle precipitazioni nell'area, tipicamente a clima padano, presenta due massimi, uno principale in autunno (intorno a settembre-ottobre) ed uno secondario in primavera (intorno a maggio-giugno).
All'interno del bacino dell'Adda sotto lacuale, Lodi è collocata a valle della confluenza del Brembo, ad una distanza di circa 40 km e a circa 60 km a monte della confluenza nel fiume Po. Lo sviluppo urbano di Lodi ha portato alla costruzione di quartieri e zone industriali in aree soggette a inondazioni, vicino al fiume.
La città dunque è divisa in due parti dall'Adda, una parte più estesa in destra idrografica, comprendente circa l'87% dell'edificato in cui sorge il centro storico e che più rialzata rispetto alla parte di città in sinistra idrografica in cui sono presenti insediamenti di più recente costruzione.
Come si evince dal Piano di Protezione Civile Comunale e soprattutto dall'osservazione del Reticolo Idrografico Regionale Unificato – RIRU (Fig. 2.1 e Tab. 2.1) il territorio è percorso da un Reticolo Idrico Principale e da un Reticolo Idrico Minore con alcuni tratti tombinati.

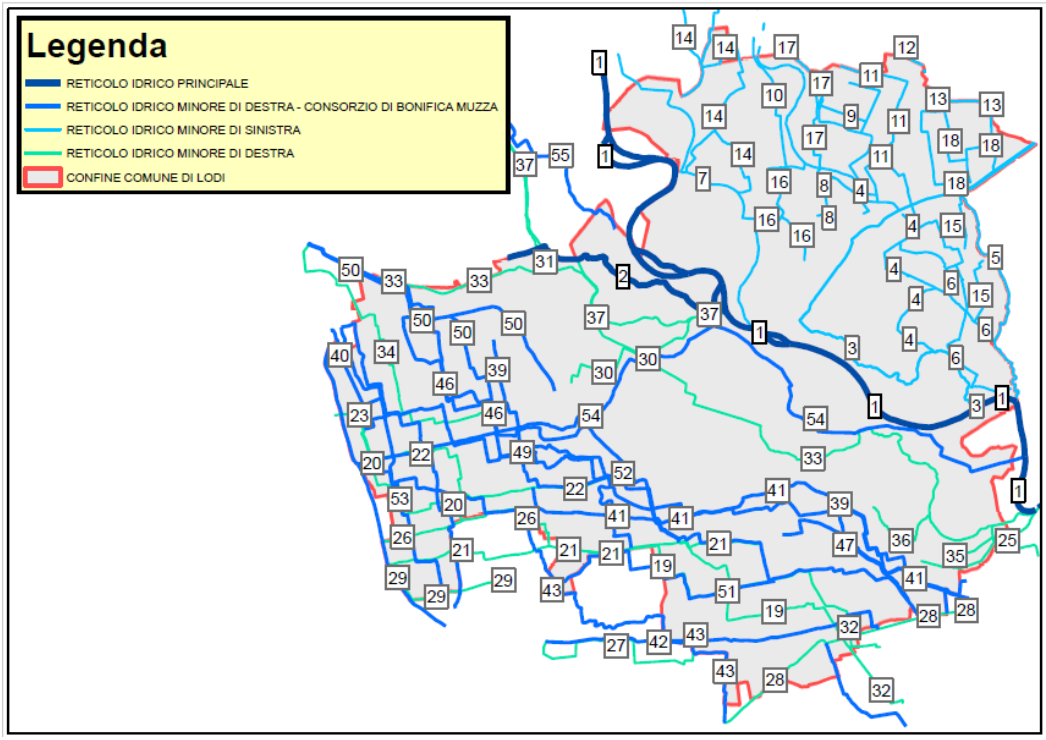


Figura 2.1 - Comune di Lodi: ricostruzione del reticolo idrografico a partire dal DB RIRU - Reticolo Idrografico Regionale Unificato (fonte: Regione Lombardia)

L'Adda rappresenta quindi il fiume principale del reticolo idrico principale, la cui portata è determinata dagli afflussi provenienti dal Lago di Como e dal fiume Brembo e dalle confluenze delle rogge costituenti il reticolo idrico minore.
In virtù della sua posizione e configurazione, Lodi è dunque esposta ad un rischio idraulico significativo (AdBPO, 2016).

RETICOLO IDRICO PRINCIPALE		
N°	Nome	Lunghezza [m]
1	ADDA	15148
2	CAVO ROGGIONE	2947

RETICOLO IDRICO MINORE DI SINISTRA		
N°	Nome	Lunghezza [m]
3	ROGGIA SQUINTANA	16821
4	ROGGIA RIO	7828
5	ROGGIA NEGRINA	5761
6	ROGGIA SORGINO RAMELLO	4361
7	ROGGIA MOZZANICA	4743
8	RAMO DI ROGGIA RIO	617
9	RAMO DI ROGGIA RIOLA	1517
10	ROGGIA ALIPRANDA	1708
11	ROGGIA DARDANONA	3967
12	ROGGIA FALCONA EL RI	288
13	ROGGIA FRATTA	1984
14	ROGGIA GALUPPINA	6653
15	ROGGIA NUOVA	1823
16	ROGGIA QUOTIDIANA	2262
17	ROGGIA RIOLA	12954
18	ROGGIA VECCHIA	3274

RETICOLO IDRICO MINORE DI DESTRA		
N°	Nome	Lunghezza [m]
19	BOLLETTA OSPITALA	4881
20	CAMPOLUNGA	2264
21	CAVO ALMOS	4732
22	CAVO BARCAS	4446
23	CAVO BARDO PAN	453
24	CAVO NISO	77
25	COLATORE MAIRANA	1146
26	COLO OSPITALA RAMO	2531
27	CORNEGLIANA	2687
28	DERIVATORE CA' DE BOLLI	3452
29	DERIVATORE CODOGNINO	1708
30	GELATA	2230
31	GISSARA	2498
32	MAIRAGHINO	4181
33	MOLINA SCARICATORE	10908
34	PADERNA BOTTEDO	4186
35	RAMO B COLATORE MOLINA	1179
36	RAMO COLATORE MOLINA	1834
37	VALENTINA	5160

RETICOLO IDRICO MINORE DI DESTRA		
CONSORZIO DI BONIFICA MUZZA		
N°	Nome	Lunghezza [m]
38	CANALE MUZZA	3811
39	BARGANA FILIPPINA	8741
40	BOTTEDO	1254
41	CASSINETTA	6636
42	CAVALLONA	4346
43	CODOGNA BASSA	9198
44	COLO COTTA BAGGIA	2436
45	COLO CRIVELLA	4629
46	COLO TIBERA	7351
47	COLO TURANA	2138
48	CRIVELLA	1610
49	DENTINA ORTOLANA	5502
50	PADERNA DENTINA	5310
51	QUARESIMINA	3482
52	ROGGIA BERTONICA	10171
53	S. SIMONE GIUDA	2202
54	SANDONA	10089
55	VESCA	2643

Tabella 2.1 - Comune di Lodi: ricostruzione del reticolo idrografico a partire dal DB RIRU - Reticolo Idrografico Regionale Unificato (fonte: Regione Lombardia)

2.1.1 Infrastrutture di trasporto: rete viaria

La parte infrastrutturale del sistema di trasporto, a servizio sia del Comune che della Provincia di Lodi, è composta da un'asse portante rappresentato dalla direttrice Nord-Sud (Milano-Bologna), che attraversa l'intera area provinciale tramite:

- La SS9 via Emilia;
- La tangenziale.

A livello locale la rete stradale urbana è strutturata a seconda della funzione delle strade con un sistema gerarchico principale e secondario.
Per quanto riguarda il sistema principale (Fig. 2.2 in verde scuro) è rappresentato da strade che hanno come principale funzione quella di collegamento fra i diversi settori della città. Nello specifico, le strade che fanno parte del sistema principale sono:

- Il tracciato storico della via Emilia (Milano – Dalmazia – Vignati – Agnelli – Mazzini – Piacenza), che attraversa da nord – ovest a sud – est il centro abitato costeggiando il centro storico e i cui terminali sono collocati sulla nuova via Emilia/Tangenziale Sud;
- Via Defendente, il sistema S. Giacomo/Savoia/Borgo Adda e Via Secondo Cremonesi, che completano la circonvallazione interna al perimetro del centro storico;
- Le vie radiali rappresentate da
    - Via Cavallotti, con il ponte sull'Adda in direzione Nord;
    - Viale Europa e Via San Colombano che confluiscono da Sud nel sottopasso ferroviario e poi su Viale Agnelli, connesse alla Tangenziale Sud
    - Via Massena da est, connessa con lo svincolo di Via Battaglia Cassano alla Tangenziale Est
- Via Cadamosto, Via Sforza e Via Colombo, che attraverso il secondo sottopasso ferroviario veicolare connettono Viale Europa e Viale Milano.

Fanno parte invece, del secondo livello gerarchico della rete, le strade di distribuzione (Fig. 2.2 in verde chiaro) che distribuiscono i flussi all'interno dei settori della città oppure quelle strade che vengono utilizzate come alternative alla rete primaria. La rete secondaria locale, è dunque molto fitta e nello specifico è rappresentata da strade come:

- Le Vie del Sandone – San Fereolo;
- Le vie radiali San Bassiano, Pavia, Rimembranze Italia, Dante Alighieri;
- Le strade del Centro Storico utilizzate anche dai traffici di attraversamento della rete principale come ad esempio le già citate Borgo d'Adda, San Giacomo e Savoia, oltre a Via XX Settembre e Via Gorini.

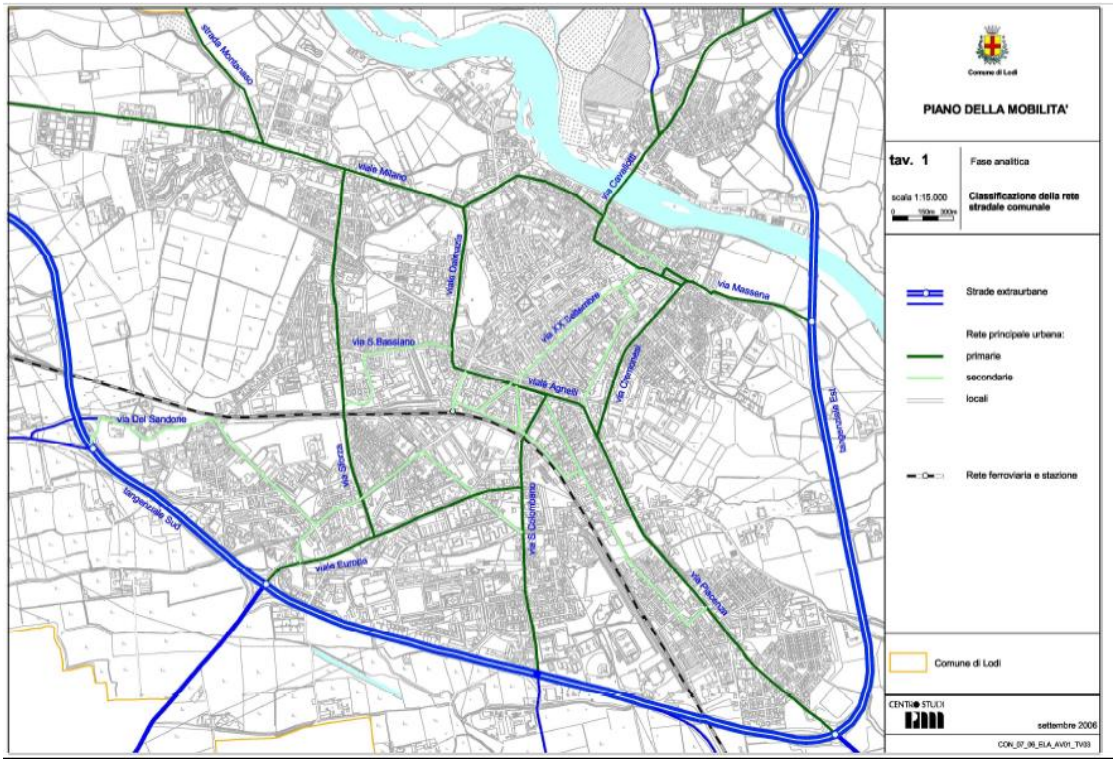


Figura 2.2 - Classificazione della rete stradale comunale (fonte: PUM 2009 di Lodi); in blu sono rappresentate le strade extraurbane che collegano Lodi al resto della provincia, in verde scuro le strade urbane della viabilità principale e in verde chiaro le strade urbane della viabilità secondaria

La memoria storica degli eventi passati ricorda come durante le alluvioni che hanno colpito la città di Lodi, specie nell'alluvione del 2002, molte infrastrutture di trasporto stradale furono interrotte dalle inondazioni. Osservando le foto di Fig. 2.5 scattate durante l'alluvione del 2002, si notano alcune strade della viabilità principale interrotte, mezzi di soccorso speciali in azione e macchine sommerse. Si può dedurre che tale evento abbia comportato dei danni diretti sia fisici che funzionali legati alla rete stradale, oltre a dei danni indiretti causati da danni sistemici riscontrati nella reta stradale a causa ad esempio dell'interruzione di Via Dalmazia. Tuttavia, purtroppo, non sono stati condotti dei rilevamenti o degli studi a riguardo, per cui non si dispone di dati utili per la calibrazione del modello.

Figura 2.3 - Team dei Vigili del Fuoco con barche di soccorso (a sinistra). Viale Dalmazia allagata (a destra)

2.2 Gestione dell'emergenza: i tempi di evacuazione

Per individuare i tempi di evacuazione delle zone allagate, occorre tenere in considerazione diverse problematiche complesse ed interdipendenti tra loro, descritte dettagliatamente in questo paragrafo.
Lo schema di flusso, riportato in Fig. 2.4, riassume la procedura messa a punto per stimare i tempi di evacuazione, utili per una migliore gestione dell'emergenza.
Tutta la procedura si basa su simulazioni in condizioni ordinarie di un modello di trasporto locale, creato ad hoc per questo caso studio modellando la velocità e la capacità veicolare portante di ogni arco stradale.

A partire dalle mappe di pericolosità idraulica, si è condotta un'analisi di esposizione dei veicoli da evacuare, con la quale è stato possibile individuare i punti di origine e di destinazione dell'evacuazione.
Si precisa che in realtà si sono definiti due tipi di punti destinazione:

- La destinazione prossima: rappresenta il punto al di fuori dell'area di rischio raggiungibile nel minor tempo possibile e nella maniera più semplice e sicura;
- La destinazione ultima: rappresenta il punto di arrivo dove le persone sono al sicuro fino al loro rientro a casa. In questa trattazione si considerano i parcheggi come destinazione ultima anche se come da PPCC le persone vengono poi trasferite e accolte nelle aree di emergenza.

Considerando inoltre i dati contenuti nel Piano di Protezione Civile Comunale sono state individuate le aree di emergenza, rappresentanti i punti di destinazione ultima degli evacuati.
Le simulazioni, condotte con l'utilizzo dei sistemi informativi come suggerito dalla normativa italiana, hanno permesso di ottimizzare l'individuazione dei punti di destinazione prossima e quindi i percorsi di evacuazione primari (PER), oltre a tutte le arterie di collegamento fra i PER e i punti di origine e destinazione.
Successivamente sono state individuate due macro aree, composte da determinate zone di evacuazione individuate in base a punti di destinazione prossima omogenei, ed infine per ogni macro area sono stati calcolati i tempi di evacuazione.
Nei sotto paragrafi seguenti, si descrivono nel dettaglio tutti i passaggi della procedura utilizzata.

2.2.1 Mappe di pericolosità

Il Pericolo H è una componente del rischio che considera la probabilità di accadimento dell'evento alluvionale e la sua intensità tra cui l'estensione spazio – temporale dell'allagamento.
Come definito dalla normativa europea, l'informazione sul pericolo alluvionale è contenuta in mappe di pericolosità definite per determinati scenari, in base ad un tempo di ritorno T_R.

Il tempo di ritorno T_R è definito come il numero di anni che in media intercorrono tra due diversi eventi di intensità uguale o superiore all'intensità assegnata. Generalmente l'intensità di un evento alluvionale viene definita tramite un determinato valore di portata di piena Q.

Per questa trattazione, le mappe di pericolosità utilizzate sono frutto di uno studio precedente (Gattai, 2019) nel quale, a partire da un modello idraulico 2D in moto vario, dopo aver svolto numerose simulazioni numeriche e aver calibrato il modello, sono state prodotte dieci mappe di pericolosità considerando cinque diversi tempi di ritorno T_R e due tipi di configurazioni geometriche, la prima rappresentante le condizioni senza alcuna difesa strutturale mentre la seconda rappresentante le condizioni con difese strutturali progettate in destra idrografica.

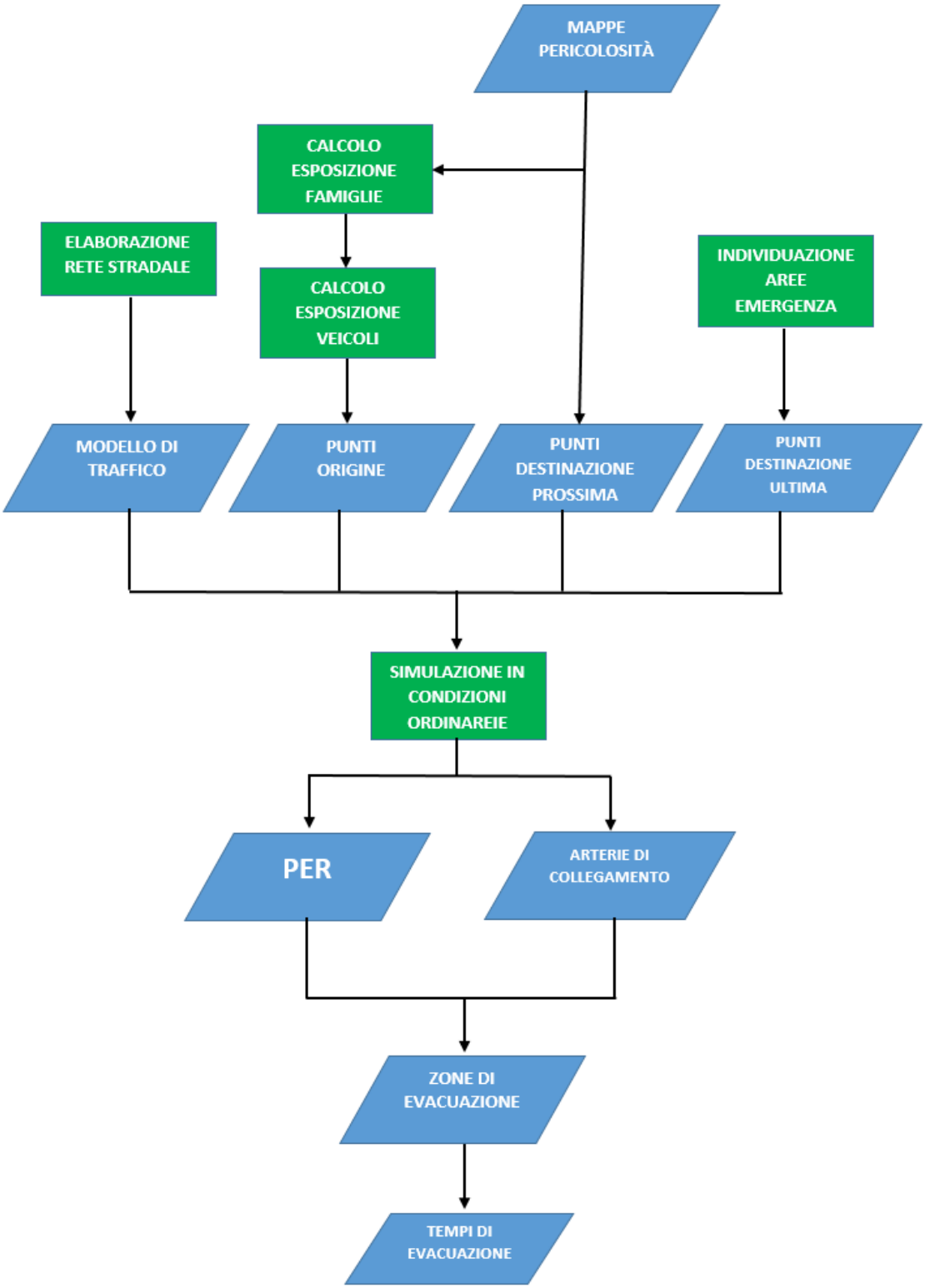


Figura 2.4 - Schema di flusso della metodologia utilizzata per la stima dei tempi di evacuazione per una miglior gestione dell'emergenza alluvionale

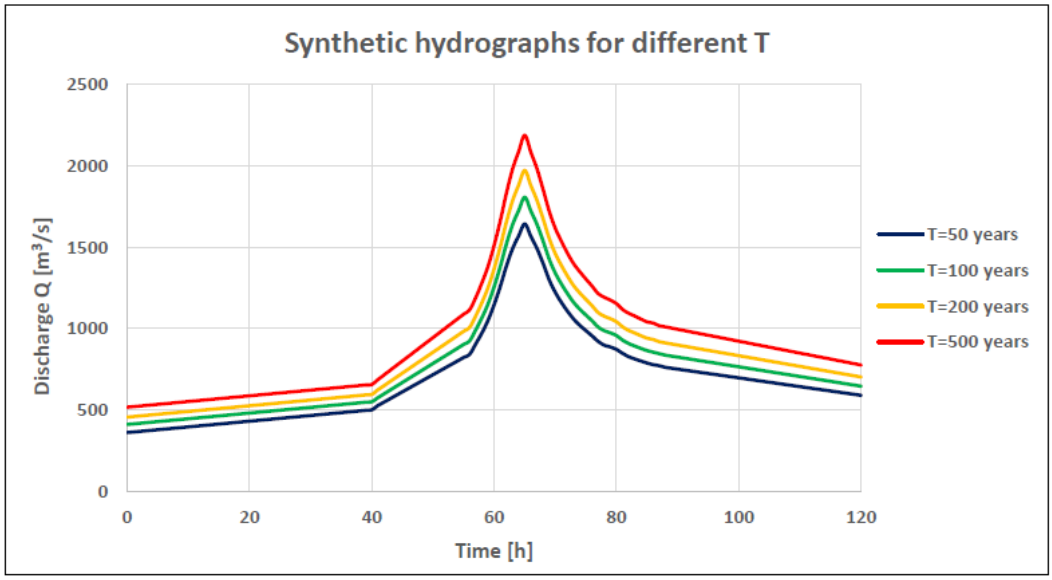


Figura 2.5 - Idrogrammi sintetici per differenti T_R utilizzati in input al Modello idraulico 2D (Gattai, 2019)

Le mappe utilizzate in questa trattazione sono state realizzate mediante gli Idrogrammi sintetici riportato in Fig. 2.5. Nello specifico, si è scelto di studiare lo scenario più raro, rappresentato dalla linea rossa di Fig. 2.5, avente una portata al colmo pari a Q = 2.187 m^3/s e un tempo di ritorno pari a T_R = 500 anni, e considerando solo la geometria con le difese strutturali.

Considerando lo scenario più raro (TR = 500 anni) con le difese in destra idrografica, costruite per resistere a una piena con tempo di ritorno pari a 200 anni, inferiore rispetto alle caratteristiche della piena analizzata, si osservano gli allagamenti di massima estensione che potrebbero mettere a rischio la città di Lodi. In particolare, considerata l'assenza di difese strutturali in sinistra idrografica, si osservano allagamenti superiori ai 2 metri nei quartieri di Revellino e Campo Marte entrambi completamente inondati.
Inoltre, si osservano degli allagamenti poco inferiori ai 2 metri nella zona compresa fra l'Adda, Viale Milano e Via Defendente, e nella zona di Cascina Barbinetta.
In Fig. 2.6 si riporta la Mappa di Pericolosità (MAXDEP) utilizzata in questo caso studio, Tale mappa rappresenta l'inviluppo massimo dei tiranti idrici ottenuto dalla simulazione del modello idraulico 2D. Si precisa che le immagini in Fig. 2.6 sono l'estratto dell'area inondata sull'intero dominio computazionale, con particolare attenzione al Comune di Lodi.
Inoltre, dalla rappresentazione sono state escluse celle di rete con profondità dell'acqua superiori a 5 m, al fine di ridurre la gamma delle profondità dell'acqua visualizzate (i livelli nel fiume sono fino a 15 m) e di avere una migliore risoluzione e distinzione dei livelli nella città.

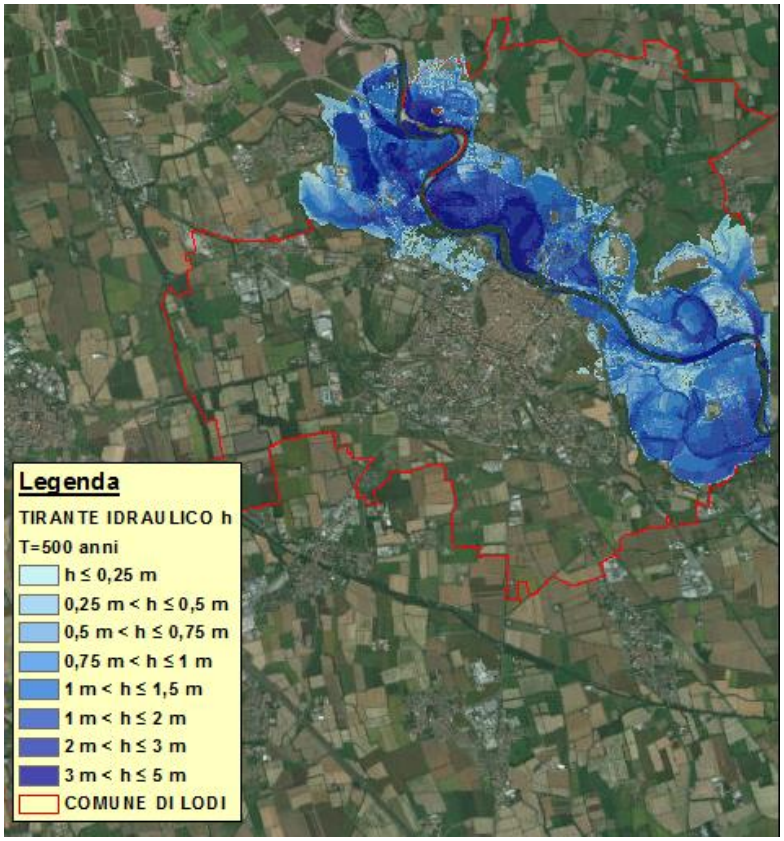


Figura 2.6 - Mappe di Pericolosità in termini di profondità dei tiranti idrici. Scenario più raro TR=500 anni con difese strutturali in destra idraulica (Gattai, 2019)

2.2.2 Modello di traffico

Per perseguire l'obiettivo di questo capitolo, cioè testare la risposta della rete stradale del Comune di Lodi in seguito ad un evento alluvionale, è stato sviluppato un modello di traffico in grado di calcolare percorsi in base a distanze e tempi di viaggio.
Il modello è stato implementato in ArcGIS utilizzando il *tool* Network Analyst, attraverso il quale è possibile ottenere una stima del tempo di viaggio.
Solitamente, infatti, viene stimato il tempo più breve di percorrenza da un'origine specifica a una destinazione specifica, attraverso un percorso costituito da una serie di nodi e archi collegati (Wang, et al., 2011).
Input fondamentale per questo modello è dunque un grafo, composto da archi (*edges*) e nodi di collegamento (*junctions*) interconnessi tra loro, rappresentante una rete stradale di trasporto.
Ogni tratto stradale è modellato da un arco e da due nodi terminali (Fig. 2.7).
Ogni grafo stradale deve essere modellato con cura in quanto la rete deve risultare consistente dal punto di vista geometrico e topologico, altrimenti il Network Analyst, basato sulla risoluzione dell'algoritmo di Dijkstra, non riesce a calcolare i percorsi in base a distanze e tempi di viaggio.
Ogni arco, componente la rete, è caratterizzato da diversi attributi. Alcuni di questi attributi determinano il costo del percorso, per questo vengono detti attributi di costo.

Esempi di attributo di costo sono la lunghezza dell'arco, la velocità di percorrenza dell'arco o il tempo di percorrenza dell'arco.
La risoluzione dell'algoritmo di Dijkstra porta alla definizione di un percorso che minimizza un determinato campo di costo.

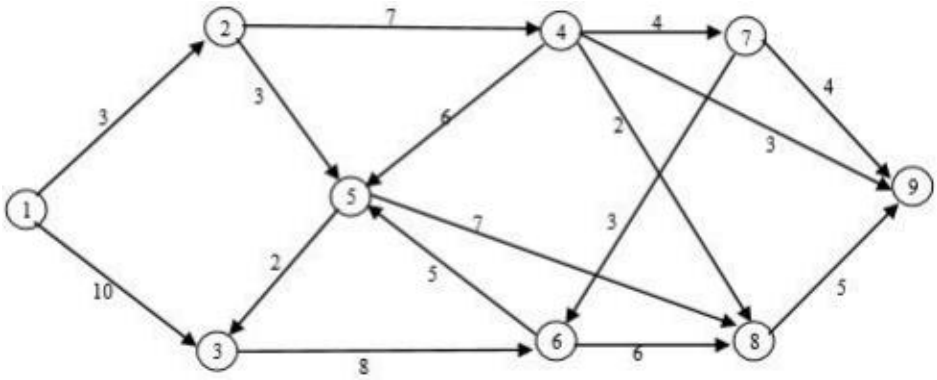


Figura 2.7 - Grafo orientato composto da archi e nodi interconnessi tra loro

Se ad esempio si sceglie di risolvere il percorso fra due punti in base alla distanza di viaggio (lunghezza dell'arco), la risoluzione dell'algoritmo porterà alla definizione del percorso più breve in termini di distanza percorsa, mentre se si sceglie come attributo di costo il tempo di percorrenza verrà definito il percorso più breve in termini di tempo, ovvero il percorso più veloce.
Per maggiori dettagli sulla comprensione dell'algoritmo di Dijkstra si rimanda all'articolo (Javid, 2013).
Un grafo inoltre può essere caratterizzato da attributi di restrizione del viaggio, cioè da proprietà che stabiliscono se la percorribilità dell'elemento soggetto a restrizione sia vietata interamente, evitata o addirittura preferita. Ad esempio se si vuole specificare se un arco è percorribile a senso unico o a doppio senso, occorre utilizzare un attributo di restrizione, generalmente denominato *oneway*. L'attributo *oneway* ha dunque lo scopo di orientare l'arco definendo la direzione percorribile (Fig. 2.7).

Il modello di traffico utilizzato in questa trattazione è basato dunque sulle seguenti ipotesi fondamentali:

- La rete deve essere costituita da archi carrabili e/o da tutti gli archi percorribili dai mezzi di soccorso per la gestione dell'emergenza.
- L'attributo di costo utilizzato è il tempo di percorrenza dell'arco, il quale viene calcolato come rapporto fra gli attributi di costo lunghezza e velocità di percorrenza dell'arco.
- La rete deve tenere in considerazione i sensi unici di percorrenza degli archi, in base all'attributo di restrizione *oneway*.

La mancanza di una rete stradale ufficiale del Comune di Lodi, consistente e che rispetti le ipotesi fondamentali del modello di traffico, ha reso obbligatorio la costruzione di una rete di trasporto stradale.

2.2.2.1 Costruzione e analisi della rete stradale

In prima battuta si sono valutati i dati forniti dal DBT di Regione Lombardia ma tali dati sono risultati poco consistenti in quanto per ogni arco non era specificato la restrizione *oneway* e non erano complete le informazioni sulle tipologie e le caratteristiche degli archi, necessarie per calcolare il campo di costo velocità degli archi e di conseguenza necessarie per calcolare il costo tempo di percorrenza degli archi.
Perciò è stata scaricata una rete dai dati di OpenStreetMap (OSM). Tale rete è risultata consistente dal punto di vista della restrizione *oneway* mentre per quanto riguarda le caratteristiche e le tipologie d'arco, tale rete è risultata parzialmente completa. Tuttavia, è stato possibile integrare le informazioni a disposizione con le disposizioni normative

Il Database della rete stradale è stato dunque categorizzato in base alla tipologia stradale secondo le norme del Codice della Strada (1992). Ogni arco stradale è stato classificato in base alle loro caratteristiche costruttive, tecniche e funzionali nei seguenti tipi:

- A – AUTOSTRADA: strada extraurbana o urbana a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia, eventuale banchina pavimentata a destra priva di intersezioni a raso e di accessi privati, dotata di recinzione e di sistemi di assistenza all'utente lungo l'intero tracciato, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore e contraddistinta da appostiti segnali di inizio e fine; deve essere attrezzata con apposite aree di servizio ed aree di parcheggio entrambe con accessi dotati di corsie di decelerazione e di accelerazione.
- B – STRADA EXTRAURBANA PRINCIPALE: strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia e banchina pavimentata a destra, priva di intersezioni a raso, con accessi alle proprietà laterali coordinati, contraddistinta dagli appositi segnali di inizio e fine, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore; per eventuali altre categorie di utenti devono essere previsti opportuni spazi. Deve essere attrezzata con apposite aree di servizio, che comprendano spazi per la sosta, con accessi dotati di corsie di decelerazione e di accelerazione.
- C – STRADA EXTRAURBANA SECONDARIA: strada ad unica carreggiata con almeno una corsia per senso di marcia e banchine.
- D – STRADA URBANA DI SCORRIMENTO: strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico, ciascuna con almeno due corsie di marcia, ed una eventuale corsia riservata ai mezzi pubblici, banchina pavimentata a destra e marciapiedi, con le eventuali intersezioni a raso semaforizzate; per la sosta sono previste aree o fasce laterali esterne alla carreggiata, entrambe con immissioni ed uscite concentrate.
- E – STRADA URBANA DI QUARTIERE: strada ad unica carreggiata con almeno due corsie, banchine pavimentate e marciapiedi; per la sosta sono previste aree attrezzate con apposita corsia di manovra, esterna alla carreggiata.

- F – STRADA LOCALE: strada urbana od extraurbana opportunatamente sistemata ai fini della circolazione dei pedoni, dei veicoli e degli animali non facente parte degli altri tipi di strade.
- F – BIS – ITINERARIO CICLOPEDONALE: strada locale, urbana, extraurbana o vicinale, destinata prevalentemente alla percorrenza pedonale e ciclabile e caratterizzata da una sicurezza intrinseca a tutela dell'utenza debole della strada.
- STRADA DI SERVIZIO: strada affiancata ad una strada principale (autostrada, strada extraurbana principale, strada urbana di scorrimento) avente la funzione di consentire la sosta ed il raggruppamento degli accessi dalle proprietà laterali alla strada principale e viceversa, nonché il movimento e le manovre dei veicoli non ammessi sulla strada principale stessa.

Poiché si definiscono strade urbane ed extraurbane a seconda che esse siano interne o esterne ai centri abitati (1992), gli archi stradali sono stati ulteriormente categorizzati in archi urbani o extraurbani (Fig. 2.8) Per implementare tale categorizzazione, è stato preso in considerazione il vigente Piano Urbano della Mobilità di Lodi (PUM). Per quanto concerne gli archi stradali esterni il territorio comunale di Lodi e ricadenti nei centri abitati limitrofi, non disponendo di indicazioni riguardo i limiti di tali centri abitati, si è scelto di categorizzare come strade urbane gli archi ricadenti entro i 20 metri dagli agglomerati di edifici, costituenti i centri abitati dei seguenti comuni limitrofi:

- Boffalora d'Adda;
- Cornegliano Laudense;
- Corte Palasio;
- Montanaso Lombardo;
- Pieve Fissiraga;
- San Martino in Strada.

Per ogni arco sono stati poi assegnati i limiti di velocità in ambito urbano ed extraurbano e le portata di servizio per corsia in termini di veicoli equivalenti per ora in base al Codice della Strada (1992) e alle Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Strade (2001), come riportato in Tab. 2.3.
In base al PUM è stata considerata anche la ZPRU (Zona di Particolare Rilevanza Urbanistica) all'interno del perimetro delimitato dagli assi: Dalmazia – Vignati – Agnelli – Cremonesi - Borgo Adda – Defendente. Il Codice della Strada definisce ZPRU zone nelle quali sussistono esigenze e condizioni particolari di traffico, in rapporto agli effetti sulla circolazione veicolare, sulla sicurezza, sulla salute dei cittadini, sull'ordine pubblico, sul patrimonio ambientale e culturale e sul territorio. Nella ZPRU è stato istituito il limite di velocità massimo pari a 30 km/h, anche per via Borgo d'Adda e P.le Barzaghi; mentre ne sono escluse le altre strade che delimitano la zona.

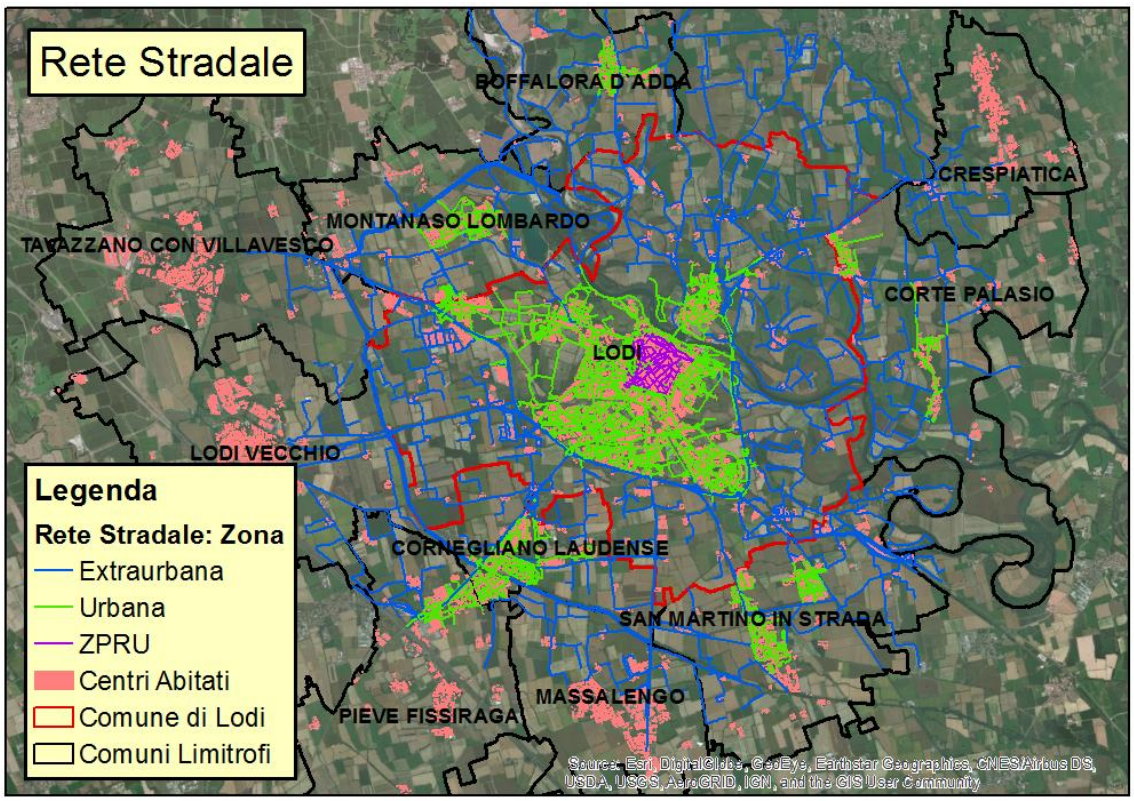


Figura 2.8 - Rete stradale: classificazione degli archi per zone extraurbane e urbane

Tipo Strada	Zona Territoriale	Limite di velocità [km/h]	Portata di servizio [veq/h]
A	EXTRAURBANA	130	1.100
	URBANA	130	1.550
B	EXTRAURBANA	110	1.000
C	EXTRAURBANA	90	600
D	URBANA	70	800
E	URBANA	50	800
F	EXTRAURBANA	90	450
	URBANA	50	800
STRADA DI SERVIZIO	EXTRAURBANA	90	450
	URBANA	50	800

Tabella 2.2 - Limiti di velocità e portate di servizio per tipo di strada

Se si utilizzasse però come campo di costo velocità il limite di velocità massimo, si avrebbero tempi di percorrenza più veloci rispetto alla realtà. Il modello di traffico incluso nel Network Analyst di ArcGIS infatti, nel calcolo dei percorsi più brevi minimizza l'attributo costo del tempo di viaggio ma non considera le reali condizioni di viaggio dovute a code e intersezioni, tempi di frenata, limiti di velocità stradali o congestioni dovute al traffico.
Si è scelto dunque di considerare una velocità minore del limite massimo di velocità in base a dati statistici sulla mobilità, al fine di determinare tempi di percorrenza più realistici.

Per Federpneus nel 2015 la velocità media delle auto in ambito urbano è di 28 km/h mentre in ambito extraurbano è di 47 km/h (FEDERPNEUS, 2017).
Secondo un rapporto dell'Osservatorio UnipolSai Assicurazioni del 2018, in Lombardia si viaggia a una velocità media di 32,2 km/h e nella Provincia di Lodi ad una velocità media di 37,3 km/h (Assicurazioni, 2018).
Sugli archi extraurbani principali, come ad esempio sulla Tangenziale, la velocità media sarà sicuramente superiore, ma non si hanno dati statistici ufficiali. Secondo gli itinerari calcolati su Google Maps, la velocità su tali archi si aggira attorno ai 75 km/h.
In base a queste considerazioni, sono state assegnate le seguenti velocità medie a seconda della zona e del tipo di strada (Tab. 2.4).

TIPO DI STRADA	ZONA	LIMITE MASSIMO DI VELOCITA' [km/h]	VELOCITA' MEDIA [km/h]
D, E, F, F-BIS, Strada di Servizo	Urbana – ZPRU	30	28
C, D, E, F, F-BIS, Strada di Servizio	Urbana	50	35
B	Extraurbana – Tangenziale	110	75
B, C, F, Strada di Servizio	Extraurbana	90	47
A, B, C, D, E (Rampe di carico/intersezioni)	Extraurbana	40	35

Tabella 2.3 - Velocità media attribuita per tipo di strada sulla base di dati statistici

Per i mezzi di soccorso, considerando gli articoli 141 e 177 del Codice della Strada (1992) e gli effetti che la velocità può avere su un paziente, risulta difficile stimare una velocità media che si presume sia minore del limite massimo di velocità ma maggiore della velocità media di un auto.
Per cui, per le successive elaborazioni svolte, si è scelto di assegnare due velocità, una corrispondente al limite massimo di velocità e una pari all'80% del limite massimo di velocità, e di eseguire un'analisi di sensitività confrontando i risultati.

2.2.2.2 Condizioni di viaggio in caso di alluvione

Come è stato già evidenziato nel Capitolo 1, esondazioni e temporali intensi ed improvvisi possono generare allagamenti specie nel territorio urbano con conseguenti interruzioni delle strade e/o perdita di funzionalità delle stesse.
I modelli in letteratura presuppongono che una strada sia aperta o chiusa anche se, alcuni studi hanno dimostrato che le inondazioni su una strada non impediscono necessariamente alle persone di percorrerla.
Per passare da una visione binaria di una strada allagata considerata "aperta" o "chiusa", è stata creata una curva che mette in relazione la profondità delle acque di inondazione

con la riduzione della velocità del veicolo integrando i dati della letteratura altre fonti di dati, come video e foto.
La curva Velocità – Tiranti idrici è rappresentata in Fig. 2.9 (Pregnolato, et al., 2017).

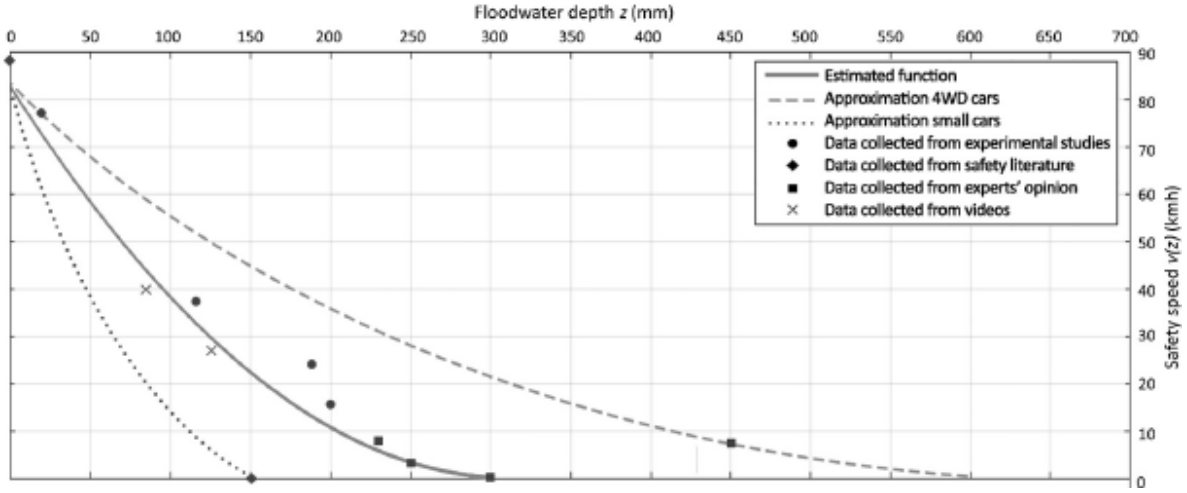


Figura 2.9 - Curva Velocità - Tiranti idrici (Pregnolato, et al., 2017)

Sulle ordinate è rappresentata la velocità massima accettabile che garantisce un controllo sicuro del veicolo in base alla profondità dell'acqua riportate sulle ascisse.
Questi dati si riferiscono ai veicoli con due ruote motrici (2WD), tuttavia gli altri veicoli potrebbero avere presentazioni diverse.
Se infatti per i veicoli con due ruote motrici, la profondità massima, oltre il quale la il veicolo non percorre più la strada in condizioni di sicurezza, è di 30 cm, per i mezzi fuoristrada con quattro ruote motrici (4WD) questa profondità massima corrisponde a 60 cm. E' stata inoltre calcolata una curva limite inferiore, che approssima le condizioni di viaggio dei veicoli piccoli, i quali oltre i 15 cm non riescono a transitare in sicurezza.
Su ogni arco la velocità e quindi l'attributo di costo tempo di viaggio possono subire diminuzioni importanti, generando così dei ritardi.
Occorre dunque distinguere, rispetto al resto della rete, gli archi stradali interrotti dall'alluvione e quelli invece che riducono la loro funzionalità, cioè quelli che sono percorribili ma con velocità inferiori alle condizioni ordinarie.
Per fare ciò si sono utilizzate le mappe di pericolosità con i livelli dei tiranti idrici, considerando per ogni arco un valore medio del tirante idrico.
Successivamente per ogni arco sono state assegnate le velocità medie in condizioni di alluvione in base alla curva Flood – Transports (Fig. 2.9) e che stabilisce la relazione tra i livelli dei tiranti idrici e le velocità in sicurezza dei veicoli (Pregnolato, et al., 2017); (Arrighi, et al., 2019).
Ipotizzando che i mezzi di soccorso siano assimilabili ai mezzi speciali 4x4 (4WD Cars), considerando di utilizzare un modello di trasporto per le macchine comuni (Modello CAR e Modello CAR FLOOD) e un modello di trasporto per i mezzi di soccorso (Modello SOS e Modello SOS FLOOD), sono stati individuati i seguenti limiti di velocità riportati in Tab. 2.5. Tali limiti di velocità sono stati stabiliti discretizzando la curva Velocità – Tiranti Idrici, proposta da (Pregnolato, et al., 2017); (Arrighi, et al., 2019), come riportato

in Fig. 2.10. Si precisa che per velocità pari a 0,000001 l'arco risulta interrotto in quanto il tempo di viaggio tende ad infinito e quindi l'arco non sarà mai utilizzato nel calcolo del percorso più breve.

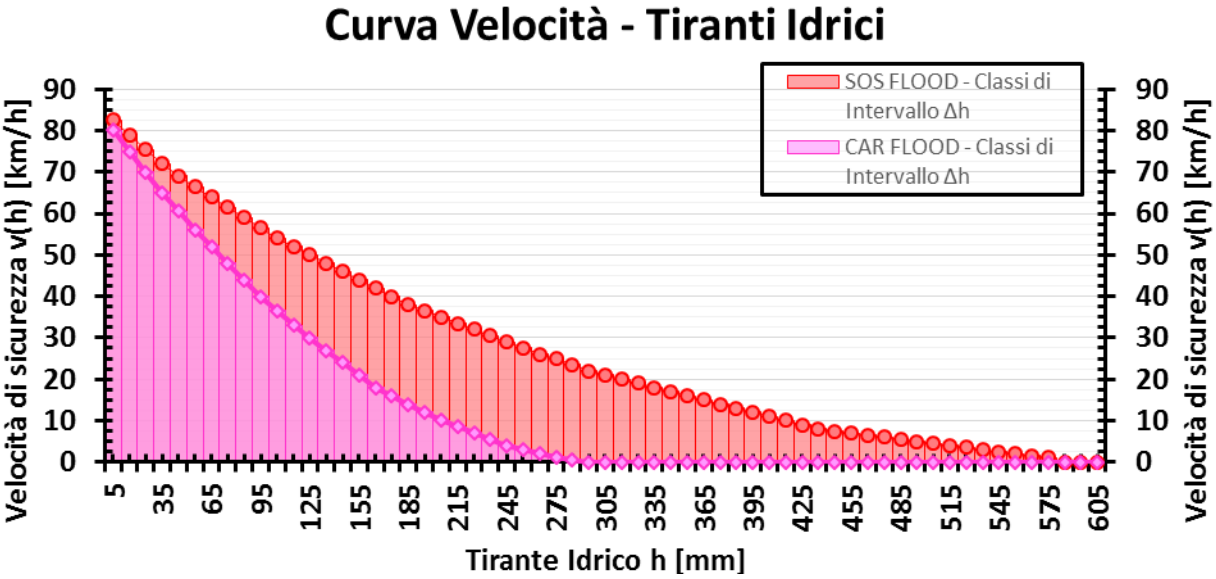


Figura 2.10 - Discretizzazione della curva Velocità - Tiranti idrici utilizzata dal modello

Δh [cm]	CAR FLOOD [km/h]	SOS FLOOD [km/h]
h = 0	velocità ordinaria	velocità ordinaria
h ≤ 1	80	82,5
1< h ≤ 10	40	56,5
10 < h ≤ 20	12	36,5
20 < h ≤ 30	0,000001	22
30 < h ≤ 40	0,000001	12
40 < h ≤ 50	0,000001	5
50 < h ≤ 60	0,000001	0,000001
60 < h ≤ 150	0,000001	0,000001

Tabella 2.4 - Limiti di velocità assegnati in condizioni di alluvione in base alla profondità del tirante idrico h

Si precisa che la curva di Fig. 2.10 e le velocità di Tab. 2.4 fanno riferimento a condizioni di viaggio con velocità di flusso libero (*free flow speed*) per cui tali velocità non tengono in considerazione le reali condizioni di viaggio dovute a code e intersezioni, tempi di frenata, limiti di velocità stradali o congestioni dovute al traffico, sottostimando così i tempi di viaggio rispetto alla realtà (tempi di viaggio più brevi).
Al fine di valutare condizioni simili alla realtà, si suggerisce di considerare un coefficiente di riduzione α_{speed} che riduce la velocità di flusso libero.

Tale coefficiente, può essere stimato per le macchine comuni in base ai dati di Tab. 2.4 come rapporto fra velocità media e limite di velocità massima, mentre per i mezzi soccorso, poiché è difficile stimare la loro velocità media, è stato utilizzato un coefficienti di riduzione $\alpha_{SPEED,\ SOS}$ pari a 0,80 (Paragrafo 2.5).

2.2.3 Punti di origine e destinazione

Due degli input fondamentali del modello sono i punti di origine, dal quale partire per calcolare il percorso desiderato, e i punti di destinazione, rappresentanti i punti di arrivo.

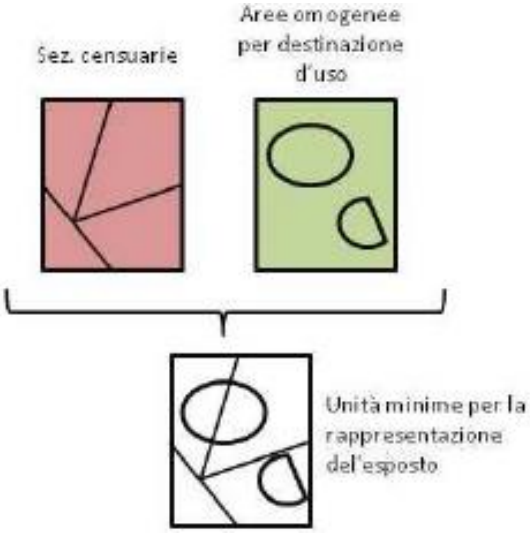


Figura 2.11 - Definizione dell'unità minima utilizzata nelle mappe di esposizione (Legnani, 2012)

I **punti di origine** sono stati calcolati a partire dalle Mappe di Pericolosità e dallo shapefile delle Sezioni di Censimento 2011 (fonte: Dati ISTAT) mediante un'analisi di esposizione.
Poiché non è stato possibile condurre un'analisi alla micro scala, identificando le persone da evacuare edificio per edificio, si è scelto di identificare delle unità minime di esposizione (UME), definite considerando l'intersezione (Fig. 2.11) tra le celle censuarie (Sez. Cens. 2011) e le zone caratterizzate da uso del suolo omogeneo, secondo la classificazione DUSAF di Regione Lombardia.
Dai dati del DUSAF, si è scelto di considerare solo le aree antropizzate (1° livello=1) e in particolare solo le zone urbanizzate (2° livello=1) per individuare con più precisione le zone dove risiedono le persone.
Successivamente si sono valutati i baricentri delle UME, rappresentanti i punti di origine dei percorsi di evacuazione, in quanto in un secondo momento serviranno da input per la definizione dei percorsi di evacuazione primaria (PER).
La valutazione dell'esposizione si è focalizzata in primis sul numero di famiglie presenti nella zona allagata (Fig. 2.12). Tale valutazione è servita poi per analizzare l'esposizione dei veicoli (Fig. 2.12) a servizio della popolazione per l'evacuazione.
È stato ipotizzato che durante l'evacuazione tutte le famiglie utilizzassero tutte le loro macchine in quanto durante un'alluvione l'acqua a contatto con le macchine stesse può causare ingenti danni diretti. Per cui assumendo tale ipotesi si cerca di limitare i danni diretti alle auto esposte. Stando all'intervista del Vicecomandante della città di Lodi, si è tenuto inoltre conto del fatto che il 100% delle persone a rischio viene evacuato, come spesso accade.
Si precisa che una delle difficoltà di questa metodologia è quella di calcolare il numero esatto di veicoli, che saranno utilizzati dalle famiglie per evacuare le zone allagate. Tale valutazione è importante poiché, per stimare correttamente ETE, bisogna utilizzare il numero di veicoli di evacuazione e non il numero totale di veicoli registrati o il totale

numero di persone, in quanto questi non determinano il carico sull'ERS (Lindell, et al., 2007).

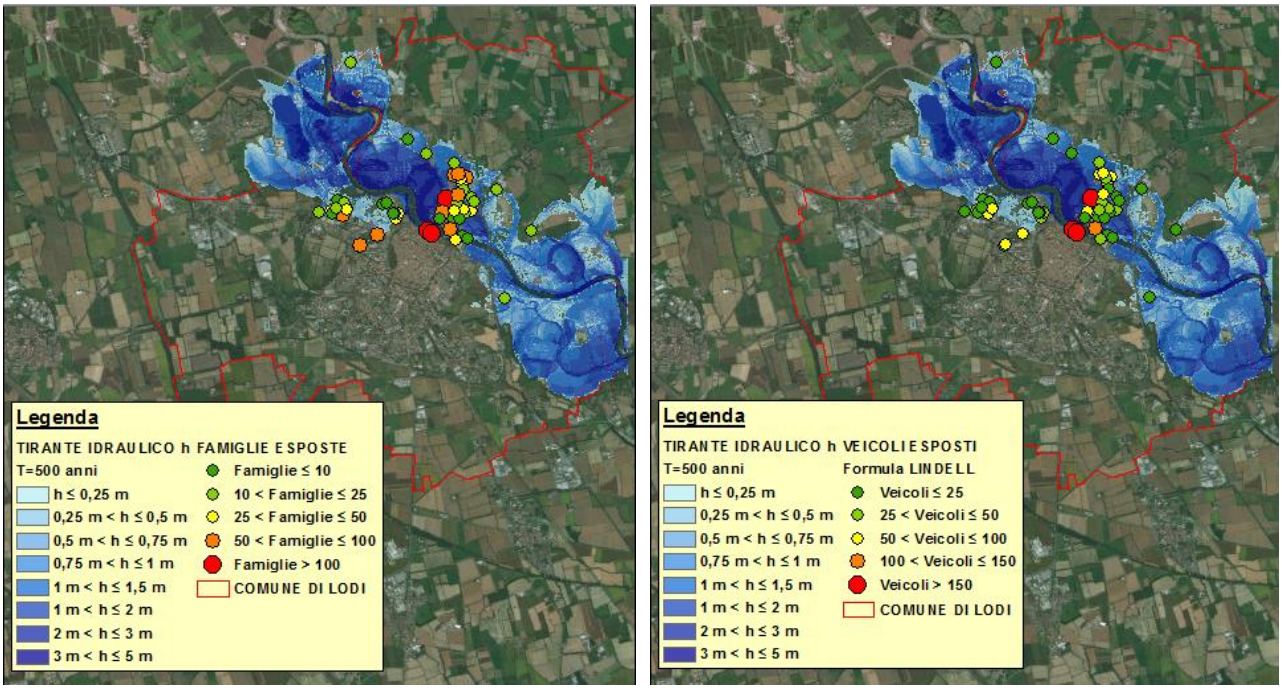


Figura 2.12 - A sinistra è stata mappata l'esposizione delle famiglie mentre a destra è stata mappata l'esposizione dei veicoli

Secondo Lindell & Prater, è possibile stimare il numero di veicoli, utilizzati per l'evacuazione, considerando il numero delle famiglie moltiplicato per un coefficiente che varia tra 1,21 e 1,54 veicoli/famiglie.

Poiché a Lodi sono presenti 19.321 famiglie e 43.332 abitanti (Dati ISTAT 2011), risultano 2,243 abitanti/famiglie. Considerando inoltre che a Lodi risultano 0,564 veicoli/abitanti (fonte: Dati ACI 2016), per questa trattazione si è scelto di considerare un coefficiente pari a 1,27 veicoli/famiglie al fine di stimare un numero ragionevole di veicoli coinvolti nell'evacuazione.

In Tab. 2.7 sono riportati i risultati numerici dell'analisi di esposizione.

Popolazione esposta da evacuare	**Famiglie esposte da evacuare**	**Veicoli esposti utilizzati per l'evacuazione**
4.508	1.910	2.437

Tabella 2.5 - Risultati dell'analisi di esposizione

Si precisa, inoltre, che il calcolo dei veicoli è stato condotto per ogni UME arrotondando per eccesso, per cui questa analisi di proposito sovrastima leggermente il numero di

veicoli coinvolti, anche se tuttavia tale sovrastima non influisce negativamente sulla valutazione della capacità di risposta della rete di trasporto.

Successivamente, si sono valutate le Aree di Emergenza, in base a quanto descritto nel Piano di Protezione Civile Comunale (PPCC) e in base alla testimonianza del Vicecomandante della Polizia Locale di Lodi.
Tale valutazione ha permesso di identificare i **punti di destinazione prossima e ultima** per l'evacuazione, anche questi utilizzati successivamente come input per la definizione dei percorsi primari di evacuazione (PER).
La testimonianza raccolta del Vicecomandante della Polizia Locale di Lodi, ha permesso inoltre di identificare i posti di blocco in caso di alluvione, utilizzati come input essenziale e restrittivo per il modello di traffico.
Tra le Aree di Emergenza identificate da PPCC, si sono individuate quelle aree destinate a parcheggio (Fig. 2.13) in grado di ospitare tutti i veicoli coinvolti nell'evacuazione.

Figura 2.13 - Parcheggi di emergenza da utilizzare in caso di alluvione

Per ogni origine – destinazione (Baricentro UME – Parcheggi), in base al numero di posti auto dei parcheggi, al numero di veicoli coinvolti nell'evacuazione, ai posti di blocco e alle mappe di pericolosità, si sono individuati i percorsi sicuri PER utilizzando il modello di trasporto, composto dalla rete OSM in condizioni ordinarie (Paragrafo 2.2.2), in grado di calcolare il percorso più breve in termini di tempo.

2.2.4 Individuazione percorsi di evacuazione e zone di evacuazione

È possibile individuare i percorsi sicuri considerando una serie di dati fondamentali (Lindell, et al., 2007) come:

- Mappe di Pericolosità della zona da evacuare;
- Esposizione e individuazione delle persone da evacuare;
- Aree di emergenza;
- Rete di trasposto per l'evacuazione, con individuazione della geometria e della capacità portante dei percorsi primari di evacuazione (PER);
- Modello di traffico che identifica i flussi e la scelta dei percorsi in base a origini e destinazioni.

Questi dati sono stati discussi ampiamente in precedenza, per cui a partire dai punti di origine e di destinazione, utilizzando il modello di trasporto basato sul *tool* Network Analyst, sono stati individuati i percorsi primari di evacuazione prima fra i punti di origine e i punti di destinazione prossima e poi fra i punti di destinazione prossima e i punti di destinazione ultima. I percorsi di evacuazione primaria (PER) sono dunque quei percorsi che a partire dai punti di origine raggiungono i punti di destinazione nel minor tempo possibile, minimizzando l'attributo di costo tempo di percorrenza.

Si riporta un riassunto dei dati fondamentali (Tab. 2.6), di cui sopra, utilizzati nel caso studio della Città di Lodi e ottenuti da fonti e valutazioni descritte in questo capitolo.

DATI per analisi ETE	FONTE
Mappe di Pericolosità	Modellazione Idraulica 2D – MAXDEP T=500 anni con difese strutturali in destra idrografica
Esposizione persone da evacuare	Sezioni di Censimento 2011; DUSAF.
Aree di Emergenza	Piano di Protezione Civile Comunale di Lodi
ERS – Percorsi sicuri di Evacuazione	Modello di traffico – Rete OSM in condizione ordinaria
TGT – Tempo di generazione del viaggio	Dati Comportamentali Empirici (Warning time – Response Time) legati all'evacuazione di città americane causa uragani
Modello di Traffico che identifica flussi e calcola i percorsi	EMBLEM (Lindell, et al., 2007); Modello di Traffico; ArcGIS Network Analyst (New Route – OD Matrix).

Tabella 2.6 - Fonti dei dati fondamentali per la stima dei tempi di evacuazione

Successivamente, si sono individuate le zone di evacuazione omogenee (Fig. 2.14) aggregando i punti origine con destinazione prossima comune.
Poiché in caso di alluvione il Ponte Napoleone Bonaparte sull'Adda viene chiuso al traffico, si è divisa la città nelle due macro aree, cioè Destra Idrografica e Sinistra Idrografica (Tab. 2.6) e di conseguenza si sono individuati due sistemi di percorsi di

evacuazione. Si precisa che la macro area Sinistra Idrografica comprende anche la zona di Cascina Barbinetta (Zona 8) che in realtà è in destra idrografica. Questo è dovuto dal fatto che il percorso più breve per evacuare tale zona, interseca il sistema dei percorsi di evacuazione della macro area Sinistra Idrografica, per cui si è scelto di aggregarla ad essa.

In Fig. 2.15 e Fig. 2.16 sono riportati rispettivamente l'ERS di Sinistra Idrografica e l'ERS di Destra Idrografica.

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
Sinistra Idrografica	x	x	x					x
Destra Idrografica				x	x	x	x	

Tabella 2.7 - Divisione delle zone in macro aree

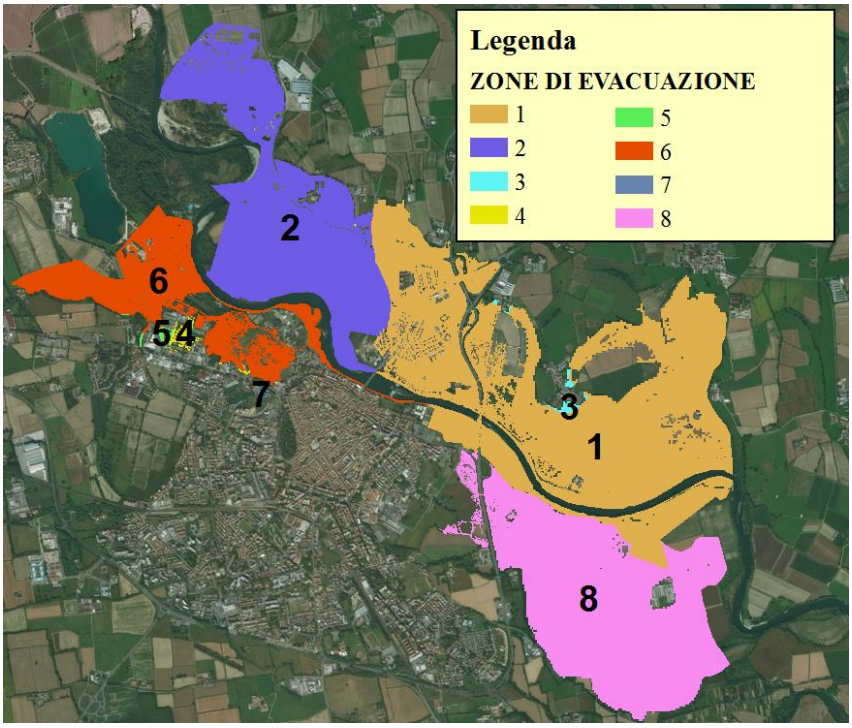


Figura 2.14 - Zone di evacuazione omogeneizzate per destinazione prossima

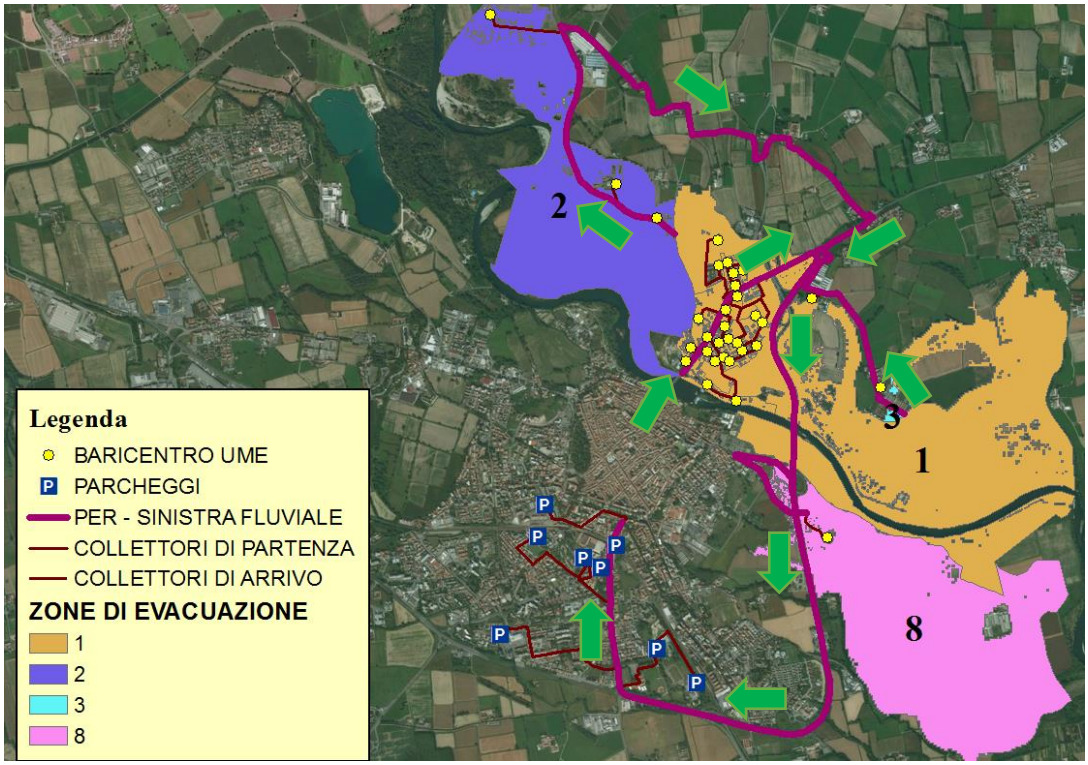


Figura 2.15 - Sistema di percorsi di evacuazione in Sinistra Idrografica

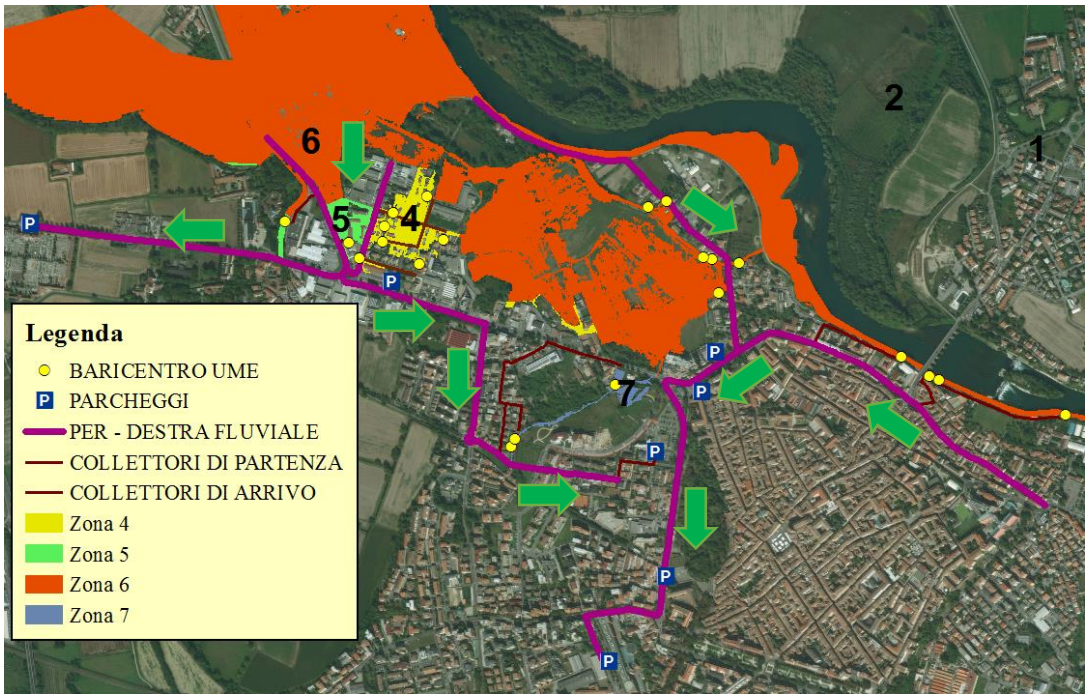


Figura 2.16 - Sistema di percorsi di evacuazione in Destra Idrografica

2.2.5 Tempi di evacuazione

Il modello temporale per l'evacuazione di un'area, utilizzato in questa trattazione e descritto di seguito, in passato è servito come base per la pianificazione urbanistica su larga scala di aree soggette a inondazione.
Tale linea temporale è stata infatti utilizzata nel caso studio della Valle di Hawkesbury-Nepean, a ovest di Sydney in Australia, ma non dalla ricerca o dall'analisi di percorsi primari di evacuazione, mentre un'indagine dettagliata di come individuare tali percorsi potrebbe aiutare a definire meglio la pianificazione dell'evacuazione (Opper, et al., 2010).
Al fine dunque di ottimizzare la pianificazione dell'evacuazione in questa trattazione è stata modellata la rete di trasporto stradale cercando di individuare un sistema di percorsi di evacuazione.

La costruzione della timeline è dovuta alla necessità di sviluppare una maggiore comprensione dei problemi legati all'evacuazione per alluvione e di sviluppare strategie di comunicazione adeguata per gestire la popolazione da evacuare.
Tale strumento ha il vantaggio di mostrare quanto siano critiche le relazioni fra:

- Previsione dell'inondazione e decisione di evacuazione;
- Servizio di emergenza e mobilitazione della comunità;
- Flusso del traffico ed evoluzione temporale di un'alluvione.

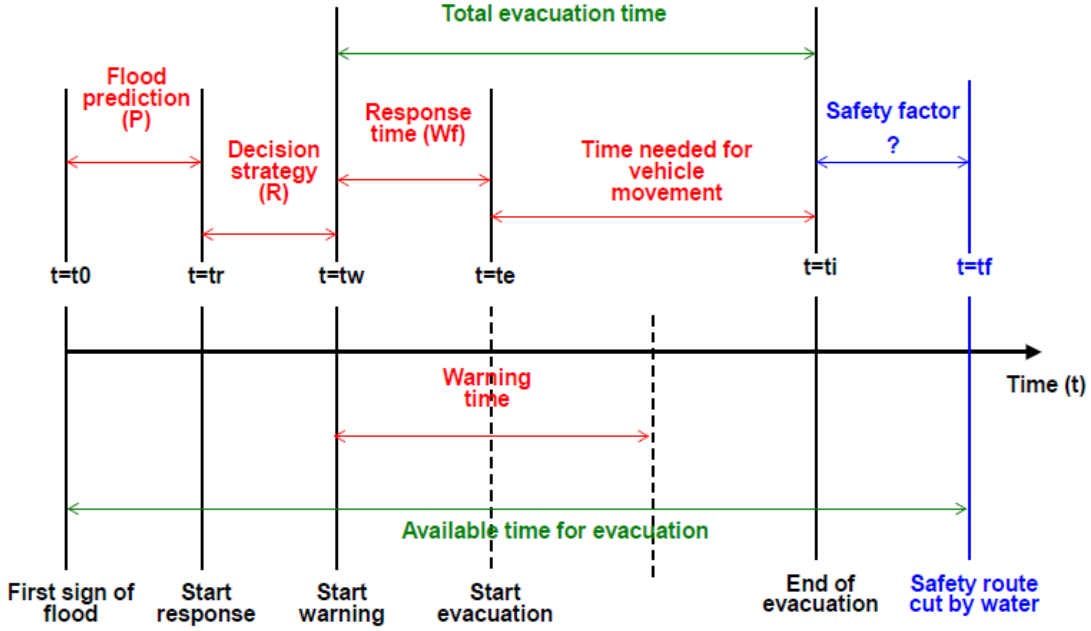


Figura 2.17 - Sequenza temporale (timeline) per l'evacuazione di un'area soggetta ad alluvioni (Molinari, 2012/2013)

La linea orizzontale di Fig. 2.17 rappresenta un'indicazione di quanto tempo sia disponibile per l'evacuazione di un'area alluvionata. In generale la scala di grandezza temporale è dell'ordine delle ore.
Gli elementi comuni nel processo di evacuazione sono la previsione delle inondazioni, la mobilitazione del servizio di emergenza, la mobilitazione dell'avvertimento e l'evacuazione della comunità.
Ogni singolo elemento del processo di evacuazione ha una precisa durata definita da un punto di inizio e un punto di fine. Il ritardo di un singolo elemento del processo può comportare il fallimento dell'evacuazione.
Gli elementi del processo di evacuazione sono:

- Previsione dell'alluvione (Flood Prediction P), cioè il tempo necessario per prevedere un'alluvione in termini spazio – temporali con un certo grado di affidabilità;
- Strategie di decisione (Decision Strategy R), cioè il tempo necessario per decidere quali azioni intraprendere e mobilitare le risorse;
- Tempo di avvertimento (Warning time), cioè il tempo per allarmare la popolazione;
- Tempo di risposta all'avvertimento (Response time W_f), cioè il tempo che occorre alle persone per organizzarsi e prepararsi all'evacuazione;
- Tempo di movimentazione dei veicoli (Vehicle Movement Time VMT), cioè il tempo necessario affinché tutti i veicoli si spostino dall'area alluvionata ad un'area sicura;
- Fattore di sicurezza (Safety Factor), cioè un tempo aggiuntivo per gestire eventuali ritardi che potrebbero compromettere l'evacuazione. Terminato questo tempo le strade sicure risulteranno interrotte dall'inondazione.

Per la stima del tempo VMT si è utilizzato il metodo per l'evacuazione di città a causa di uragani proposto da Lindell & Prater, in quanto le modalità di evacuazione possono essere considerate simili al contesto alluvionale.
Si precisa, inoltre, che il tempo VMT dipende fortemente dalla scelta del percorsi primari di evacuazione e da tutto il sistema di evacuazione, comprese le arterie di collegamento. Un modello di trasporto che aiuta ad identificare i percorsi più brevi, minimizzando i tempi di percorrenza, rende più efficiente la stima dei tempi di evacuazione.

In base alla linea temporale di Fig. 2.17, è possibile stimare il tempo di evacuazione (ETE) come:

$$ETE = W_f + VMT$$

In base ai sistemi di percorsi di evacuazione individuati è possibile calcolare i VMT come

$$VMT = t_c + t_q + t_{h1} + t_{h2} + t_a$$

In cui

VMT: Tempo di movimentazione dei veicoli (Vehicle movement time);
t_c: Tempo di percorrenza della distanza fra l'origine e i PER. Si calcola in base alla lunghezza media dei collettori di partenza;
t_q: Tempo trascorso in coda in attesa di accesso al PER;
t_{h1}: Tempo di percorrenza impiegato dall'ultima macchina per raggiungere dal suo punto di origine la destinazione prossima;
t_{h2}: Tempo di percorrenza impiegato dall'ultima macchina per raggiungere dal suo punto di destinazione prossima il punto di destinazione ultima;
t_a: Tempo di percorrenza della distanza fra i PER e il punto di destinazione ultima. Si calcola in base alla lunghezza media dei collettori di arrivo;

Tutti i tempi sono stati calcolati assumendo una velocità di percorrenza per l'evacuazione pari a 50 km/h, cioè la velocità più prossima ai 30 mph (Lindell, et al., 2007).

Il termine t_q è influenzato dal TGT, Trip Generation Time, cioè dal tempo di generazione del viaggio il quale dipende dal Warning Time e dal Response Time W_f.
I tempi di allertamento e di risposta vengono calcolati in base all'osservazione di dati sperimentali sui comportamenti che le persone hanno durante l'evacuazione.
Lindell & Prater propongono delle distribuzioni di probabilità cumulata da utilizzare per il Warning Time (Fig. 2.18) e per il Response Time (Fig. 2.19), a seconda del tipo di avviso di allertamento e del tipo di risposta all'allertamento della popolazione, calcolate sulla base delle evacuazioni di città americane causate da uragani.

Il Warning Time fornisce il tempo necessario per allertare una certa percentuale di persone.
Nel caso studio si è scelto di utilizzare un approccio di avviso di allertamento caratterizzato da più risorse (*multiple sources*) in cui le persone vengono avvisate non solo porta a porta, ma anche attraverso mass media come televisioni, radio, internet, ecc. oltre al passaparola. Si è scelto di utilizzare questo approccio perché sembra essere l'approccio che potrebbe essere utilizzato ai giorni nostri dove l'utilizzo dei mass media fornisce un grande supporto.
Dunque il tempo necessario nella città di Lodi per avvisare il 100% della popolazione è pari a 4,5 ore.

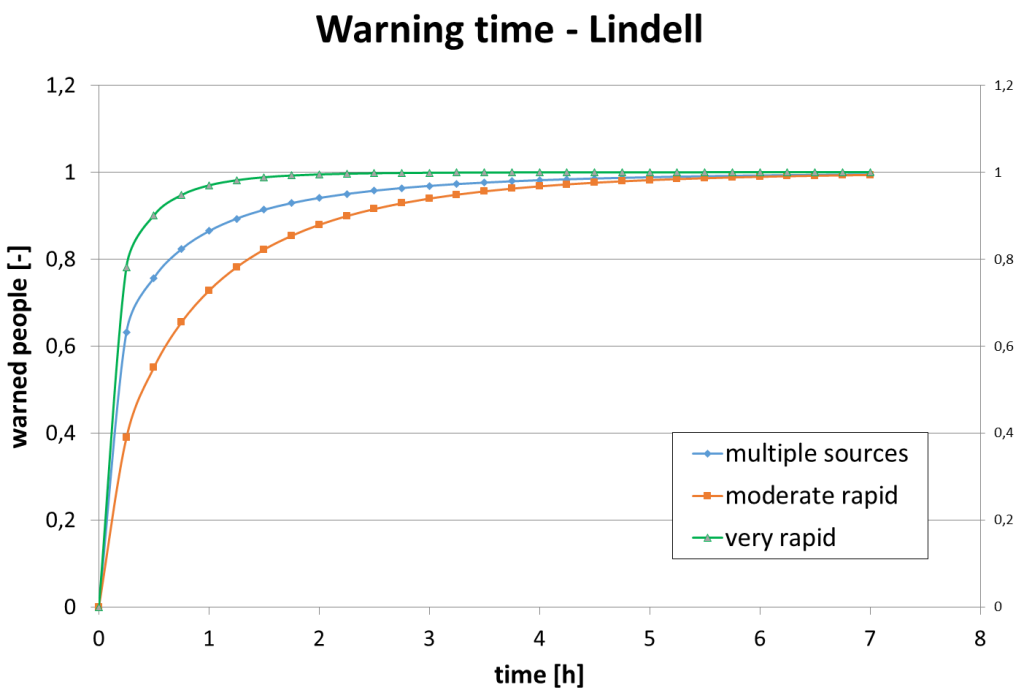


Figura 2.18 – Distribuzione di probabilità cumulate di tipo Warning Time (Lindell, et al., 2007)

Il Response Time invece fornisce il tempo necessario affinché una certa percentuale di persone si organizzi e si prepari per l'evacuazione, mettendo casa in sicurezza e preparando le valigie.
Nel caso studio si è scelto di utilizzare una distribuzione di probabilità cumulata di tipo *residents/work* in cui si ipotizza che parte della popolazione sia a casa e parte della popolazione sia a lavoro per cui, come si è osservato sperimentalmente, tale distribuzione considera il tempo necessario alle persone per tornare a casa da lavoro, mettere casa in sicurezza e organizzarsi e prepararsi all'evacuazione.
Dunque il tempo necessario nella città di Lodi per avere una risposta dal 100% della popolazione utilizzando questa curva è pari a 7 ore.

Le distribuzioni di probabilità cumulative dei tempi di avviso e dei tempi di risposta devono essere combinate a produrre una distribuzione cumulativa dei tempi di generazione del viaggio (TGT), che rappresenta il tempo totale richiesto per i residenti dell'area a rischio che ricevono un avvertimento e si preparano ad evacuare.

Supponendo indipendenza statistica tra tempo di avviso e tempi di preparazione, la distribuzione TGT è calcolata da moltiplicando la probabilità di ricezione di avvertimento all'interno di ciascun intervallo di tempo per la probabilità di preparazione in ogni intervallo di tempo (Urbanik, 2000).

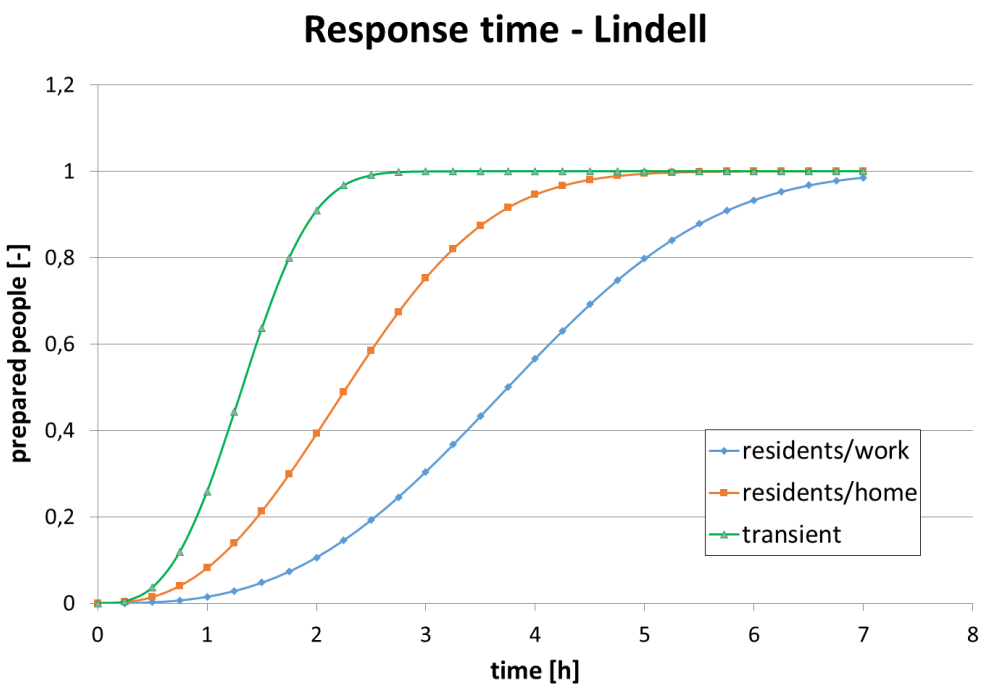


Figura 2.19 – Distribuzione di probabilità cumulata di tipo Response Time (Lindell, et al., 2007)

La TGT risultante per il caso studio è riportata in Fig. 2.20.

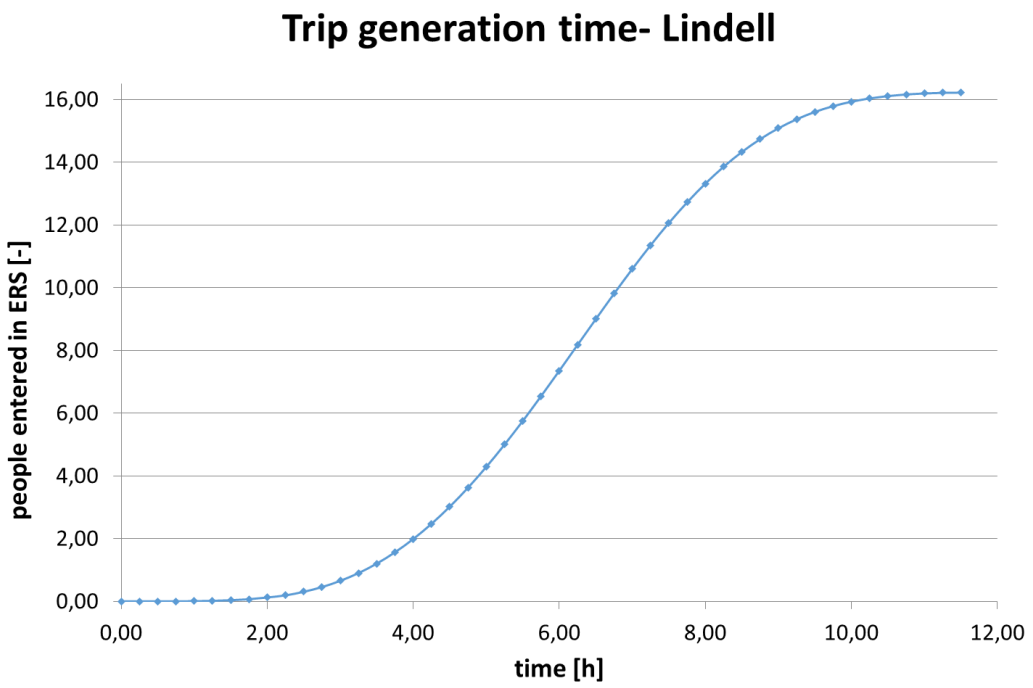


Figura 2.20 – Distribuzione di probabilità cumulata di tipo TGT ottenuto considerando un allertamento di tipo multiple sources e un tempo di risposta di tipo residents/work

Il termine t_q è può essere calcolato utilizzando una procedura in cui l'inizio della diffusione dell'avviso è definito come t = 0.
Per ogni intervallo di tempo t > 1, tre equazioni vengono risolte ripetutamente fino a quando viene raggiunto un valore temporale t_q (durata totale della coda) in cui tutte le famiglie che intendono evacuare si sono immesse e stanno percorrendo il percorso primario di evacuazione PER (ovvero, $\Delta A_t = 0$ e $Q_t = 0$).

$$\Delta D_t = \Delta A_t + Q_{t-1}$$

$$P_t = \min(\Delta D_t; C)$$

$$Q_t = \Delta D_t - P_t$$

Con

ΔD_t:	La domanda incrementale di veicoli nel PER al tempo t;
ΔA_t:	È il flusso di accesso incrementale su collettori e arterie al tempo t (che è definito dalle distribuzioni TGT);
Q_t:	È la dimensione della coda in attesa di ingresso sulla rotta di evacuazione primaria all'istante t (si presume che Q_0 sia zero);
P_t:	È il flusso sulla rotta di evacuazione primaria all'istante t, e C è la capacità della strada principale che si presume essere un valore costante pari all'80% della capacità normale durante l'evacuazione;

Il valore di t in cui A_t e Q_t tornano pari a 0, quello è il valore di t_q.

Calcolati i tempi t_c, t_q, t_{h1}, t_{h2} e t_a per ogni i – esima zona di evacuazione, successivamente è stato calcolato il VMT per le due macro aree considerando

$$VMT = \max(t_{c,i}) + max(t_{q,i}) + max(t_{h1,i}) + max(t_{h2,i}) + max(t_{a,i})$$

Il tempo di evacuazione stimato (ETE) è dunque pari al VMT più W_f.

Si riportano di seguito i risultati per il caso studio in termini di ore (Tab. 2.8).

	W_f	$\max(t_{c,i})$	$\max(t_{q,i})$	$\max(t_{h1,i})$	$\max(t_{h2,i})$	$\max(t_{a,i})$	VMT	ETE
Sinistra Idrografica	7	0,01	11,75	0,13	0,14	0,02	12,05	19,05
Destra Idrografica	7	0,01	11,75	0,05	0,03	0,02	11,86	18,86

Tabella 2.8 - Stima del tempo di evacuazione: risultati in termini di ore per la città di Lodi

I tempi di evacuazione stimati per entrambe le macro aree sono simili. Dovendo considerare un fattore di sicurezza nel caso si verificassero ritardi con conseguente probabile fallimento dell'evacuazione, si suggerisce di evacuare la città di Lodi con 24 ore di anticipo sulla piena.

È stata condotta un'analisi sull'evoluzione temporale della piena osservando, per istanti temporali di 1 ora, le mappe di pericolosità elaborate con il modello idraulico 2D per questo scenario di evento (Gattai, 2019). Da questa analisi risulta che il sistema di percorsi di evacuazione, della macro area Sinistra Idrografica, entra in crisi nella Zona 8 per t = 50 ore mentre per la Destra idrografica t = 63 ore. Per cui, considerando ETE stimati in Tab. 2.8, i tempi di inizio dell'evacuazione sono rispettivamente t = 26 ore e t = 39 ore. In Tab. 2.9 sono riportati i livelli idrometrici al Ponete Napoleone Bonaparte, misurati direttamente sulle mappe e rispettivamente in base agli istanti temporali di riferimento per garantire un'evacuazione sicura.

	Sinistra Idrografica		Destra Idrografica	
	t = 50 ore	t = 26 ore	t = 63 ore	t = 39 ore
h_{mean} [m]	3,15	2,60	4,18	2,70
$Z_0 + h_{mean}$ [m s.l.m.]	67,55	67,00	68,58	67,10
h_{max} [m]	4,84	4,23	5,98	4,34
$Z_0 + h_{max}$[m s.l.m.]	69,24	68,63	70,38	68,74

Tabella 2.9 - Livelli idrometrici al Ponte Napoleone Bonaparte per istanti temporali utili all'evacuazione (Scenario più raro T=500 anni con difese strutturali in destra idrografica)

Successivamente si è ripetuta la stima VMT e ETE utilizzando tempi di allertamento differenti (very rapid warning e moderate rapid warning Fig. 2.18) Quello che si è riscontrato, ipotizzando lo stesso tempo di risposta residents/work, è che le il caso peggiore con VMT e ETE maggiori risulta essere il caso di allertamento moderate rapid warning mentre il caso migliore risulta essere quello con allertamento very rapid. Per cui, come in realtà era intuibile dal grafico Warning Time in Fig. 2.18, il caso studiato con allertamento multiple sources è il caso intermedio.
Infine è stata condotta un'analisi di sensitività per valutare la riduzione dei tempi VMT e ETE nei 3 casi, riportata in Tab. 2.10.

	SINISTRA IDROGRAFICA		**DESTRA IDROGRAFICA**	
	Riduzione VMT	**Riduzione ETE**	**Riduzione VMT**	**Riduzione ETE**
CASO PEGGIORE	–	–	–	–
CASO INTERMEDIO	7,67 %	4,49 %	7,78 %	5,04 %
CASO MIGLIORE	30,68 %	19,96 %	31,13 %	20,15 %

Tabella 2.10 - Riduzione VMT e ETE ipotizzando casi con modalità di allertamento differenti

2.3 Gestione dell'emergenza: Service Area

In questo paragrafo, invece, si è voluto studiare come la rete di trasporto stradale influisce sui servizi critici relativi all'emergenza, in base alle mappe di pericolosità (Paragrafo 2.2.1) e al modello di traffico (Paragrafo 2.2.2) utilizzati in questo caso studio.
Per perseguire l'obiettivo, si è valutata l'accessibilità di determinati servizi critici indispensabili per l'emergenza, in due condizioni:

- Condizione ordinaria, cioè in assenza di zone allagate;
- Condizione alluvione, cioè in presenza di zone allagate.

Le ipotesi alla base di queste condizioni e le conseguenze sulla rete di trasporto stradale in termini di velocità nelle due condizioni sono state descritte nella definizione del modello di traffico (paragrafo 2.2.2).

A partire dal Piano di Protezione Civile Comunale e dalla testimonianza del Vicecomandante della Polizia Locale di Lodi, si sono identificati i servizi critici indispensabili per gestire l'emergenza alluvionale nel Comune di studio (Tab. 2.11).

Studiare l'accessibilità ad un servizio critico per mezzo di un sistema di servizi di rete di trasporto (modello di traffico), significa individuare una regione spaziale che copre tutte le strade accessibili entro un tempo di impedenza specificato. Ad esempio, dato un punto sulla rete, si identificano tutte le strade accessibili che collegano quel punto con il resto della rete entro cinque minuti, e quindi tali strade così identificate rappresentano la service area di 5 minuti.

SERVIZIO CRITICO	INDIRIZZO
AREA AMMASSAMENTO SOCCORITORI E RISORSE	Piazzale degli Sports
CARABINIERI	Via San Giacomo
CARABINIERI	Via Tito Fanfulla, 6
CARABINIERI – COMANDO PROVINCIALE LODI	Piazza Caduti Nassyria
CROCE BIANCA	Piazzale degli Sports
CROCE ROSSA ITALIANA – COMITATO LODI	Viale Dalmazia, 17
SEDE VOLONTARI PROTEZIONE CIVILE	Via Besana, 6
OSPEDALE MAGGIORE	Largo dei Donatori del Sangue, 1
POLIZIA LOCALE	Via Luigi Cadamosto, 30
VIGLI DEL FUOCO – COMANDO PROVINCIALE LODI	Viale Piacenza, 83

Tabella 2.11 - Indirizzo dei servizi critici in base alle fonti di Protezione Civile di Lodi

Valutare le service area implica dunque conoscere i dati del tempo di viaggio tra i servizi critici e i luoghi che si vogliono raggiungere entro un determinato tempo, in quanto le service area rappresentano l'accessibilità di un determinato servizio critico e quindi le strade della rete di trasporto che collegano qualsiasi punto a quel servizio entro un determinato tempo.
Per questa trattazione si sono considerati soltanto i mezzi adibiti al soccorso, ipotizzando che tutti questi siano dei mezzi 4x4 (4WD Cars).
Il modello di traffico in questo senso è fondamentale, ed in particolare risulta essenziale la corretta valutazione delle velocità di percorrenza degli archi.
Purtroppo, come già discusso nel Paragrafo 2.2.2, non è affatto banale stimare la velocità con cui i mezzi di soccorso percorrono gli archi del sistema reticolare stradale.
Si è scelto dunque di considerare due ipotesi di velocità:

1) Una velocità pari al 100% della velocità massima in condizioni di flusso libero
2) Una velocità pari all'80% della velocità massima, così da considerare eventuali condizioni di deflusso influenti come il traffico e le intersezioni.

Successivamente si sono condotte delle analisi di sensitività per capire quanta differenza ci sia tra una service area calcolata con 100% di velocità ($\alpha_{SPEED,SOS}$ = 1) e una service area calcolata con 80% di velocità ($\alpha_{SPEED,SOS}$ = 0,8).

Attraverso l'utilizzo del Network Analyst di ArcGIS, il modello di traffico risolve le Service Area per ogni tipologia di servizio critico.
In Tab. 2.12 si riportano le dimensioni delle service area in km^2 per ogni tipo di servizio critico, distinguendo fra la condizione ordinaria e la condizione alluvione, ed in base ai due $\alpha_{SPEED,SOS}$ considerati.

Tutte le service area sono state calcolate considerando quanto legiferato dalle norme italiane, vale a dire che la risposta del soccorso per le emergenze in aree urbane deve avvenire entro 8 minuti (GU n.126 30/5/1992).

Di seguito si riportano su mappa le service area dell'ospedale di Lodi (Fig. 2.21), nella condizione ordinaria e nella condizione alluvione in base alle diverse ipotesi di velocità, mentre per consultare le mappe delle altre tipologie di servizi si rimanda agli Allegati.

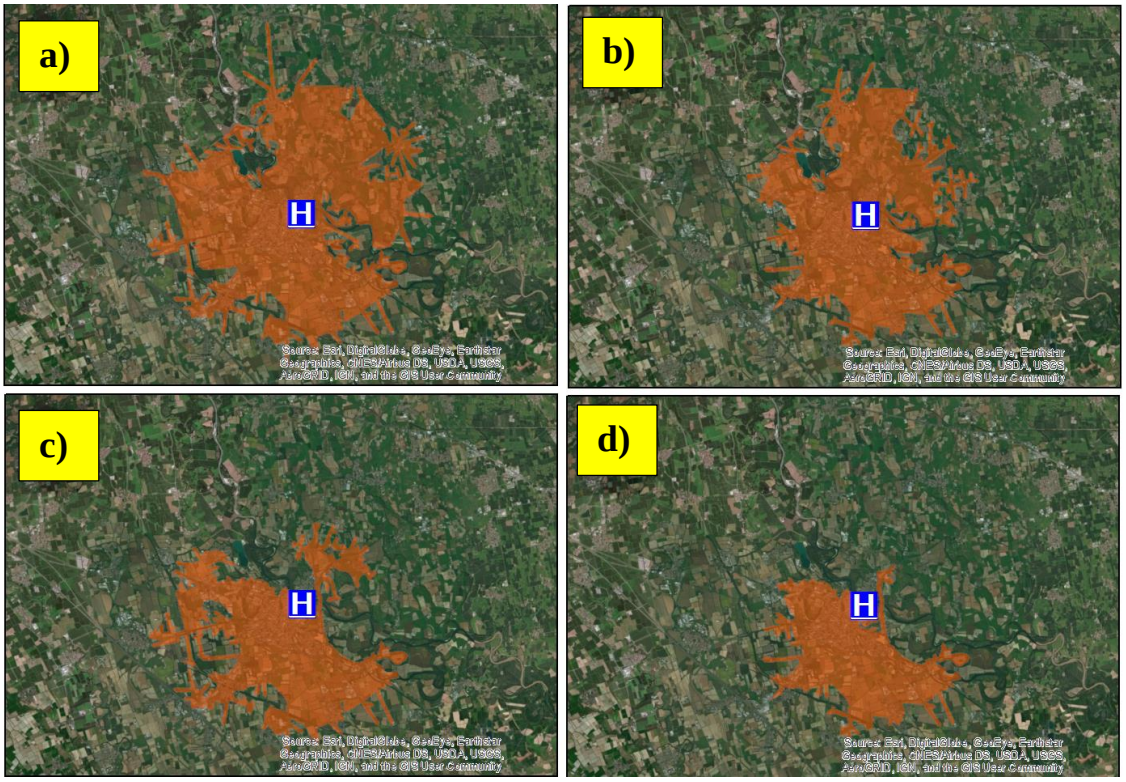


Figura 2.21 - Service Area Ospedale Lodi - a) Condizione Ordinaria 100% Vmax; b) Condizione Ordinaria 80% Vmax; c) Condizione Alluvione 100% Vmax; d) Condizione Alluvione 80% Vmax

La prima analisi di sensitività condotta ha riguardato la differenza di service area in base alle due ipotesi $\alpha_{SPEED,SOS}$. Tale analisi è riportata in Tab. 2.12.

Dall'analisi risulta che per alcune tipologie di servizi critici ci sono differenze marcate sulla copertura delle service area in base al tipo di ipotesi che si adotta sulle velocità. I calcoli confermano quello che intuitivamente è già noto: al diminuire della velocità di percorrenza, aumentano i tempi di percorrenza per cui la copertura delle service area si riduce.
La percentuale di riduzione tuttavia è sempre superiore del 10%.
Considerando ad esempio come servizio critico l'Ospedale, in base a quanto riportato in Tab. 2.12, la service area in condizione ordinarie è di 79,97 km^2 nel caso di $\alpha_{SPEED,SOS}$ = 1, mentre nel caso di $\alpha_{SPEED,SOS}$ = 0,8 la dimensione della service area è di 45,09 km^2, con una riduzione pari al 43,6%.
Successivamente si sono valutate le differenze fra lo scenario ordinario e lo scenario alluvione ed è stata condotta un'analisi di sensitività valutando le ipotesi $\alpha_{SPEED,SOS}$ (Tab. 2.12).

SERVICE AREA [km²]										
TIPO di SERVIZIO CRITICO	**CONDIZIONE ORDINARIA**			**CONDIZIONE ALLUVIONE**			**100% V_{MAX} DIFFERENZE SERVICE AREA ORDINARIA - ALLUVIONE**		**80% V_{MAX} DIFFERENZE SERVICE AREA ORDINARIA - ALLUVIONE**	
	100% V_{MAX}	80% V_{MAX}	Analisi sensitività $\alpha_{SPEED, SOS}$	100% V_{MAX}	80% V_{MAX}	Analisi sensitività $\alpha_{SPEED, SOS}$	km²	%	km²	%
OSPEDALE	79,97	45,09	43,6%	59,17	29,86	49,5%	20,8	26,0%	15,23	33,8%
STAZIONI AMBULANZE	82,96	67,43	18,7%	68,34	51,79	24,2%	14,62	17,6%	15,64	23,2%
VIGILI DEL FUOCO	81,86	71,54	12,6%	54,58	45,64	16,4%	27,28	33,3%	25,9	36,2%
CARABINIERI	84,91	62,08	26,9%	76,17	50,36	33,9%	8,74	10,3%	11,72	18,9%
POLIZIA LOCALE	76,63	48,7	36,4%	56,33	37,63	33,2%	20,3	26,5%	11,07	22,7%
AE SOCCORRITORI E RISORSE	77,15	64,37	16,6%	57,43	50,12	12,7%	19,72	25,6%	14,25	22,1%
VOLONTARI PC	71,56	55,16	22,9%	55,42	45,53	17,8%	16,14	22,6%	9,63	17,5%

Tabella 2.12 - Dimensioni Service Area per tipologia di servizio critico nelle due condizioni di scenario; Analisi di sensitività $\alpha_{SPEED,SOS}$; Differenze Service Area rappresentanti le riduzioni di accessibilità in seguito ad un'alluvione

I risultati confermano una riduzione della copertura del servizio critico in seguito ad un'alluvione.
In particolare, cambiando le condizioni di scenario si ha sempre una riduzione del 10%. Tale riduzione può arrivare fino a 36,2% nel caso delle service area dei Vigili del fuoco calcolate con un $\alpha_{SPEED,\ SOS}$ pari a 0,8.
Per le ipotesi e gli scenari considerati, il servizio critico che riscontra dunque riduzioni maggiori di copertura in caso di alluvione è quello dei Vigili del Fuoco.
Di contro la service area che riscontra riduzioni minori di copertura è quella dei Carabinieri. Tale risultato può essere giustificato dal fatto che il servizio critico dei Carabinieri è distribuito meglio sul territorio in quanto sono presenti più stazioni (più strutture critiche) rispetto agli altri servizi critici.

2.4 Conclusioni preliminari

I risultati dimostrano l'importanza di avere informazioni dettagliate, utili a descrivere l'estensione, la dinamica e le grandezze fondamentali di un evento alluvionale.
In particolare, il disporre di mappe di pericolosità in termini di profondità dei tiranti idrici, permette di valutare in maniera specifica la risposta della rete stradale e le conseguenze dell'alluvione in termini di mobilità in caso di evacuazione e di accessibilità in termini di copertura territoriale dei servizi critici, quali ospedali, Vigili del fuoco, Carabinieri e Volontari di Protezione Civile.
L'analisi integra le informazioni di rischio legate ad un ipotetico scenario alluvionale sull'Adda nel Comune di Lodi con un modello di traffico costruito e valutato ad hoc.
La caratterizzazione degli archi in termini di velocità e quindi in termini di tempi di percorrenza è fondamentale per una corretta valutazione della risposta emergenziale della rete stradale, sia in termini di condizioni ordinarie che in condizioni di alluvione.
L'utilizzo della Curva Velocità – Tiranti idrici (Arrighi, et al., 2019), ha fornito informazioni utili nella costruzione della rete del modello di traffico da utilizzare nello scenario alluvionale.
Tuttavia tale curva è basata su la velocità di flusso libero (FreeFlow Speed) dei veicoli, che non rappresenta del tutto la realtà, in quanto non considera variazioni del deflusso dovute a condizioni di traffico e a intersezioni stradali.
Si è cercato di risolvere questo problema assegnando velocità minori della FreeFlow Speed che tengano in considerazione le suddette variazioni di deflusso, sulla base di rapporti statistici e utilizzando un coefficiente di riduzione $\alpha_{SPEED,SOS}$ per i mezzi di soccorso.
Dal punto di vista della stima dei tempi di evacuazione si sono ottenuti risultati evidenti.
L'individuazione dei percorsi sicuri per l'evacuazione che minimizzano come campo di costo il tempo di percorrenza, permette di pianificare a priori un determinato sistema stradale di evacuazione con relativa stima dei tempi di evacuazione ETE che garantiscono una risposta adeguata anche durante un evento alluvionale.
La capacità portante del sistema di percorsi sicuri (ERS) influenza la riuscita dell'evacuazione in quanto permette di gestire la domanda del traffico che viene a crearsi in un evento alluvionale.

Nello specifico in questo caso studio, l'ERS individuato assorbe la domanda di traffico anche in relazione al fatto che i veicoli esposti non sono molti rispetto alla sua capacità portante, per cui non è necessario individuare un livello di priorità per evacuare prima una zona piuttosto che un'altra, né è necessario utilizzare mezzi di soccorso di supporto come pullman.
L'analisi dimostra come utilizzando un sistema di allertamento di tipo very rapid la stima del tempo di evacuazione ETE e il tempo di mobilizzazione dei veicoli VMT si riducono rispettivamente del 20% e del 30% rispetto ad un sistema di allertamento di tipo moderato.
I risultati calcolati rispetto ad un sistema di allertamento multiple sources garantiscono riduzioni dei tempi di evacuazione rispetto al caso di allertamento moderato.
Per ridurre ulteriormente i tempi di evacuazione è sicuramente utile avvicinarsi ad un sistema di tipo vary rapid migliorando il sistema di allertamento multiple soursces mediante l'utilizzo di televisioni, radio, siti internet, applicazioni Web & Mobile, sistemi VoIP, messaggi di massa alla popolazione e considerando sempre l'allertamento porta a porta con del personale.
Per uno scenario con tempi di ritorno di 500 anni e con difese strutturali in destra idrografica, la città di Lodi necessita di almeno 24 ore per evacuare in sicurezza 8 zone esposte a rischio suddivise in base alla loro posizione in destra e in sinistra idrografica.
I risultati di Tab. 2.9, suggeriscono che una volta stimati i tempi di evacuazione, è possibile evacuare in sicurezza monitorando i livelli idrometrici sul Ponte Napoleone Bonaparte e giocando così di anticipo sull'alluvione. Si precisa tuttavia che lo scenario utilizzato non tiene conto delle difese strutturali in Sinistra Idrografica, oggi in essere.
L'analisi delle service area ha evidenziato anche in questo caso risultati già ottenuti in altri studi (Arrighi, et al., 2019); infatti la copertura territoriale dei servizi critici individuati diminuisce in seguito ad uno scenario alluvionale rispetto allo scenario ordinario. Tale risultato, seppur intuitivo, evidenzia come sia importante continuare a garantire una determinata copertura territoriale che deve essere organizzata preventivamente, con modalità di intervento e responsabilità definite nel piano di emergenza per la mitigazione del rischio alluvionale.
Le analisi di accessibilità, in base alle analisi di sensitività condotte, indicano anche che una stima accurata della velocità di percorrenza e quindi dei tempi di viaggio è essenziale per un'analisi spaziale in cui il danno viene quantificato in base alla riduzione della copertura territoriale del servizio critico per l'emergenza.
Infatti, l'analisi di sensitività condotta utilizzando due ipotesi differenti di velocità di percorrenza dei mezzi di soccorso, mostra come ci siano riduzioni sempre superiori al 10% fino ad un massimo di 43,6% nel caso dell'Ospedale di Lodi.
Tale osservazione emerge anche valutando i risultati dell'analisi di sensitività condotta differenziando lo scenario ordinario da quello alluvionale.
I risultati mostrano una riduzione sempre superiore al 10% e al massimo pari a 36,2% per i Vigili del Fuoco.
Infine, si nota come la distribuzione territoriale delle strutture critiche dei Carabinieri, i quali sono gli unici servizi critici ad avere più di due punti strategici sul territorio, giustifichi la minima riduzione di copertura territoriale del servizio rispetto alle altre.

Capitolo 3

Danni alla rete nella pianificazione territoriale

Nel seguente capitolo si affronta il problema dei danni indiretti causati da un'alluvione, investigando la vulnerabilità sistemica nelle reti di trasporto stradale e proponendo una metodologia in grado di stimare i costi associati ad un eventuale interruzione di archi stradali causata da un'alluvione.
In particolare, tale studio si propone di fornire informazioni e strumenti di valutazione utili e integrabili con le analisi costi – benefici a supporto della mitigazione del rischio alluvionale.
Per le reti di trasporto stradale, come già descritto nel Capitolo 1, i danni alla rete possono essere diversi: in particolare il danno dovuto alle interruzioni può essere difficile da stimare in quanto impatta su tutti gli utenti che usufruiscono della rete, creando non solo ritardi nei percorsi ma anche ad esempio ritardi nelle consegne delle merci con impatti sulle attività commerciali di molte aziende.
La valutazione dei danni indiretti è dunque connessa alla stima dei flussi veicolari e a come questi cambiano al variare dei percorsi in seguito ad un evento alluvionale.
La metodologia applicata in questa trattazione è basata sulla modellazione di una rete di trasporto stradale in condizioni ordinarie e in condizioni alluvionali.
In particolare, tale metodologia mira ad individuare archi significativi da interrompere a seconda di diversi tipi di scenari e, attraverso l'utilizzo del modello di trasporto i – TraM, a calcolare la variazione dei carichi veicolari e degli indicatori di viaggio, come chilometri percorsi e tempi di viaggio, e quindi a stimare i danni indiretti associati alle interruzioni.
Nonostante l'area di studio scelta coincide con la Provincia di Lodi, nel senso che vengono studiate solo le interruzioni di quest'area, gli impatti vengono osservati su scala regionale.
Le ripercussioni dell'interruzione dei servizi e delle reti di trasporto possono estendersi al di fuori della zona di inondazione così come al suo interno e, in alcuni casi, gli impatti potrebbero essere geograficamente di vasta portata.
Lo schema di flusso riportato in Fig. 3.1 riporta le procedure della metodologia proposta, oggetto del capitolo.
Nello specifico, è stata modellata la rete stradale valutando in prima battuta l'esposizione della rete stessa alla pericolosità alluvionale fornita dalle mappe del PGRA.

A causa della vasta scala del problema e dell'indisponibilità di mappe della pericolosità in termini di tiranti idrici, risulta essenziale individuare ulteriori strumenti di supporto al fine di identificare gli archi stradali da interrompere.
La valutazione della vulnerabilità stradale in base ai carichi veicolari in condizione ordinarie può essere considerata come uno strumento di supporto, identificando gli archi con flusso veicolare maggiore come gli archi più vulnerabili.
L'assenza di mappe di pericolosità, in termini di tiranti idrici, è stato anche motivo della successiva analisi degli hot spot, che ha avuto l'obiettivo di individuare aree socio – economiche rilevanti e ipotetici flussi associati, in modo da presupporre maggiori danni indiretti in seguito ad un'eventuale interruzione di archi stradali a questi connessi. In particolare, attraverso un'analisi alla micro scala condotta sugli edifici delle aree rilevanti, sono stati individuati gli hot spot delle aree residenziali, delle aree dei servizi, delle aree istruzione e delle aree industriali – commerciali.
In determinate condizioni, l'interruzione di servizi critici, correlate alle tipologie di aree rilevanti individuate, può portare rapidamente al collasso dell'intero sistema.
Alcune strategie di gestione delle risorse, come la diversificazione delle catene di approvvigionamento, la riduzione dei cluster dell'industria e l'immagazzinamento delle forniture a livello locale, hanno dimostrato di ridurre l'entità dell'impatto iniziale e di ridurre la propagazione dell'interruzione attraverso il sistema, fornendo utili informazioni ai gestori del rischio di alluvioni e ai pianificatori (Brown, et al., 2016).
In Europa, sono state condotte una serie di valutazioni basate su approcci spaziali, come l'analisi spaziale multicriteri o indicatori compositi, per creare mappe a livello subnazionale che facilitano l'identificazione degli hot spot che offrono informazioni per la pianificazione degli interventi basata sul luogo (Poljanšek, et al., 2017).
Inoltre l'identificazione di hot spot fornisce informazioni strategiche relative alle dinamiche urbane e alla pianificazione urbana, che possono essere utilizzate per comprendere le strutture, e quindi le infrastrutture, maggiormente interessate (Arrighi, et al., 2019).
Infine, per un'individuazione più dettagliata degli archi da interrompere, si è scelto di considerare anche la compatibilità idraulica dei ponti stradali.
I danni ai ponti, infatti, sono uno dei fenomeni più frequenti nel corso delle piene in quanto, a causa della forte erosione connessa a questi eventi, si possono riscontrare cedimenti delle pile o delle spalle, distruzione dei rilevati di accesso e lesioni all'impalcato.
Durante un evento di piena i ponti sono soggetti a varie sollecitazioni idrodinamiche come lo scalzamento delle fondazioni delle pile o delle spalle, tracimazione o erosione di rilevati di accesso e altre varie sollecitazioni della struttura per cause diverse (insufficienza delle luci e ostruzione a causa del materiale trasportato).
Sulla base di queste considerazioni di esposizione e di vulnerabilità degli archi, sono stati calcolati degli indici di significatività basati su tre determinati gruppi di ipotesi differenti per pericolosità, esposizione e vulnerabilità.
Nello specifico, per ogni arco stradale, è stato calcolato un
L'area di studio è stata poi suddivisa in base ai tre bacini idrografici presenti sul territorio, sulla base dei quali sono stati individuati gli scenari di simulazione a seconda del tipo di risposta idrografica caratteristica di ogni bacino.

Dalle dodici simulazioni di scenario calcolate in condizioni alluvionali, cioè considerando delle interruzioni stradali rispetto alla condizione ordinaria, il modello di trasporto ha restituito la variazione dei carichi veicolari per ogni arco stradale da cui poi si sono calcolati gli indicatori di viaggio.
Infine, gli indicatori di viaggio calcolati sono stati elaborati e analizzati sia qualitativamente, attraverso le rappresentazioni dei flussogrammi, sia quantitativamente ottenendo così la stima dei danni indiretti in termini economici.
I passaggi della procedura metodologica sono descritti nel dettaglio nei paragrafi seguenti, dopo una breve caratterizzazione dell'area oggetto di studio.
A chiudere il capitolo, vi è un paragrafo conclusivo che discute i vantaggi e i limiti della metodologia.

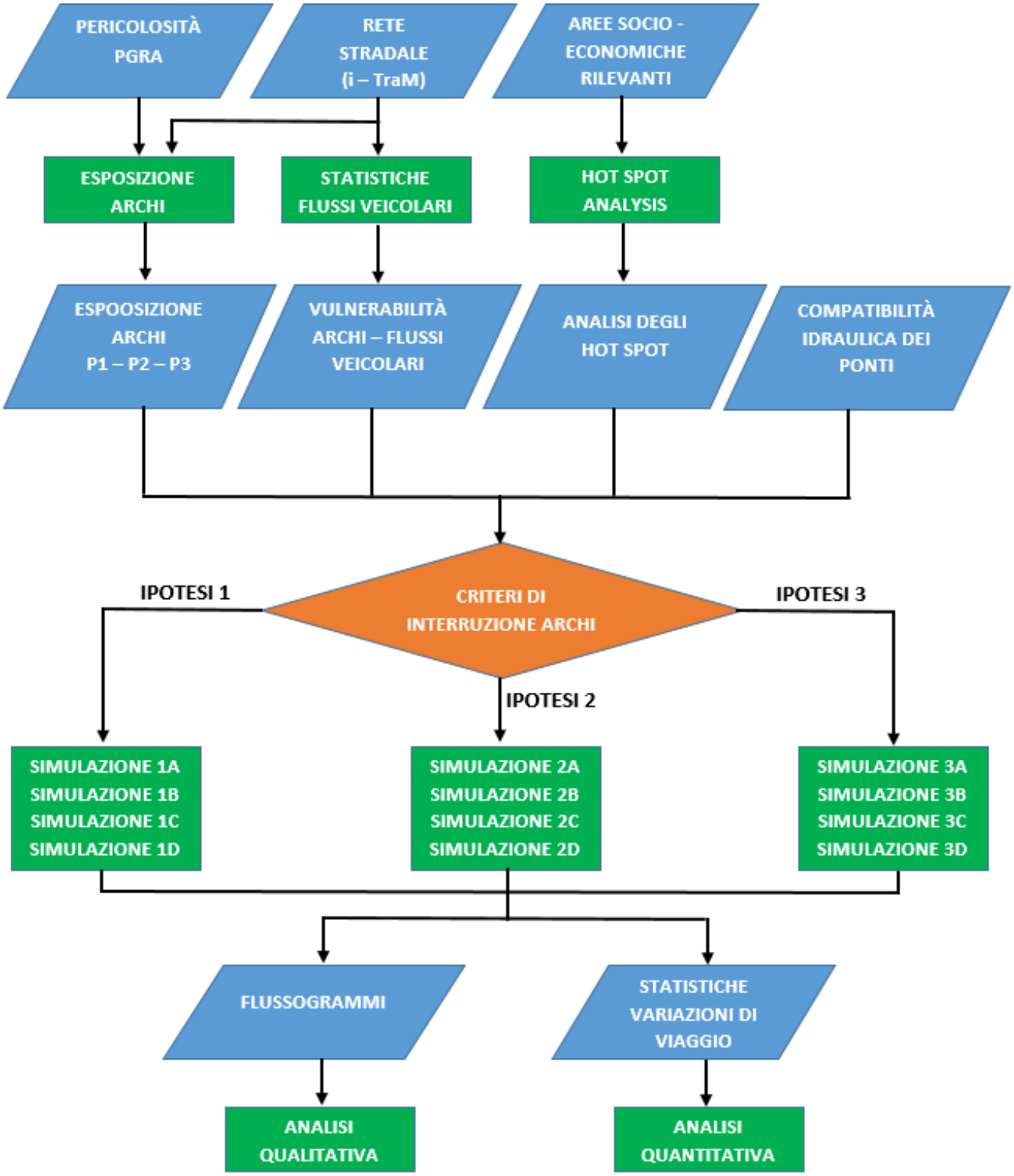
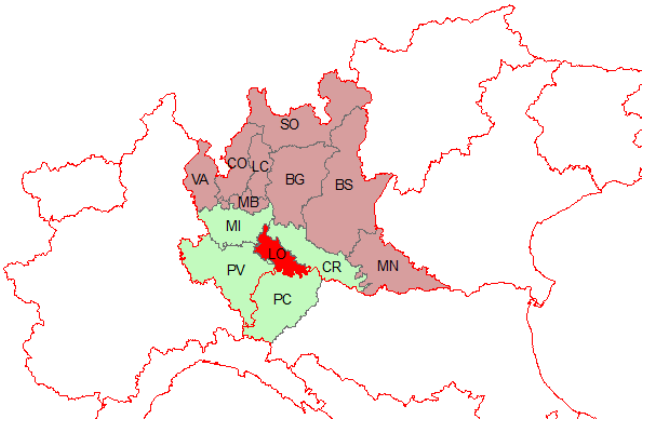


Figura 3.1 - Schema di flusso della metodologia utilizzata per la stima dei danni indiretti alle infrastrutture di trasporto

3.1 Caratterizzazione dell'area



La Provincia di Lodi è una provincia italiana della Lombardia di 230.373 abitanti, con capoluogo a Lodi. Poiché in questa trattazione si fa riferimento all'orizzonte temporale del biennio 2014 – 2015, si considera un numero inferiore di abitanti rispetto alla realtà pari a 229.339 abitanti[1].
Confina a nord con la Città Metropolitana di Milano, ad est con la Provincia di Cremona, a sud con la Provincia di Piacenza (Emilia – Romagna), ad ovest con la Provincia di Pavia e con l'exclave di San Colombano al Lambro (Città Metropolitana di Milano).
E' costituita da 60 comuni, cinque dei quali si fregiano del titolo di città: Lodi, Codogno, Casalpusterlengo, Sant'Angelo Lodigiano e Lodi Vecchio. Questi Comuni sono i più estesi territorialmente e con maggior numero di residenti[2] (Allegato B):

- Lodi, 44.649 abitanti;
- Codogno, 15.820 abitanti;
- Casalpusterlengo 15.250 abitanti;
- Sant'Angelo Lodigiano, 13.131 abitanti;
- Lodi Vecchio, 7.526 abitanti.

Tutti gli altri Comuni sono ad oggi di medio – piccole dimensioni e al di sotto dei 7.500 abitanti.
La Provincia di Lodi occupa un'area della Pianura Padana confinata tra tre fiumi principali vale a dire il Po e i suoi due affluenti, l'Adda e il Lambro.
Grosso modo, la Provincia si estende internamente a nord del fiume Po per circa 782 km^2, a est è delimitata dall'Adda mentre a ovest dal Lambro Meridionale e dal Lambro. Il confine nord è invece delimitato dal Torrente Molgora.
Il suo territorio quindi, di natura di tipo alluvionale e interamente compreso nel bacino idrografico del fiume Po, si divide tra il bacino del Lambro e il bacino dell'Adda.
Il Lambro Meridionale appartiene al bacino del Lambro, mentre al bacino dell'Adda appartengono il Torrente Molgora e il Tormo. Sono inoltre presenti numerosi canali artificiali tra i quali i principali sono il Canale della Muzza e il Brembiolo. Sono infine presenti numerose risorgive, per un totale complessivo di circa 2500 chilometri di corsi d'acqua.

[1] 229.339 abitanti è il valore medio riferito all'orizzonte temporale di riferimento del biennio 2014 – 2015. (Dati ISTAT)
[2] I residenti sono stati calcolati come valore medio riferito all'orizzonte temporale di riferimento del biennio 2014 – 2015. (Dati ISTAT)

Analogamente al resto della Pianura Padana, il clima del territorio lodigiano presenta peculiarità riconducibili all'area continentale. Le estati sono molto calde e spesso afose con temperature medie intorno ai 25° e massime intorno ai 35°. Gli inverni invece, sono spesso freddi con temperature che possono scendere anche sotto i -10°. L'elevata umidità è causa di nebbie intense e persistenti. Il perdurare delle nebbie invernali è dovuto anche dalla scarsa ventilazione della zona. Le precipitazioni non sono molto abbondanti, ma sono distribuite in modo uniforme nelle varie stagioni, anche se esse sono maggiori in primavera e in autunno. In inverno le precipitazioni sono, a volte, anche nevose, ma raramente di grande portata, mentre in estate sono frequenti i temporali spesso accompagnati da grandinate.
L'elevata presenza di corsi d'acqua unita alle caratteristiche di precipitazione del territorio fanno sì che la Provincia di Lodi sia a rischio idraulico.
Per la particolare morfologia che caratterizza questa zona, lo sviluppo economico si orienta verso la filiera agro-alimentare, in particolare in direzione della trasformazione, lavorazione e vendita dei prodotti di origine agricola. Il Lodigiano è infatti uno dei più importanti centri italiani per l'agricoltura e l'allevamento, tanto da costituire un polo di livello europeo nel settore zootecnico. Per quanto riguarda il profilo socio-economico, il Lodigiano è caratterizzato da notevoli differenze di stili di vita tra la zona a nord, che gravita maggiormente attorno a Milano, e la zona a sud, ancora immersa nei ritmi meno frenetici della campagna. Nel tessuto economico si registra inoltre una forte presenza di piccole e medie imprese artigianali ed industriali e numerose attività del settore terziario avanzato, soprattutto assicurazioni e banche (Provincia di Lodi, 2007).

3.2 Mappe di Pericolosità del PGRA

La valutazione della pericolosità consiste nella determinazione della distribuzione di probabilità degli eventi alluvionali descritto in termini di portata, estensione dell'area allagata, profondità del tirante idrico, velocità e durata.
L'analisi di pericolosità espressa in termini di profondità del tirante idrico è utilizzata spesso come variabili chiave per la valutazione del danno e del rischio di alluvione (Scorzini, et al., 2018).
A differenza del precedente caso studio affrontato nel Capitolo 2 su scala comunale, si ribadisce come in questo capitolo si voglia investigare il danno indiretto su scala regionale generato dall'interruzione di alcuni tratti della rete stradale provinciale in seguito ad eventi alluvionali.
Questo cambio di scala implica delle problematiche, in quanto ad oggi non si dispone di un modello in grado di analizzare la pericolosità su una scala così vasta in termini di tirante idrico e velocità, come richiesto dalla "Direttiva Alluvioni".
L'assenza di informazioni sulla profondità dei tiranti idrici comporta delle limitazioni allo studio di cui si discuteranno in seguito.
Per questo caso studio, si sceglie quindi di considerare le Mappe di Pericolosità presenti nel PGRA del distretto idrografico Padano (PGRA - d.p.c.m. 27/10/16), che rappresentano l'estensione dell'inondazione in base agli scenari:

- P1, scenario di scarsa probabilità di accadimento (T_R = 500 anni)
- P2, scenario di media probabilità di accadimento (100 anni < T_R < 200 anni)

- P3, scenario di elevata probabilità di accadimento (20 anni < T_R < 50 anni)

In Fig. 3.2 si riporta un estratto delle mappe di pericolosità dell'area di studio.

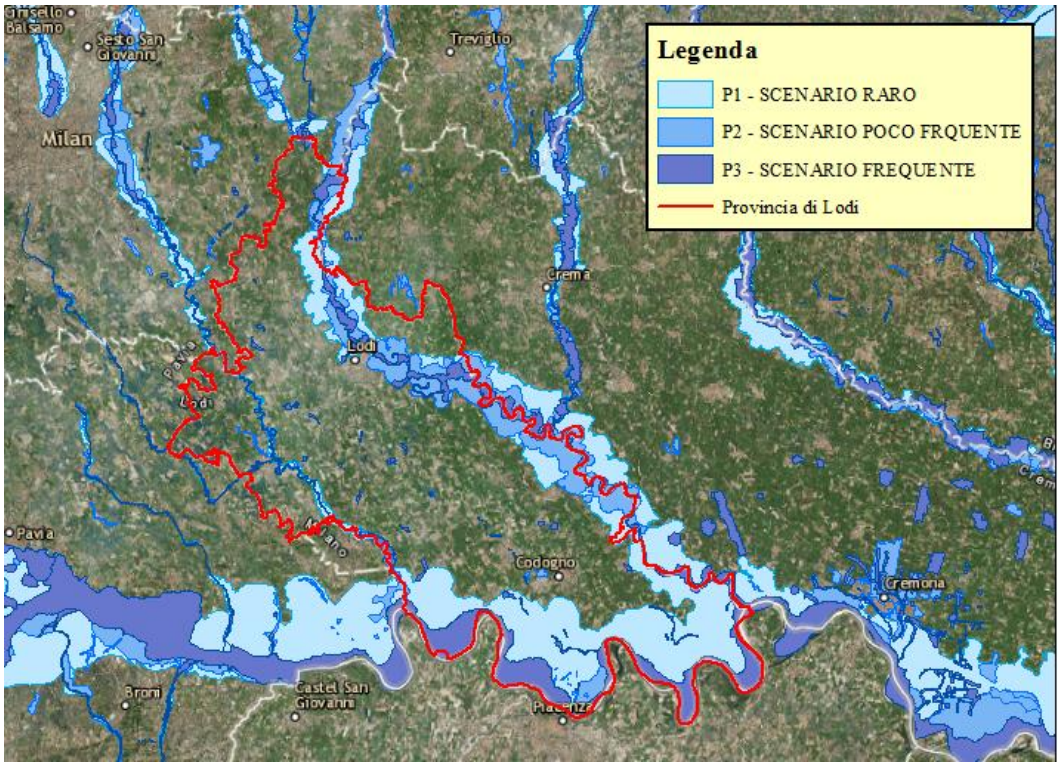


Figura 3.2 - Mappe di Pericolosità presenti nel PGRA del distretto idrografico Padano (PGRA - d.p.c.m. 27/10/16)

3.3 Rete Stradale: Modello di traffico i-TraM

Per le simulazioni modellistiche della rete di trasporto è stato utilizzato il modulo RL+T (Regione Lombardia e Ticino) del modello nazionale multimodale e multi scalare i – TraM (Italian Trasport Model), sviluppato da META srl in collaborazione con il Laboratorio di Politica dei Trasporti (TRASPOL) del Politecnico di Milano (Beria, et al., 2017).

Il modello è basato su una serie di operazioni e passaggi che permettono di calcolare i carichi veicolari di ogni arco stradale appartenente alla rete di trasporto.

Le operazioni preliminari, essenziali per ottenere buoni risultati, includono la *zonizzazione* (*zoning*) e la definizione dei *connettori zonali*.
La *zonizzazione* consiste nel dividere il territorio in zone; ogni zona identifica un'area del traffico che rappresenta un'aggregazione omogenea dei comuni in base alla loro area e popolazione, e che può anche non avere corrispondenza con i confini amministrativi italiani di un Comune o di una Provincia. Maggiore è la quantità di zone maggiore sarà il dettaglio del modello, tuttavia la scelta del numero di zone è in funzione della scala del problema e quindi del tipo di classe della rete (Tab. 3.1).
Ad oggi, a livello nazionale il modello i – TraM dispone di più livelli di dettaglio di zonizzazione:

- NUTS 4, suddiviso in 371 zone, il quale è più dettagliato del modello ministeriale ufficiale composto da sole 267 zone;
- NUTS 5, suddiviso in 1764 zone, il quale è più dettagliato di NUTS 4.

Il livello di zonizzazione NUTS 5 è stato creato per sopperire ai limiti del modello NUTS 4. Se il modello a 371 zone infatti, è perfettamente adatto per qualsiasi simulazione a lunga distanza, potrebbe non riuscire ad allocare correttamente i flussi per strade urbane – orbitali o altre situazioni specifiche.
In realtà il modulo RL+T (Regione Lombardia e Ticino), cioè quello utilizzato nel modello, comprende un numero di zone[3] pari a 1748 e quindi un livello di dettaglio più fino, paragonabile quasi ad un NUTS – 6.
Ogni zona possiede un centroide al quale corrisponde una domanda di trasporto espressa dalla matrice Origine – Destinazione (OD Matrix).
I *connettori zonali* sono quegli elementi che connettono i centroidi delle zone ai nodi della rete. La definizione dei connettori permette quindi di assegnare la domanda di trasporto fornita dalla OD Matrix al grafo della rete stradale, che rappresenta l'offerta di trasporto. Successivamente il modello di trasporto, genera e distribuisce sulla rete i flussi veicolari in base all'OD Matrix e in maniera iterativa finché la calibrazione del modello non è soddisfatta. A questo punto vengono restituiti i flussi veicolari assegnati alla rete come output del modello.
I flussi veicolari così ottenuti, sono preziosi in quanto rappresentano l'input di ulteriori valutazioni economiche da valutare in un'analisi costi – benefici (Beria, et al., 2017).

Il Database di i – TraM include diversi tipi di reti, caratterizzati secondo una determinata classe:

i. Rotte di navigazione
ii. Rete ferroviaria (inclusi rete tramviaria e linee metro)
iii. Rete stradale e autostradale
iv. Rotte di navigazione aerea
v. Oleodotti
vi. Connettori zonali
vii. Centroidi di zonizzazione
viii. Nodi

[3] Si evidenzia che soltanto nell'area di studio della Provincia di Lodi si sono considerate 126 zone.

Per questo studio sono state condotte simulazioni soltanto sulla rete stradale e autostradale, che di seguito verrà denominata rete i - TraM.
La rete stradale italiana comprende circa un milione di km. Di questi, il modello i – TraM comprende circa 88.000 km, descritto da 103.000 archi (*edges*) e 50.000 nodi (*junctions*). Come nel modello di trasporto costruito nel Capitolo 2, gli archi e i nodi sono gli elementi interconnessi tra loro che rappresentano il grafo stradale, in particolare ogni arco stradale è modellato da un arco e due nodi terminali.
Vista la sua estensione e le sue diverse funzioni, la rete stradale è stata divisa in cinque classi (Tab. 3.1), non correlate alle caratteristiche fisiche (piuttosto descritte da un parametro di tipo *TipoArco*), ma al loro criterio topologico di collegamento.

Classe	***Criterio topologico di collegamento***	***Area di Copertura***
2	Rete autostradale (Sempre presente)	Tutta Italia
3	Rete primaria, connette i centroidi provinciali (NUTS – 3 level)	Tutta Italia
4	Rete secondaria, connette i centroidi intermedi (NUTS – 4 level)	Tutta Italia
5	Rete di connessione, connette i centroidi locali (NUTS – 5 level)	Tutta Italia
6	Rete locale, connette in dettaglio centroidi locali (NUTS – 6 level)	Localmente completa (Piemonte, Lombardia, ecc.)

Tabella 3.1 - Tipi di classe delle rete stradali - Modello i - TraM (Beria et al. 2017)

A seconda della scala di dettaglio delle analisi che si vogliono condurre, risulta più conveniente considerare un tipo di classe piuttosto che un'altra e comunque in maniera aggregata considerando sempre il livello di classe di ordine superiore. Ad esempio se considero la classe 3 (NUTS – 3 level) considero contemporaneamente la classe 2 e così via; ecco perché in Tab. 3.1 è specificato che la rete autostradale è sempre presente nelle simulazioni modellistiche.
Lo shapefile della rete è completato dai parametri riportati in Tab 3.2, alcuni dei quali in parte sono stati immessi manualmente e in parte calcolati.

Una corretta caratterizzazione della rete (*TipoArco*) è fondamentale nella definizione per ogni arco stradale delle varie metriche e dei vari indicatori del modello, ovvero le velocità di percorrenza, i tempi di viaggio, i flussi dei veicoli equivalenti, i flussi dei veicoli leggeri e pesanti, ecc.
Per questo sono stati definiti molti tipi di strade, riassunti in Tab. 3.3 e descritti in dei fogli campione come quello riportato in Fig. 3.3.
In Tab. 3.4 è riportata la corrispondenza fra il tipo di arco stradale e quelle del Codice della Strada Italiano (D.Lgs n°285 del 30/04/2012), sulla base della quale sono stati poi calcolati alcuni attributi come le corsie, il contesto, la capacità e la velocità.

Attributo	*Descrizione*
Classe	Classe stradale, classificazione funzionale (Tab. 3.1)
TipoArco	Tipo di strada, attributo geometrico utilizzato per calcolare la capacità è la velocità di libera circolazione
Direzione	Senso di marcia del segmento stradale (unico F o doppio B)
Corsie	Numero di corsie della strada
Lungh	Lunghezza del segmento stradale
Anno_ini	Anno di apertura
Anno_fin	Anno di chiusura
Tar_A(/R)	Tariffa applicata (€/km per le strade a pedaggio, 0 per le altre strade)
Cbase_A(/R)	Capacità di base (calcolata)
V_calc_A(/R)	Velocità del segmento stradale (calcolato)
T_calc_A(/R)	Tempo di percorrenza del segmento stradale (calcolato)
Lunghurb…	Lunghezza del segmento stradale in contesto urbano, di pianura, di collina o di montagna
Veq_A(/R)	Flusso giornalieri di veicoli equivalenti del segmento stradale [veq/d]
Legg_A(/R)	Flusso di veicoli leggeri equivalenti del segmento stradale [veq/d]
Pes_A(/R)	Flusso di veicoli pesanti equivalenti del segmento stradale [veq/d]
…	Altri attributi utili per le simulazioni modellistiche

Tabella 3.2 - Principali attributi dello shapefile rete - Modello i – TraM (Beria, et al., 2017)

TipoArco	*Descrizione*	*Veicoli Autorizzati*	*Separazione dei flussi veicolari*	*Accessi Laterali*	*Sosta*	*Attraversamenti Pedonali*
20 – 29	Autostrade	Solo a motore	Carreggiate separate	Assenti	Solo su piazzale esterno	Assenti
30 – 39	Strade locali a disturbo ridotto	Solo a motore	–	Assenti	Solo su piazzale esterno	Puntuali ed attrezzati
40 – 49	Strade a disturbo locale medio	Tutti	–	Presenti	Longitudinale	Presenti
50 – 59	Strade a disturbo locale elevato	Tutti	–	Frequenti	Trasversale	Diffusi

Tabella 3.3 - Tipizzazione degli archi in base al livello di disturbo locale al deflusso automobilistico

45

Sezione stradale		***Disturbo laterale***	*medio*
Carreggiate	*Unica*	Accessi laterali	*presenti*
numero corsie /sdm	*1*	Sosta	*Longitudinale*
Larghezza corsie	*0*	Attr. Pedo	*Presenti*
Banchine	*no*		

Descrizione

Strada a disturbo locale medio, a semplice carreggiata ed una corsia per senso marcia di larghezza > 3,25 m, non dotata di banchine laterali

ESEMPI EXTRAURBANI

ESEMPI URBANI

Figura 3.3 - Foglio campione descrittivo del tipo di arco stradale. Esempio di strada a disturbo locale medio (Beria, et al., 2017)

Tipi	Descrizione	Categorie Codice della Strada		Limiti di velocità [km/h]	
		Ambito extraurbano	*Ambito urbano*	*Ambito extraurbano*	*Ambito urbano*
20 – 29	Autostrade	A_e	A_u	130	90
30 – 39	Strade locali a disturbo ridotto	B	D	110	70
40 – 49	Strade a disturbo locale medio	C	E	90	50
50 – 59	Strade a disturbo locale elevato	F_e	F_u	70	40

Tabella 3.4 - Corrispondenza delle categorie di arco stradale con il Codice della Strada Italiano

Di seguito sono riportati in rosso gli archi inclusi nell'area di studio e in grigio il resto della rete (Fig. 3.4), mentre l'Allegato A rappresenta in scala 1:80.000 gli archi inclusi nell'area di studio classificati in base a alla tipologia di arco come in Tab. 3.4.

La rete stradale ricadente nell'area di studio è composta da 2049 archi stradali, alcuni dei quali sono situati al di fuori della Provincia di Lodi in quanto il modello di trasporto tiene conto anche dei flussi veicolari esterni alla provincia.

Da un confronto con la rete stradale del Database Territoriale (DBT) regionale, si hanno differenze geometriche e quindi anche topologiche con la rete del modello, questo anche perché gli incroci della rete del modello sono semplificati rispetto alla rete DBT.
Per ogni arco stradale sarebbe utile conoscere il livello della strada identificando archi a raso, archi in galleria/sottopasso, archi su ponte/cavalcavia/viadotto. Questa informazione, unita ad una mappatura della pericolosità in termini di tirante idrici, consentirebbe di identificare gli archi che effettivamente sono allagabili e quelli che invece non lo sono.
Se infatti gli archi in galleria/sottopasso sono vulnerabili ad allagamenti, per gli archi su ponte/cavalcavia/viadotti, occorre condurre valutazioni di dettaglio sulla risoluzione del DTM e considerare le quote dei tiranti idrici e le quote del piano stradale di tali archi.
L'informazione del livello stradale tuttavia non è disponibile nel DB della rete i –TraM e, viste le differenze geometriche e topologiche con la rete DBT, non banalmente è integrabile. Considerando inoltre, l'indisponibilità di mappe della pericolosità in termini di tiranti idrici, si evidenzia come in questa trattazione non sia stato considerato il livello stradale.
Da un'analisi della letteratura, si è riscontrato che generalmente nei modelli di rete di trasporto si dà più enfasi alle interazioni topologiche tra gli archi della rete piuttosto che considerare la geografia del pericolo e dell'infrastruttura. Questo fatto porta alla perdita o all'assenza di informazioni cruciali utili a rendere questi sistemi più resilienti nei confronti di una tipologia di rischio, come quello alluvionale, che varia in base alla geografia del territorio (Barthelemy, 2011)

In futuro, ove ci sia la disponibilità di dati, potrebbe essere necessario ripetere questa analisi integrando le informazioni sul livello stradale in modo da poter esplicitare altre valutazioni sui risultati.

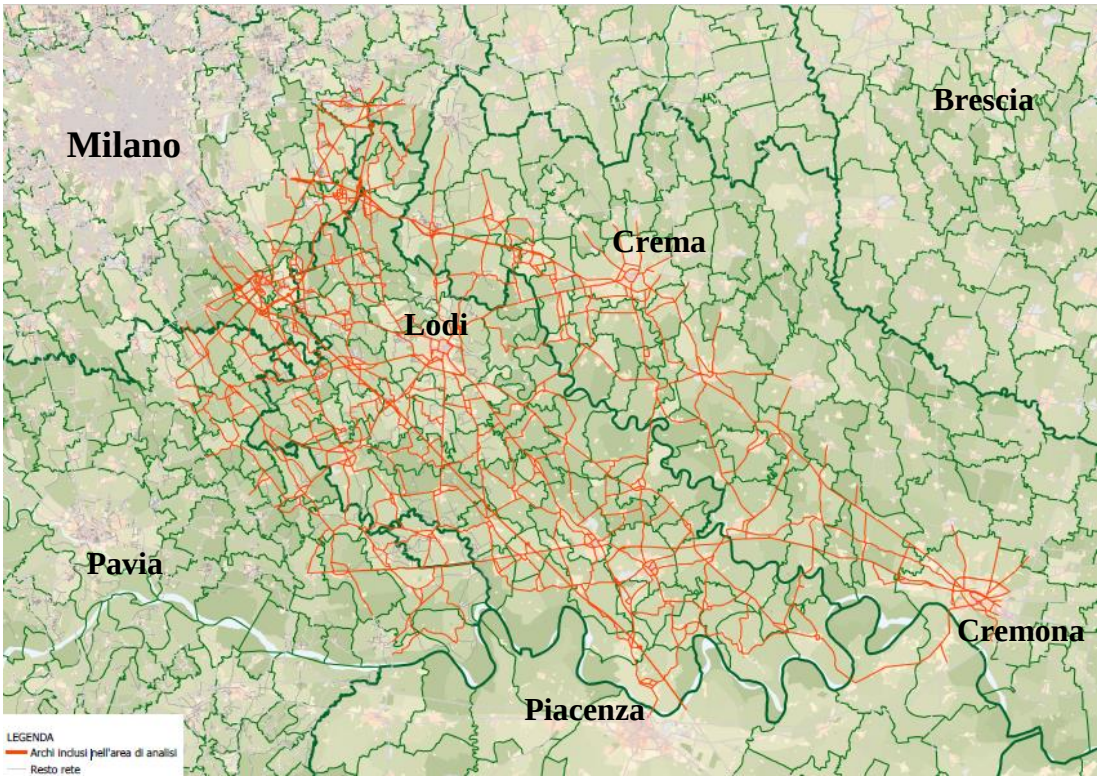


Figura 3.4 - Archi stradali inclusi nell'area di studio

3.3.1. Mappe di Esposizione degli archi

A partire dalle informazioni delle mappe della pericolosità e della rete del modello, descritte nei precedenti paragrafi, è stata valutata l'esposizione degli archi al pericolo di alluvione.
Considerando la caratterizzazione dell'area di studio, si sceglie di valutare le strade esposte al rischio idraulico a seconda degli ambiti territoriali del Reticolo Idrografico Principale (RP) e del Reticolo Idrografico Secondario di Pianura (RSP).
L'ambito territoriale RP è stato classificato in base ai tre fiumi principali presenti nella Provincia di Lodi, vale a dire l'Adda, il Lambro e il Po. Gli ambiti territoriali del Torrente Molgora e del Lambro Meridionale, sono stati inglobati negli ambiti territoriali dei tre fiumi principali in base alla loro foce. Il Torrente Molgora infatti, è stato classificato insieme al fiume Adda, in quanto esso sfocia nel Canale della Muzza che a sua volta sfocia nell'Adda, mentre il Lambro Meridionale è stato classificato insieme al Fiume Lambro.

Per quanto riguarda l'ambito territoriale RSP è stato classificato in base a due fiumi principale: l'Adda e il Lambro. Si è utilizzata questa classificazione non solo perché l'Adda e il Lambro rispondono ad un evento di piena con tempi simili e differenti rispetto al Po, ma anche perché molti dei canali che insistono in RSP sono canali che derivano dall'Adda o dal Fiume Lambro e/o sfociano in essi. Si è scelto dunque di classificare un canale nell'ambito territoriale RSP dell'Adda piuttosto che del Lambro considerando due buffer di 5 km dai due fiumi.
Si riporta in Tab. 3.5 l'esposizione degli archi negli ambiti territoriali RP e RSP ottenuta integrando le informazioni del PGRA.

Ambito Territoriale	**RP**			**RSP**				**Totale**
Bacino	*Adda*	*Lambro*	*Po*	*Adda*	*Lambro*	*Adda-Lambro*		
N° archi esposti	69	13	88	4	21	7		202

Tabella 3.5 - Esposizione degli archi negli ambiti territoriali RP e RSP

In Tab 3.6 si evidenzia l'esposizione degli archi in base alla tipizzazione della rete stradale.
Infine in Fig. 3.5 è rappresentata la Mappa di Esposizione degli archi stradali.

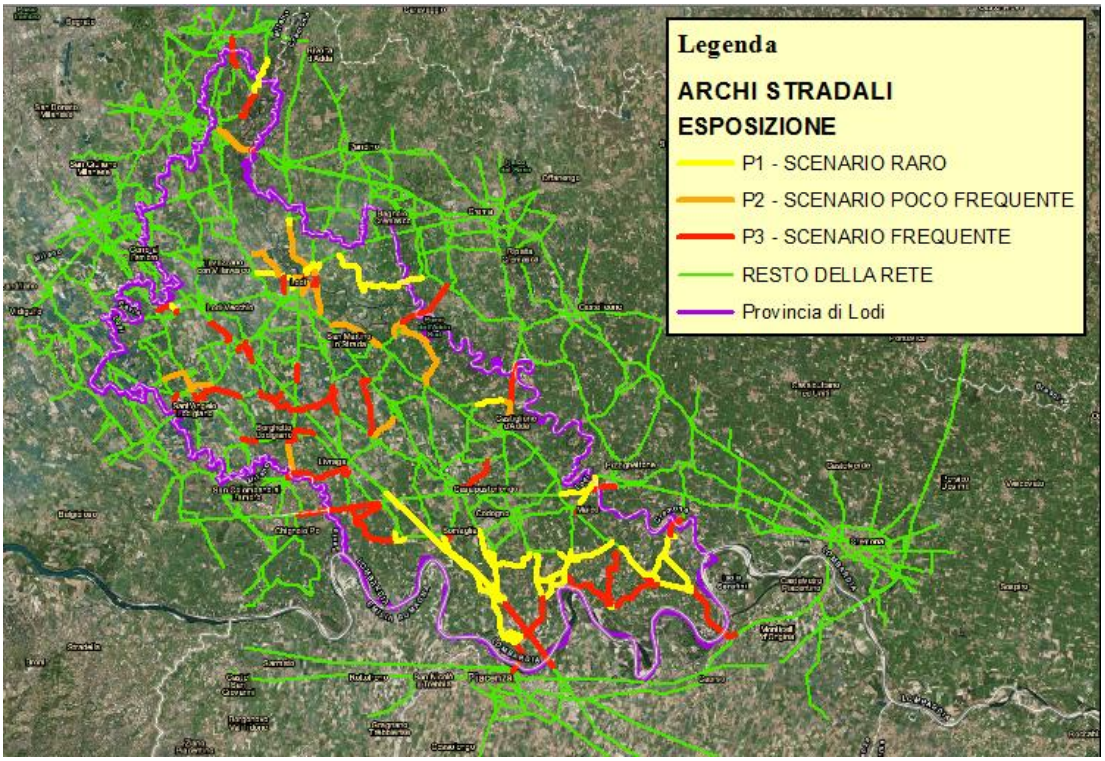


Figura 3.5 - Mappa di Esposizione degli archi stradali

Categorie Codice della Strada		Limite di velocità (km/h)		TipoArco	Descrizione	N° Archi
Ambito extraurbano	*Ambito urbano*	*Ambito extraurbano*	*Ambito urbano*			
A_e	A_u	130	90	23	Autostrada a doppia carreggiata e tre o più corsie per senso di marcia	6
A_e	A_u	130	90	29	Ramo di svincolo autostradale (con casello)	1
B	D	110	70	31	Strade a disturbo locale ridotto. Superstrada a semplice carreggiata con intersezioni a livelli sfalsati	6
B	D	110	70	32	Strade a disturbo locale ridotto. Superstrada a doppia carreggiata, con intersezioni a livelli sfalsati	12
B	D	110	70	35	Strade a disturbo locale ridotto. Superstrada o viale urbano a semplice carreggiata con intersezioni a raso (attrezzate)	5
B	D	110	70	36	Strade a disturbo locale ridotto. Superstrada o viale urbano a doppia carreggiata con intersezioni a raso (attrezzate)	13
C	E	90	50	41	Strada a disturbo locale medio, a semplice carreggiata ed una corsia per senso marcia di larghezza > 3,25 m, dotata di banchine laterali	25
C	E	90	50	45	Strada a disturbo locale medio, a semplice carreggiata ed una corsia per senso marcia di larghezza > 3,25 m, non dotata di banchine laterali	54
F_e	F_u	70	40	51	Strada a disturbo locale elevato, a semplice carreggiata ed una corsia per senso marcia di larghezza < 3,25 m, non dotata di banchine laterali	66
F_e	F_u	70	40	55	Strada a disturbo locale elevato, a semplice carreggiata ed una corsia per senso marcia di larghezza < 2,75 m, non dotata di banchine laterali	14
Totale N° Archi						**202**

Tabella 3.6 - Esposizione degli archi in base alla tipizzazione della rete (attributo TipoArco)

3.3.2. Vulnerabilità degli archi stradali – analisi dei flussi veicolari

Vista l'indisponibilità di informazioni dettagliate sulla pericolosità in termini di profondità dei tiranti idrici, basarsi soltanto sull'esposizione degli archi rispetto alle fasce di pericolosità indicate nel PGRA (Fig. 3.5 e Tab. 3.6) significherebbe interrompere 202 archi stradali, simulando degli scenari poco rappresentativi di un probabile evento alluvionale. Per cui è necessaria l'aggiunta di ulteriori valutazioni che permettano di individuare un numero di archi da interrompere più rappresentativo di un'eventuale scenario alluvionale.
A questo scopo, la metodologia sviluppata prevede di considerare la vulnerabilità degli archi stradali, considerando il flusso veicolare degli archi in condizioni ordinarie, cioè nel caso in cui non si verifichi alcuna interruzione stradale.
Una volta individuati gli archi esposti al rischio idraulico (Fig. 3.5 e Tab. 3.6), è stato fatto uno studio statistico sul flusso di veicoli equivalenti giornalieri dei soli archi esposti (202 archi stradali esposti).
In Tab. 3.7 si riportano alcune statistiche descrittive studiate e che risulteranno utili per le elaborazioni successive.

STATISTICHE DESCRITTIVE ARCHI ESPOSTI		
Minimo	0	veq/d
25° Percentile	249	veq/d
50° Percentile = Mediana	3.054	veq/d
75° Percentile	10.659	veq/d
Massimo	59.693	veq/d

Tabella 3.7 - Statistiche descrittive dei soli archi esposti al pericolo di alluvione

In Tab. 3.8, si riportano invece le stesse statistiche descrittive ricavate però su un campione di 33 archi stradali esposti su cui insistono ponti.

STATISTICHE DESCRITTIVE ARCHI ESPOSTI CON PONTI		
Minimo	0	veq/d
25° Percentile	2.918	veq/d
50° Percentile = Mediana	9.507	veq/d
75° Percentile	13.358	veq/d
Massimo	55.922	veq/d

Tabella 3.8 - Statistiche descrittive dei soli archi esposti al pericolo di alluvione su cui insistono ponti

Per l'individuazione degli archi stradali su cui insistono ponti si rimanda al paragrafo 3.5 in cui si discute la compatibilità idraulica dei ponti.

La mappa in Fig. 3.6 rappresenta le statistiche descrittive dei soli archi esposti al rischio idraulico in termini di flussi veicolari equivalenti giornalieri.

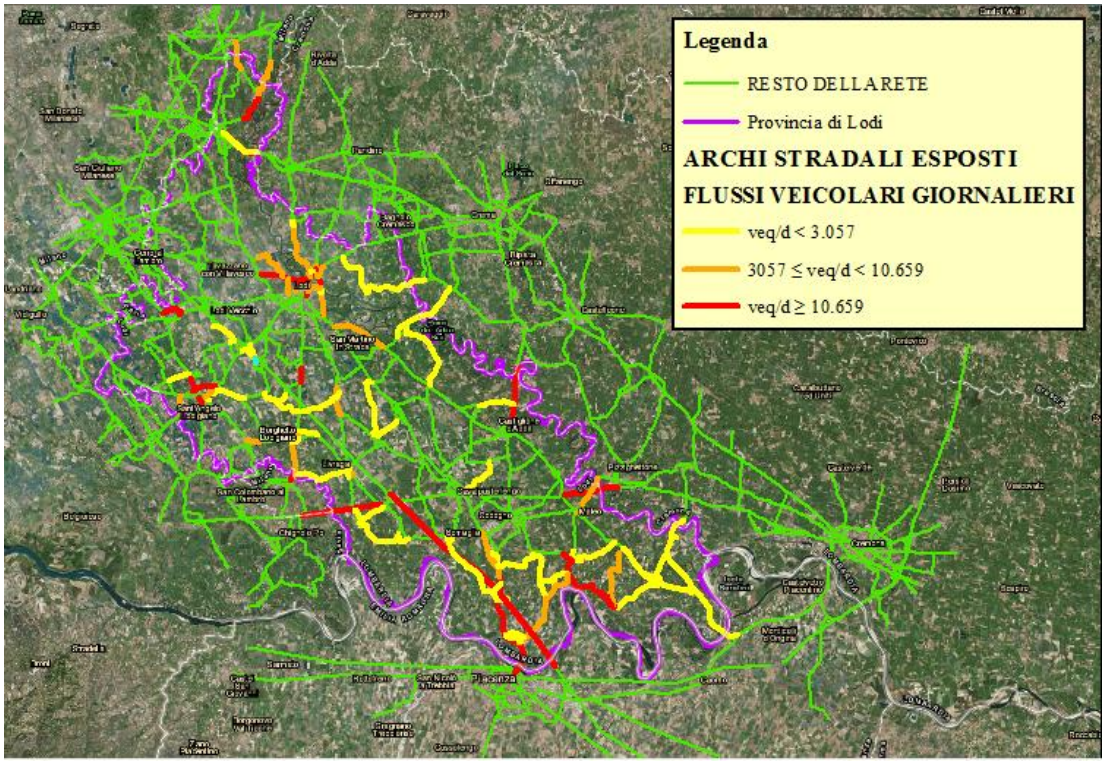


Figura 3.6 - Mappa di esposizione dei flussi veicolari statisticamente significativi

3.4 Aree Rilevanti: analisi dei cluster

Un'ulteriore analisi condotta sull'area di studio, riguarda l'individuazione di aree rilevanti della Provincia di Lodi sia dal punto di vista sociale che dal punto di vista economico, come strumento di supporto al fine di individuare gli archi stradali critici.
La funzione di connessione intrinseca in una rete di trasporto stradale, suggerisce infatti di individuare aree rilevanti dal punto di vista socio – economico che subirebbero danni indiretti rilevanti a seguito dell'interruzione di determinati archi stradali critici.
In questo paragrafo si spiega nel dettaglio come sono state individuate tali aree, cos'è e come stata condotta l'analisi dei cluster, attraverso l'Hot Spot Analysis (HSA), fino ad ottenere le Mappe degli Hot Spot.

3.4.1. Individuazione degli edifici residenziali, strategici e rilevanti

Per individuare le aree socio – economiche rilevanti, è stata condotta un'analisi alla micro scala individuando quegli edifici, e quindi quegli utenti, sensibili ad un eventuale interruzione degli archi stradali critici.
Si riporta in Tab. 3.9 l'elenco degli edifici differenziati per destinazione d'uso, nello specifico, sulla base delle direttive del Dipartimento di Protezione Civile, si evidenziano in rosa gli edifici strategici e in giallo gli edifici rilevanti.

Codice	Destinazione
S00 – Strutture per l'Istruzione	
S01	Nido
S02	Scuola Materna
S03	Scuola Elementare
S04	Scuola Media Inferiore
S05	Scuola Media Superiore
S06	Liceo
S07	Istituto Professionale
S08	Istituto Tecnico
S09	Università (facoltà umanistiche)
S10	Università (facoltà scientifiche)
S11	Accademia e Conservatorio
S12	Uffici Provveditorato e Rettorato
S20 – Strutture Ospedaliere e Sanitarie	
S21	Ospedale
S22	Casa di Cura
S23	Presidio Sanitario – Ambulatorio
S24	A.S.L. (Azienda Sanitaria)
S25	INAM – INPS e simili

Codice	Destinazione
S30 – Attività Collettive Civili	
S31	Stato (uffici tecnici)
S32	Stato (uffici amministrativi, finanziari)
S33	Regione
S34	Provincia
S35	Comunità Montana
S36	Municipio
S37	Sede Comunale decentrata
S38	Prefettura
S39	Poste e Telegrafi
S40	Centro Civico – Centro per riunioni
S41	Museo – Biblioteca
S42	Carceri
S50 – Attività Collettive Militari	
S51	Forze Armate (esclusi i Carabinieri)
S52	Carabinieri e Pubblica Sicurezza
S53	Vigili del Fuoco
S54	Guardia di Finanza
S55	Corpo Forestale dello Stato

Codice	Destinazione
S60 – Attività Collettive Religiose	
S61	Servizi parrocchiali
S62	Edifici per il culto
Attività Collettive Sportive e Sociali	
S66	Stadi
S67	Palestre
S70 – Attività per Servizi Tecnologici a Rete	
S71	Acqua
S72	Fognature
S73	Energia Elettrica
S74	Gas
S75	Telefoni
S76	Impianti per le Telecomunicazioni
S80 – Strutture per mobilità e trasporto	
S81	Stazione ferroviaria
S82 S83	Stazione autobus Stazione aereoportuale
S84	Stazione navale

Codice	Destinazione
Altre Strutture	
S90	Strutture con funzione residenziale
S91	Attività agricole, industriali e commerciali
S95	Sede di Protezione Civile Nazionale
S96	Sede di Protezione Civile Regionale
S97	Sede di Protezione Civile Provinciale
S98	Sede di Protezione civile comunale o intercomunale
S99	Sede di Associazioni di Volontariato

Tabella 3.9 - Elenco degli edifici strategici e rilevanti differenziati per destinazione d'uso (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2014)

Oltre agli edifici strategici e rilevanti, si potrebbe scegliere di considerare anche gli edifici residenziali, in quanto l'interruzione di archi stradali critici può creare impatti meno tangibili che influenzano coloro che vivono sia dentro che al di fuori della zona a rischio di alluvione (Penning-Rowsell, et al., 2013).

Infine si potrebbero considerano gli edifici di attività agricole, industriali e commerciali in quanto non solo potrebbero essere considerati come edifici rilevanti, ma soprattutto perché la perdita infrastrutturale e il danno indiretto che ne conseguono in caso di alluvione possono essere valutati considerando un impatto economico più ampio, che tenga in considerazione le attività agricole, industriali e commerciali allocate sia dentro che al di fuori della zona a rischio di alluvione (Penning-Rowsell, et al., 2013).
Vista l'indisponibilità di dati aggregati e consistenti, resta difficile considerare complessivamente gli edifici riportati in Tab. 3.9.
Si è scelto dunque di individuare le seguenti quattro tipologie di aree rilevanti dal punto di vista socio – economico:

1. Area Residenziale
2. Area Servizi
3. Area Istruzione
4. Area Industriale – Commerciale

Per ogni tipologia di area rilevante corrispondono una serie di edifici associati in base alla destinazione d'uso di Tab. 3.9. Ogni edificio è stato inoltre caratterizzato secondo un attributo caratteristico dell'edificio di seguito elencati:

- Superficie dell'edificio
- Numero di abitanti
- Numero di utenti che usufruiscono dell'edificio
- Posti letto
- Numero di alunni
- Ricavi delle vendite

Tipologia Aree Rilevanti	**Edifici Destinazione d'uso**	**Attributo Caratteristico**
Area Residenziale	Strutture Residenziali	Superficie
Area Servizi	Sedi Amministrative	N° Abitanti
	Ospedali	N° Posti Letto
	Carabinieri	N° Utenti
	Polizia	N° Utenti
	Guardia di Finanza	N° Utenti
	Vigili del Fuoco	N° Utenti
	Tribunale di Lodi	N° Utenti
Area Istruzione	Scuole dell'infanzia	N° Alunni
	Scuole Primarie	N° Alunni
	Scuole Secondarie di Primo Grado	N° Alunni
	Scuole Secondarie di Secondo Grado	N° Alunni
Area Industriale – Commerciale	Aziende – Codice ATECO	Ricavi delle vendite

Tabella 3.10 - Classificazione Aree Rilevanti e Edifici utilizzata in input

In Tab. 3.10 si riporta la classificazione delle aree rilevanti e degli edifici utilizzata in input per l'analisi dei cluster di questo caso studio.
Di seguito si riportano per ogni tipologia di area rilevante le ipotesi e le considerazioni utilizzate per aggregare i dati forniti da diversi DB.

1) Area Residenziale

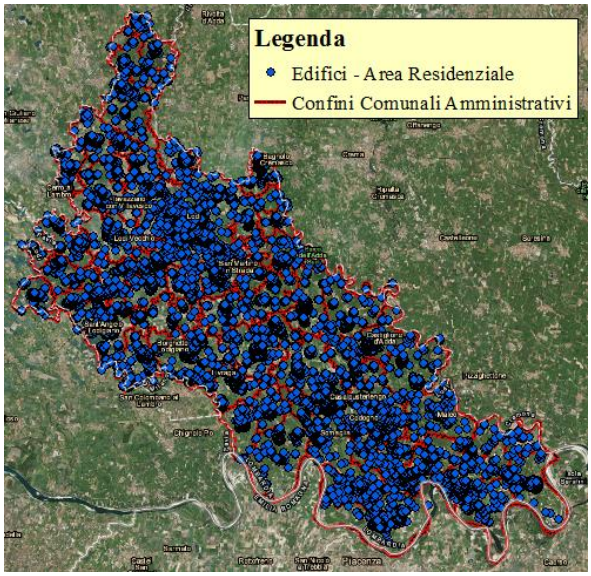


Figura 3.7 - Edifici appartenenti all'Area Residenziale

L'Area Residenziale è stata individuata utilizzando il DBT (Database Territoriale) della Provincia di Lodi. Lo shapefile dell'edificato è stato filtrato in base all'attributo *edifc_uso* selezionando il valore "Residenziale" o "Residenziale – Abitativa". Si sono ottenuti così tutti gli edifici ad uso residenziale della Provincia di Lodi e successivamente è stato individuato l'attributo *st_area_sh* come attributo caratteristico, in quanto rappresentante la superficie occupata dagli edifici.
In Fig. 3.7 sono mappati gli edifici appartenenti all'Area Residenziale.

2) Area Servizi

Tra gli edifici appartenenti all'Area Servizi distinguiamo le Sedi Amministrative come ad esempio le sedi della Prefettura, della Provincia e dei Municipi, gli Ospedali, le Attività Collettive Militari e la Sede del Tribunale di Lodi.
Anche questi edifici sono stati individuati utilizzando il DBT dell'edificato della Provincia di Lodi, il quale è stato integrato con le informazioni contenuti in altri DB al fine di individuare gli attributi caratteristici per ogni tipologia di edificio come riportato in Tab. 3.10.
A seconda del tipo di attributo caratteristico si è fatto riferimento al numero di abitanti di un Comune in base alla competenza territoriale del servizio, piuttosto che i posti letto per gli Ospedali.

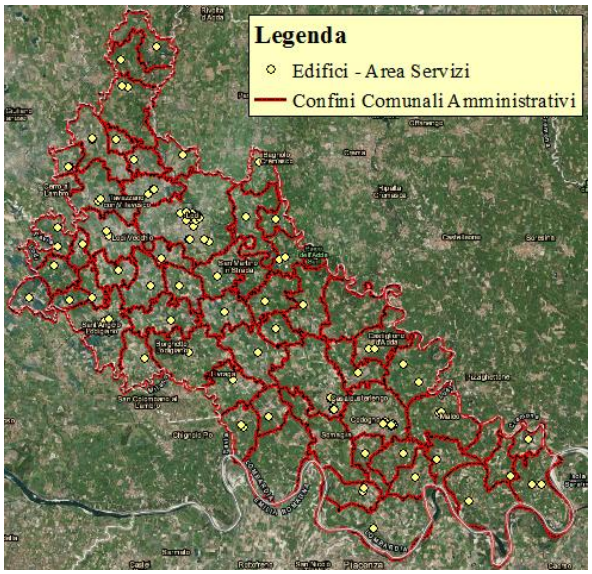


Figura 3.8 - Edifici appartenenti all'Area Servizi

Tutti gli attributi individuati fanno riferimento a dati mediati sul biennio 2014 – 2015, in accordo con il modello i – TraM il quale è in grado di fornire una stima affidabile dei carichi veicolari riferiti all'orizzonte temporale del suddetto biennio.
Gli Allegati B, C, D, E, F e G riportano nel dettaglio il valore dell'attributo caratteristico per ogni tipo di edificio.
In Tab. 3.11 sono riportate le fonti di DB utilizzati per individuare gli attributi caratteristici, mentre in Fig. 3.8 sono mappati gli edifici appartenenti all'Area Servizi.

Attributo Caratteristico	**Fonte**
N° Abitanti per Comune	http://dati.istat.it/
N° Posti Letto	http://www.dati.salute.gov.it/dati/
Competenza Territoriale	**Fonte**
Carabinieri	http://www.carabinieri.it/cittadino/informazioni/dove-siamo
Polizia	Non definita da fonti → N° Utenti = N° Abitanti Comune
Guardia di Finanza	http://www.gdf.gov.it/reparti-del-corpo
Vigili del Fuoco	http://www.vigilfuoco.it/sitiVVF/lodi/
Tribunale di Lodi	http://www.tribunale.lodi.giustizia.it/

Tabella 3.11 - Lista delle Fonti dei DB utilizzati

3) Area Istruzione

L'Area Istruzione è rappresentata dagli edifici scolastici, considerando le Scuole dell'Infanzia, le Scuole Primarie, le Scuole Secondarie di Primo Grado e le Scuole Secondarie di Secondo Grado. Rispetto alle Strutture di Istruzione riportate in Tab. 3.9 si sono scelte solo le suddette destinazioni d'uso in quanto dallo studio delle fonti non sono stati reperibili dei DB attendibili per i Nidi e le Università.
Gli edifici scolastici considerati sono in totale 175 su tutta la Provincia di Lodi.

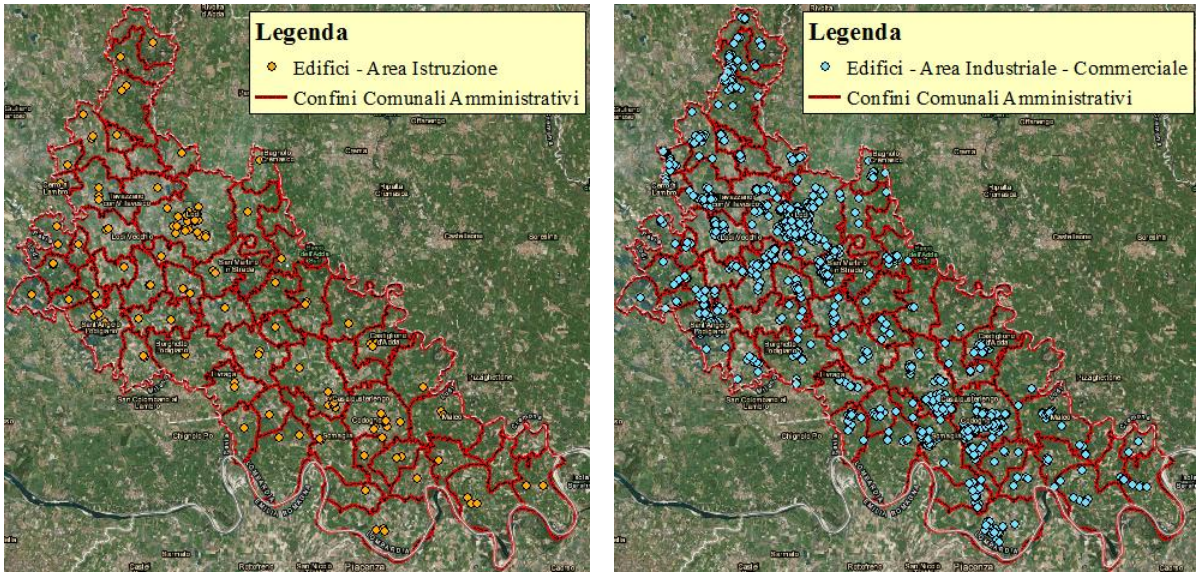


Figura 3.9 - Edifici appartenenti all'Area Istruzione (a sinistra). Edifici appartenenti all'Area Industriale - Commerciale (a destra)

Dal DB di riferimento fornito da Regione Lombardia, consultabile all'indirizzo web https://dati.lombardia.it/, è stato possibile mappare gli edifici scolastici (Fig. 3.9) in quanto ogni edificio scolastico era fornito di indirizzo e di coordinate geografiche.

4) Area Industriale – Commerciale

Per l'Area Industriale – Commerciale si sono utilizzati i dati forniti da AIDA (Database dell'Analisi Informatizzata delle Aziende Italiane).
Dal DB AIDA è possibile ottenere informazioni riguardo le Aziende Italiane.
Nello specifico è stata applicata la seguente strategia di ricerca (Fig. 3.10):

- Tutte le Aziende Italiane che abbiano sede legale e sede operativa in Provincia di Lodi;
- Informazioni sui dipendenti di ogni Azienda per gli anni 2014 e 2015
- Informazioni sui ricavi delle vendite di ogni Azienda espressi in migliaia di euro [10^3 €] per gli anni 2014 e 2015;
- Informazioni riguardo il Codice ATECO 2007 di ogni Azienda.

Sia per le sedi legali che per le sedi operative, il DB AIDA fornisce l'indirizzo in termini di Regione, Provincia, Comune, Via, N° Civico.
Purtroppo, tuttavia, il DB AIDA fornisce le sole coordinate geografiche della sede legale, per cui non è immediato mappare le sedi operative.
Per il caso studio però, è necessaria la mappatura delle solo Aziende che hanno sede operativa nella Provincia di Lodi, in quanto queste sono quelle che avrebbero danni in caso di alluvione.
Tramite una procedura di Geocoding, è stato possibile mappare le aziende in base agli indirizzi delle Sedi Operative (Fig. 3.9), cioè è stato possibile associare per ogni indirizzo delle corrispondenti coordinate geografiche.

Product name	Aida	
Aggiornamento	263	
Versione del Software	102.00	
Aggiornamento dei dati	13/12/2018 (n° 26301)	
Export date	15/12/2018	
Cut off date	31/03	
1. Regione, provincia, comune: 03098 - Lodi	2.647	2.647
2. Ricavi delle vendite (migl EUR): 2015, 2014, per almeno uno degli anni selezionati, min=0	1.041.900	2.247
3. Dipendenti: 2015, 2014, per almeno uno degli anni selezionati, min=0	1.038.944	2.243
4. All ATECO 2007 codes Ricerche Booleane : 1 E 2 E 3 E 4	1.774.162	2.241
	Totale	2.241

Figura 3.10 - Screenshot della Strategia di Ricerca utilizzata per estrarre informazioni dal DB AIDA

Le operazioni di Geocoding sono state condotte utilizzando il sito www.batchgeo.com, il quale si basa sugli algoritmi di georeferenziazione di Google Maps.
Per questo motivo è possibile che qualche Azienda non venga geo codificata correttamente, in quanto potrebbero esserci delle differenze di scrittura fra l'indirizzo fornito dal DB AIDA e quello fornito da Google Maps (es. Piazza invece di P.zza e viceversa).

Per quanto riguarda la scelta dell'attributo caratteristico per le Aziende, poiché la maggior parte delle aziende è caratterizzata dall'attributo ricavi delle vendite si è deciso di caratterizzare le Aziende in base a questo attributo piuttosto che in base al numero dei dipendenti in quanto quest'ultimo non è presente per molte aziende.
Dunque, si sceglie di considerare solo le Aziende con ricavi delle vendite maggiori di zero.
Tra le Aziende mappate, si è scelto di considerare solo quelle appartenenti ai settori dell'Industria e del Commercio, cioè solo afferenti ai seguenti Codici ATECO:

- B: Estrazione di Minerali da Cave e Miniere;
- C: Attività Manifatturiere;
- D: Fornitura di Energia Elettrica, Gas, Vapore e Aria Condizionata;
- E: Fornitura di Acqua; Reti Fognarie, Attività di Gestione dei Rifiuti e Risanamento;
- F: Costruzioni;
- G: Commercio all'Ingrosso e al Dettaglio; Riparazione di Autoveicoli e Motocicli;
- H: Trasporto e Magazzinaggio.

In questa analisi si è scelto di non considerare le Aziende del settore dell'Agricoltura in quanto può non essere significativo identificare in maniera puntiforme tali Aziende, utilizzando le coordinate della sede legale o della sede operativa. L'elevata estensione dei terreni, dell'ordine degli ettari, fa sì che non abbia molto senso identificare tali aziende con dei punti e utilizzare degli attributi caratteristici paragonabili ai settori dell'Industrie o del Commercio.

Di seguito si riporta dunque un riassunto delle ipotesi e dei filtri applicati ai dati AIDA utilizzati nell'analisi di questo caso studio:

- Tutte le Aziende dei settori dell'Industria e del Commercio, in base alla classificazione dei Codici ATECO 2007;
- Tutte le Aziende con sede operativa geo codificate nella Provincia di Lodi;
- I ricavi delle vendite mediati sul biennio 2014 – 2015 come attributo caratteristico di ogni Azienda;
- Tutte le Aziende con i ricavi delle vendite maggiori di zero;
- Tutte le Aziende con numero di dipendenti maggiori di zero.

Al netto delle operazioni di Geocoding, di filtro e delle ipotesi precedentemente descritte, il numero di Aziende individuate sul territorio della Provincia di Lodi utili all'analisi è di 1928.
Si sottolinea, infine, come anche per l'Area Industriale – Commerciale si sia utilizzato lo stesso orizzonte temporale del Modello i – TraM, per cui gli attributi caratteristici sono stati mediati sul biennio 2014 – 2015.

3.4.2. Analisi dei cluster: l'Hot Spot Analysis

Poiché i sistemi informativi territoriali GIS consentono l'analisi e la visualizzazione di informazioni che possono aiutare nell'identificazione dei cluster e nella valutazione dell'esposizione di fattori ambientali (Poljanšek, et al., 2017), e visto che la normativa italiana individua i sistemi informativi territoriali come strumenti di supporto utili all'analisi del rischio idraulico, si è scelto di utilizzare il software ArcGIS per condurre l'analisi dei cluster.

Per individuare e analizzare i cluster si utilizza la procedura schematizzata in Fig. 3.11.
I passaggi della procedura per l'analisi dei cluster sono spiegati nel dettaglio nell'Appendice.
Si tratta di una procedura di analisi in cui ad ogni step si ottengono degli output necessari per la valutazione degli step successivi, ottenendo così l'ottimizzazione dell'analisi.
L'analisi dei cluster viene ripetuta per ogni tipologia di Area Rilevante.

Tutta la reportistica di output è riportata negli Allegati alla fine dell'elaborato.
La Tab. 3.12 sintetizza per ogni tipologia di Area Rilevante la reportistica di output corrispondente ad una determinata procedura.

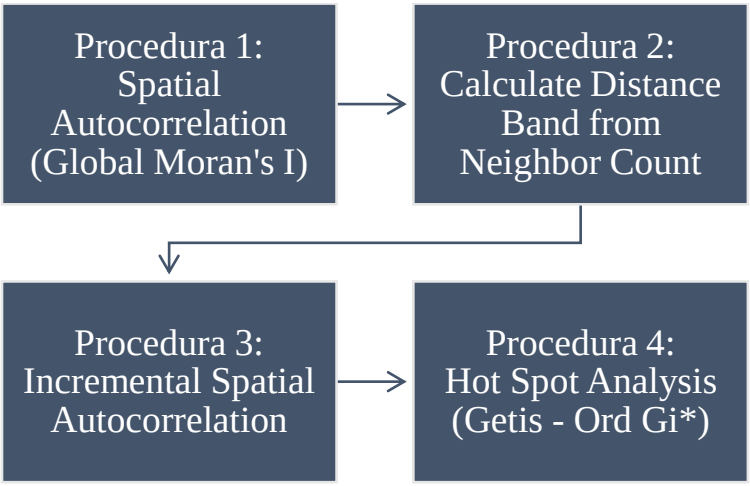


Figura 3.11 - Schema delle procedure per l'analisi dei cluster

Tipologia Area Rilevante	Procedura 1	Procedura 2	Procedura 3	Procedura 4
Area Residenti	Allegato N	Allegato R	Allegato R	Allegato V
Area Servizi	Allegato O	Allegato S	Allegato S	Allegato W
Area Istruzione	Allegato P	Allegato T	Allegato T	Allegato X
Area Industriale - Commerciale	Allegato Q	Allegato U	Allegato U	Allegato Y

Tabella 3.12 - Procedure analisi dei cluster: reportistica di output per tipologia di Area Rilevante

3.4.3. Mappe degli Hot Spot

A partire dai risultati della Procedura 4, ottenuti mediante l'utilizzo del *tool* Hot Spot Analysis Getis – Ord Gi* di ArcGIS e riportati negli Allegati V, W, X e Y, si procede interpolando i valori calcolati come output della Procedura 4 con il metodo IDW, per ogni tipologia di area rilevante.
Si ottengo così le mappe degli hot spot utili per le successive elaborazioni.
Essendo stata condotta un'analisi degli hot spot per ogni tipologia di Area Rilevante, si avrà una mappa degli hot spot per ogni tipologia di Area Rilevante.

La mappa degli hot spot dell'Area Residenziale in Fig. 3.12 evidenzia i centri abitativi in cui sono raggruppati edifici residenziali secondo l'attributo della superfice. Gli hot spot in questo caso rappresentano le aree in cui sono presenti raggruppamenti di case con elevati valori di superficie, mentre viceversa i cold spot rappresentano le aree in cui sono presenti raggruppamenti di case con piccoli valori di superficie. L'analisi sembra essere sensata, in quanto gli hot spot coincidono con i Comuni più popolosi della Provincia. Fra gli hot spot risaltano i centri di Lodi e di Lodi Vecchio, di Sant'Angelo Lodigiano, di Codogno e di Casalpusterlengo, i quali individuano una sorta di triangolo (*triangolo verde*

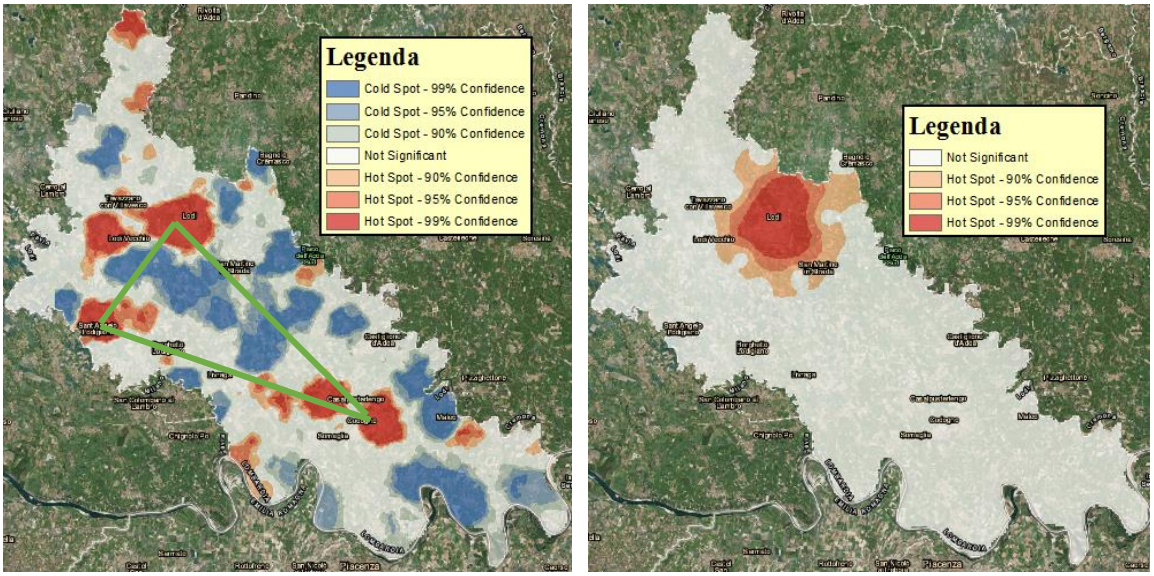


Figura 3.12 - Mappa degli hot spot dell'Area Residenziale (a sinistra); Mappa degli hot spot dell'Area Servizi (a destra).

in figura) all'interno del quale sono presenti dei cold spot. Tali cold spot, rappresentano i comuni meno popolosi, limitrofi ai precedenti grandi centri citati.
I risultati della Mappa degli hot spot dell'Area Servizi in Fig. 3.12 evidenziano come ci sia un unico hot spot nel Comune di Lodi. Tale risultato è giustificato dal fatto che la maggior parte dei servizi è presente nel Capoluogo provinciale, non solo perché Lodi è il Comune più popoloso, ma anche perché a Lodi vi è l'Ospedale più grande della Provincia, oltre ad essere presenti una serie di servizi amministrativi e di attività collettiva militare che interessano tutta la Provincia. Per cui in quella zona l'attributo caratteristico di ogni edificio è statisticamente significativo ed è più elevato rispetto all'attributo caratteristico degli edifici della restante Provincia, individuando così un Hot Spot. E' possibile dunque che si generi un flusso di persone che va verso il Comune di Lodi per questioni amministrative o sanitarie oltre ad esserci un flusso in uscita dal Comune di Lodi da parte di tutti gli attori appartenenti alle attività collettive militari, i quali da Lodi si spostano su tutta la Provincia per le loro attività. Un'eventuale interruzione di determinati archi stradali critici nel Comune di Lodi potrebbe dunque avere delle conseguenze negative per i flussi di persone generati dall'Area Rilevante dei Servizi.

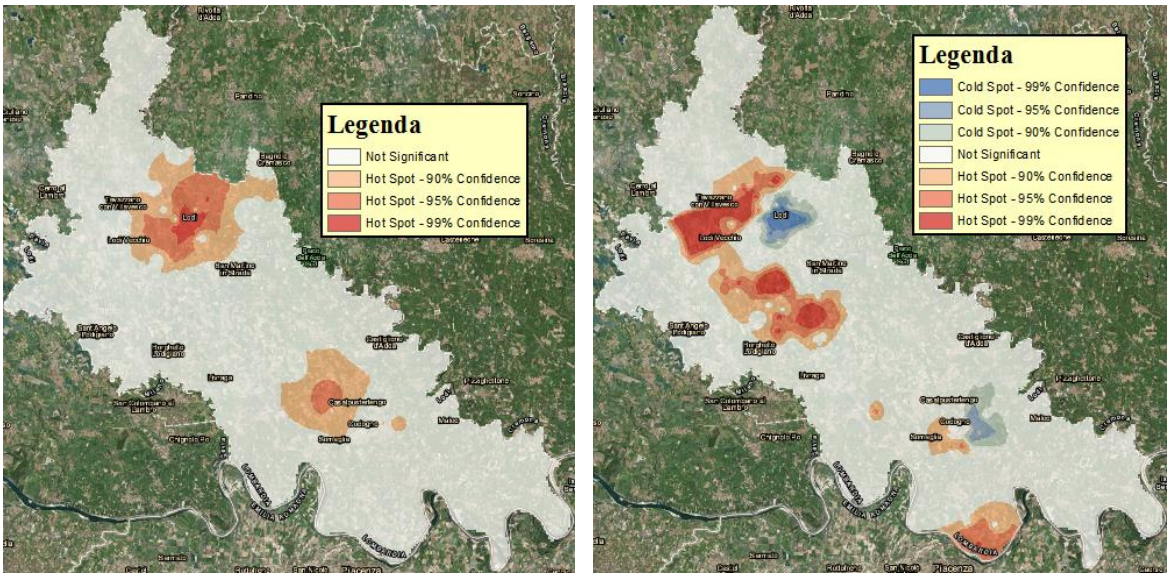


Figura 3.13 - Mappa degli Hot Spot dell'Area Istruzione (a sinistra); Mappa degli Hot Spot dell'Area Industriale - Commerciale

Analizzando invece la Mappa degli Hot Spot dell'Area Istruzione (Fig. 3.13) risultano due Hot Spot attorno al Comune di Lodi e attorno al Comune di Casalpusterlengo. Questo risultato è giustificato dal fatto che in questi centri risultano essere presenti dei grandi poli di Scuole Secondarie di Secondo Grado che attirano studenti dei Comuni limitrofi. Un'eventuale interruzione di archi stradali critici può dunque influire negativamente sulla viabilità degli studenti, causando dei danni indiretti.
In Fig. 3.13 è riportata anche la Mappa degli Hot Spot dell'Area Industriale Commerciale. I risultati, coerentemente con la realtà, mostrano una serie di Hot Spot di Aziende al di fuori dei centri più popolosi, in quanto generalmente le aree industriali sono al di fuori dei centri abitati. Viceversa, nei centri abitati di Lodi e di Codogno risultano esserci due cold spot, a dimostrazione del fatto che generalmente nei grandi centri abitati sono presenti attività di natura più commerciale che industriale e quindi, probabilmente con valori di ricavi delle vendite, più bassi. La presenza di cluster aziendali è sintomo di grande vulnerabilità del territorio, in quanto un'eventuale interruzione di archi stradali critici in seguito ad un'alluvione potrebbe generare ritardi nella consegna delle merci con conseguenti danni all'attività economica delle aziende.

In sintesi, l'Analisi dei Cluster suggerisce il generarsi di flussi bidirezionali di persone tra hot spot e cold spot, oltre che tra hot spot e cold spot appartenenti ad aree rilevanti differenti, da tenere in considerazione durante la valutazione degli archi stradali critici da interrompere, in quanto un'eventuale interruzione può causare danni indiretti di una certa entità agli utenti della rete di trasporto, a seconda della tipologia di area rilevante a cui l'utente è interessato e/o appartiene.

3.5. Mappe dei ponti compatibili

I criteri di compatibilità definiti all'art. 38 delle Norme di attuazione del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico stabiliscono che la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico e tutti i loro relativi interventi "non modifichino i fenomeni idraulici naturali e le caratteristiche di particolare rilevanza naturale dell'ecosistema fluviale che possono aver luogo nelle fasce, che non costituiscano significativo ostacolo al deflusso e non limitino in modo significativo la capacità di invaso, e che non concorrano ad incrementare il carico insediativo".
Tra i criteri di compatibilità idraulica, il franco idraulico minimo è un buon indicatore dell'adeguatezza del ponte, (AdBPo, 1999) anche se da solo può essere inadeguato a rappresentare le condizioni di vulnerabilità del ponte.
Il servizio di mappa "Sezioni trasversali corsi d'acqua - Topografia, portate, livelli, velocità", fornito da Regione Lombardia con verifica da parte dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, mostra l'ubicazione delle sezioni trasversali dei corsi d'acqua e ne rende disponibili i dati associati: dati relativi alla geometria dell'alveo, dei terreni circostanti e dei manufatti interferenti e dati idraulici.
Per quanto riguarda i manufatti interferenti, il livello "Compatibilità idraulica ponti" riporta una valutazione della compatibilità idraulica delle opere di attraversamento dei corsi d'acqua rispetto alle specifiche di riferimento definite nella Direttiva 2/99 emanata dall'Autorità di Bacino distrettuale del Fiume Po in attuazione degli articoli 19 e 38 delle Norme di Attuazione del PAI. Le fonti di queste informazioni sono gli Studi di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua predisposti a cura dell'Autorità di Bacino distrettuale del Fiume Po e i loro aggiornamenti.
I manufatti vengono distinti in tre categorie:

- Ponte adeguato (franco di sicurezza superiore o uguale a 1,0 m),
- Ponte non adeguato ma compatibile (franco di sicurezza inferiore a 1,0 m),
- Ponte non adeguato e incompatibile (franco di sicurezza inferiore a 1,0 m, rigurgito idraulico maggiore o uguale a 0,5 m e allagamento di una zona urbana o comunque insediata).

Si utilizza dunque lo shapefile scaricato dal Geo Portale di Regione Lombardia www.geoportale.regione.lombardia.it, e rappresentato in Fig. 3.14 per individuare in maniera più dettagliata l'oggetto della ricerca, cioè quegli archi stradali critici che se interrotti possono causare un danno sistemico alla rete.
Si evidenzia come nella Provincia di Lodi, la compatibilità dei ponti ha riscontrato esiti non del tutto positivi con un'elevata presenza di ponti con giudizio inespresso specie lungo l'Adda.

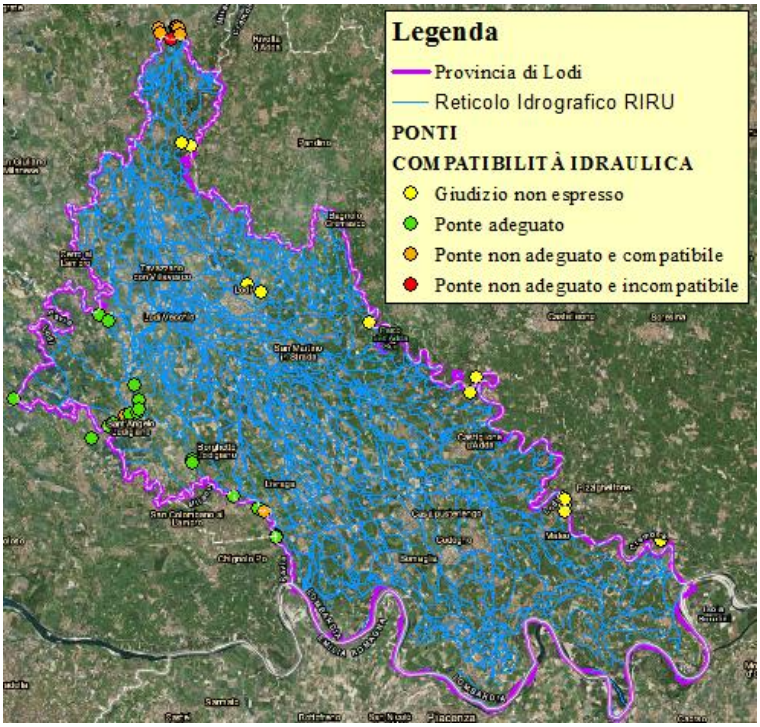


Figura 3.14 - Mappa dei Ponti che rispettano la compatibilità idraulica

3.6. Criteri di scelta e ipotesi per le simulazioni

Considerati i dati a disposizione discussi fino ad ora nei precedenti paragrafi, in questo paragrafo si riportano i criteri di scelta per l'individuazione degli archi stradali significativi da interrompere.
A partire dalla rete i – TraM, utilizzando le Mappe di Esposizione degli archi in termini di pericolosità e di flusso, le Mappe degli Hot Spot e la Mappa dei Ponti Compatibili, si sono individuate 12 simulazioni, ognuna delle quali differisce dalle altre in base agli archi stradali significativi interrotti, scelti a seconda di determinate ipotesi.
I criteri di scelta si basano sulle seguenti valutazioni:

- Esposizione dell'arco rispetto al PGRA;
- Vulnerabilità dell'arco rispetto a determinati percentili della distribuzione del flusso giornaliero di veicoli equivalenti dei soli 202 archi esposti, in condizioni ordinarie prima dell'evento di piena, di seguito denominata brevemente VEQ[4];
- Esposizione dell'arco rispetto alla presenza di Hot Spot;
- Esposizione dell'arco rispetto ai ponti compatibili a livello idraulico.

Considerando questi criteri, sono stati individuati 3 scenari ognuno dei quali è basato su diverse ipotesi.

[4] Con il termine VEQ si intende la distribuzione del flusso giornaliero di veicoli equivalenti riferita ad una dataset di archi, che può essere ad esempio il dataset dei 202 archi esposti al pericolo di alluvione o il dataset di 33 archi esposti al pericolo di alluvione e relativi ai ponti. Per ulteriori informazioni si rimanda al Paragrafo 3.3.2

Per ogni scenario, sono stati caratterizzati i 202 archi stradali esposti della rete in base ad un indice che tiene in considerazione simultaneamente i criteri di scelta e le ipotesi dello scenario. Di seguito si descrivono i 3 diversi scenari e le ipotesi su cui si basano.

3.6.1. Ipotesi di Scenario 1

In questo scenario, a partire dallo shapefile della rete del modello i – TraM, si sono considerate le seguenti ipotesi:

I. Gli archi esposti alle zone di pericolosità P3, P2, P1, secondo il PGRA;
II. Gli archi stradali con flusso dei veicoli equivalenti maggiore o uguale di 3.057 veq/d, corrispondente al 50° percentile della distribuzione VEQ.
III. l'Hot Spot Analysis riferita alle mappe IDW considerando significatività alfa=5% cioè livello di confidenza 1-alfa=95%. In particolare si sono considerati significativi:
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Residenziale;
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Servizi;
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Istruzione;
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Industriale – Commerciale.
IV. Gli archi relativi ai ponti non adeguati con franco ≤ 1 m o ai ponti con giudizio non espresso

La Tab. 3.13 riassume i criteri adottati per caratterizzare ogni arco della rete e per calcolare l'indice di significatività I in base al quale è stato scelto di interrompere o meno l'arco.

Per $I \geq 1$ l'arco è considerato significativo, dunque verrà spento.

Per $I < 1$ l'arco è considerato non significativo, dunque rimarrà acceso.

In questo scenario si considera l'esposizione degli archi in base al fatto che essi siano presenti almeno in un hot spot per almeno una tipologia di area.

L'interruzione o il ritardo di tali flussi possono generare danni indiretti agli utenti della rete di trasporto.

L'ipotesi di considerare l'analisi degli hot spot è confermata dai risultati, infatti non considerando l'hot spot analysis valutando solo I_1 si individuando 101 archi con un flusso medio di veicoli equivalenti pari a circa 13.966 veq/d mentre, considerando l'Hot Spot Analysis e quindi valutando I_1, si individuano 56 archi con un flusso medio di veicoli equivalenti pari a circa 15.033 veq/d.

L'aumento del flusso giornaliero medio di veicoli equivalenti sta a significare che l'hot spot analysis è utile per individuare con maggior precisione gli archi significativi più critici da interrompere, generando così degli scenari più plausibili e interessanti da investigare.

CRITERIO	INDICE			
A) L'arco è in zone allagabili in base al PGRA?	A			
	Se P1 A_1=1	Se P2 A_2=2	Se P3 A_3=3	A=0
B) L'arco ha un flusso equivalente dei veicoli maggiore o uguale al 50° percentile della VEQ?	B			
	SI = 1		NO = 0	
$\boldsymbol{I_1 = max(A_i) \times B}$				
C) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Istruzione, l'arco ricade in un Hot Spot?	C			
	SI = 1		NO = 0	
D) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Aziendale, l'arco ricade in un Hot Spot?	D			
	SI = 1		NO = 0	
E) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Servizi, l'arco ricade in un Hot Spot?	E			
	SI = 1		NO = 0	
F) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Residenze, l'arco ricade in un Hot Spot?	F			
	SI = 1		NO = 0	
$\boldsymbol{I_2 = C + D + E + F}$				
G) L'arco insiste sulla circolazione di un ponte con franco < 1 m o su un ponte in cui non è specificato il franco?	G			
	SI = 1		NO = 0	
$\boldsymbol{I = I_1 \times I_2 + G = max(A_i) \times B \times (C + D + E + F) + G}$				

Tabella 3.13 - Ipotesi di Scenario 1: criteri di scelta e Indice di significatività I

Gli archi su cui insistono ponti non adeguati con franco ≤ 1 m sono archi significativi che verranno spenti nella simulazione a prescindere dal valore del flusso veicolare equivalente e a prescindere dall'Hot Spot Analysis. Nella realtà infatti l'interruzione degli archi stradali relativi ad un ponte può avvenire in seguito alla decisione del Sindaco che, in quanto autorità di Protezione Civile locale, ha il potere di decidere di chiudere i ponti in caso di allerta idro-meteo di una certa severità e/o di raggiungimento delle soglie di preallarme e/o allarme.

Gli archi significativi desunti da questa analisi sono riportati in Tab. 3.14 divisi per ambito territoriale e per bacino.

Ambito Territoriale	**RP**			**RSP**				**Totale**
Bacino	*Adda*	*Lambro*	*Po*	*Adda*	*Lambro*	*Adda-Lambro*		
N° archi significativi	49	4	10	1	2	2		68

Tabella 3.14 - Ipotesi di Scenario 1: archi significativi per ambito territoriale e per bacino

Si precisa che le simulazioni sono state suddivise in base al bacino idrografico. La pericolosità dell'alluvione dipende dalle caratteristiche di bacino, per cui a seconda del bacino posso avere impatti differenti.
Il bacino dell'Adda e del Lambro hanno tempi di risposta simili ma diversi da quelli del bacino del Po, i quali risultano più lunghi.
Per cui si sono individuati quattro bacini di simulazione:

- Adda – Lambro, nel caso in cui l'alluvione coinvolga entrambi i bacini;
- Adda
- Lambro
- Po

Sulla base delle ipotesi e degli archi significativi di Tab.3.14 sono state calcolate le seguenti simulazioni riassunte in Tab. 3.15.

BACINO	ADDA	LAMBRO	PO	RSP	N° ARCHI SIGNIFICATIVI
SIMULAZIONE 1.a	×	×		×	58
SIMULAZIONE 1.b	×			×	52
SIMULAZIONE 1.c		×		×	8
SIMULAZIONE 1.d			×		10

Tabella 3.15 - Ipotesi di Scenario 1: simulazioni calcolate per bacino

In Fig. 3.15 si riportano in rosso gli archi significativi da interrompere e in rosa quelli non significativi da tenere accesi durante le simulazioni.

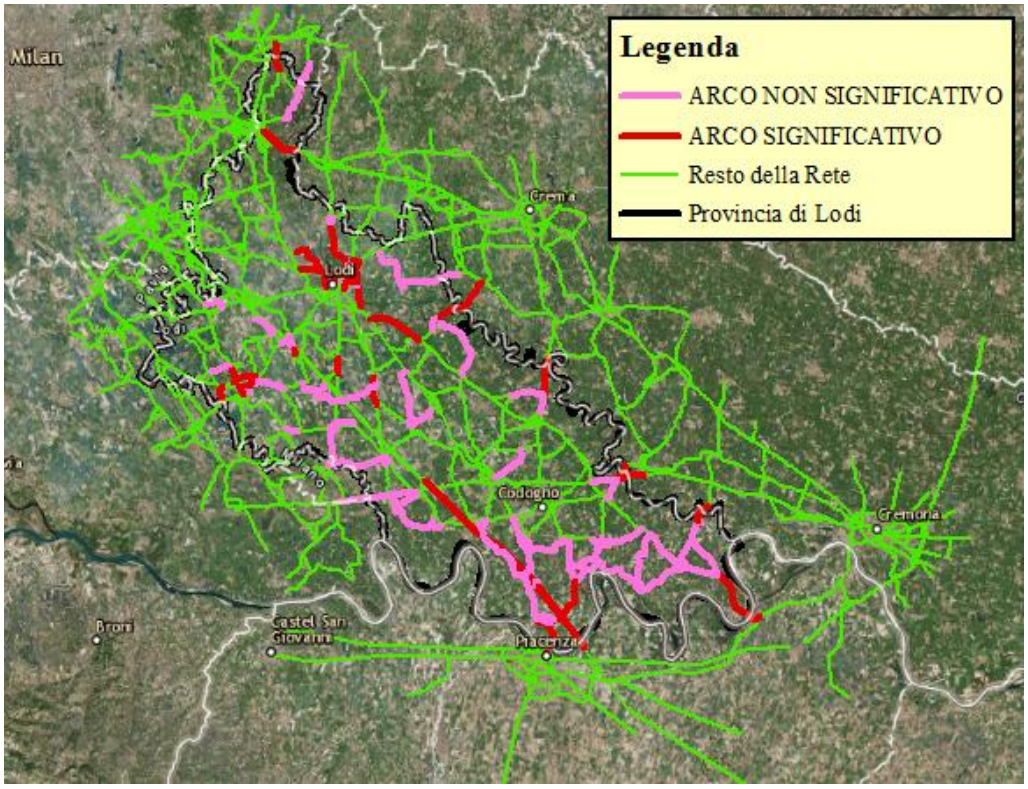


Figura 3.15 - Ipotesi di Scenario 1: archi significativi e archi non significativi

3.6.2. Ipotesi di Scenario 2

Lo Scenario 2 invece, partendo sempre dallo shapefile della rete i – TraM, considera delle ipotesi diverse rispetto all'ipotesi di Scenario 1 in termini di pericolosità e di percentile della distribuzione VEQ. Nello specifico considera:

I. Gli archi esposti alle zone di pericolosità P3 e P2 secondo il PGRA, escludendo gli scenari rari P1;
II. Gli archi stradali con flusso dei veicoli equivalenti maggiore o uguale di 10.659 veq/d, corrispondente al 75° percentile della distribuzione VEQ.
III. l'Hot Spot Analysis riferita alle mappe IDW considerando significatività alfa=5% cioè livello di confidenza 1-alfa=95%. In particolare si sono considerati significativi:
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Residenziale;
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Servizi;
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Istruzione;
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Industriale – Commerciale.
IV. Gli archi relativi ai ponti non adeguati con franco ≤ 1 m o ai ponti con giudizio non espresso

La Tab. 3.16 riassume i criteri adottati per caratterizzare ogni arco della rete e per calcolare l'indice di significatività I in base al quale è stato scelto di interrompere o meno l'arco.

CRITERIO	INDICE			
A) L'arco è in zone allagabili in base al PGRA?	A			
	Se P1 A_1= 0	Se P2 A_2=2	Se P3 A_3=3	A=0
B) L'arco ha un flusso equivalente dei veicoli maggiore o uguale al 75° percentile della VEQ?	B			
	SI = 1		NO = 0	
$\boldsymbol{I_1 = max(A_i) \times B}$				
C) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Istruzione, l'arco ricade in un Hot Spot?	C			
	SI = 1		NO = 0	
D) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Aziendale, l'arco ricade in un Hot Spot?	D			
	SI = 1		NO = 0	
E) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Servizi, l'arco ricade in un Hot Spot?	E			
	SI = 1		NO = 0	
F) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Residenze, l'arco ricade in un Hot Spot?	F			
	SI = 1		NO = 0	
$\boldsymbol{I_2 = C + D + E + F}$				
G) L'arco insiste sulla circolazione di un ponte con franco < 1 m o su un ponte in cui non è specificato il franco?	G			
	SI = 1		NO = 0	
$\boldsymbol{I = I_1 \times I_2 + G = max(A_i) \times B \times (C + D + E + F) + G}$				

Tabella 3.16 - Ipotesi di Scenario 2: criteri di scelta e Indice di significatività I

Per I ≥ 1 l'arco è considerato significativo, dunque verrà spento.
Per I < 1 l'arco è considerato non significativo, dunque rimarrà acceso.
Anche in questo scenario si considera l'esposizione degli archi in base al fatto che essi siano presenti almeno in un hot spot per almeno una tipologia di area e anche qui, come nell'ipotesi di Scenario 1, l'utilità di considerare l'Hot Spot Analysis è supportata dai risultati.
Infatti non considerando l'Hot Spot Analysis, valutando solo I_1 si individuando 28 archi con un flusso medio di veicoli equivalenti pari a circa 18.863 veq/d mentre, considerando l'Hot Spot Analysis e quindi valutando I1, si individuano 16 archi con un flusso medio di veicoli equivalenti pari a circa 22.767 veq/d.
Gli archi su cui insistono ponti non adeguati con franco ≤ 1 m sono archi significativi che verranno spenti nella simulazione a prescindere dal valore del flusso veicolare

equivalente e a prescindere dall'Hot Spot Analysis, in accordo con le stesse motivazioni spiegate nell'Ipotesi di Scenario 1.
Gli archi significativi desunti da questa analisi sono riportati in Tab. 3.17 divisi per ambito territoriale e per bacino.

Ambito Territoriale	**RP**			**RSP**				**Totale**
Bacino	*Adda*	*Lambro*	*Po*	*Adda*	*Lambro*	*Adda-Lambro*		
N° archi significativi	23	2	4	–	1	1		31

Tabella 3.17 - Ipotesi di Scenario 2: archi significativi per ambito territoriale e per bacino

Sulla base delle ipotesi e degli archi significativi di Tab. 3.17 sono state calcolate le seguenti simulazioni riassunte in Tab. 3.18.

BACINO	**ADDA**	**LAMBRO**	**PO**	**RSP**	**N° ARCHI SIGNIFICATIVI**
SIMULAZIONE 2.a	×	×		×	27
SIMULAZIONE 2.b	×			×	24
SIMULAZIONE 2.c		×		×	4
SIMULAZIONE 2.d			×		4

Tabella 3.18 - Ipotesi di Scenario 2: simulazioni calcolate per bacino

In Fig. 3.16 si riportano in rosso gli archi significativi da interrompere e in rosa quelli non significativi da tenere accesi durante le simulazioni.

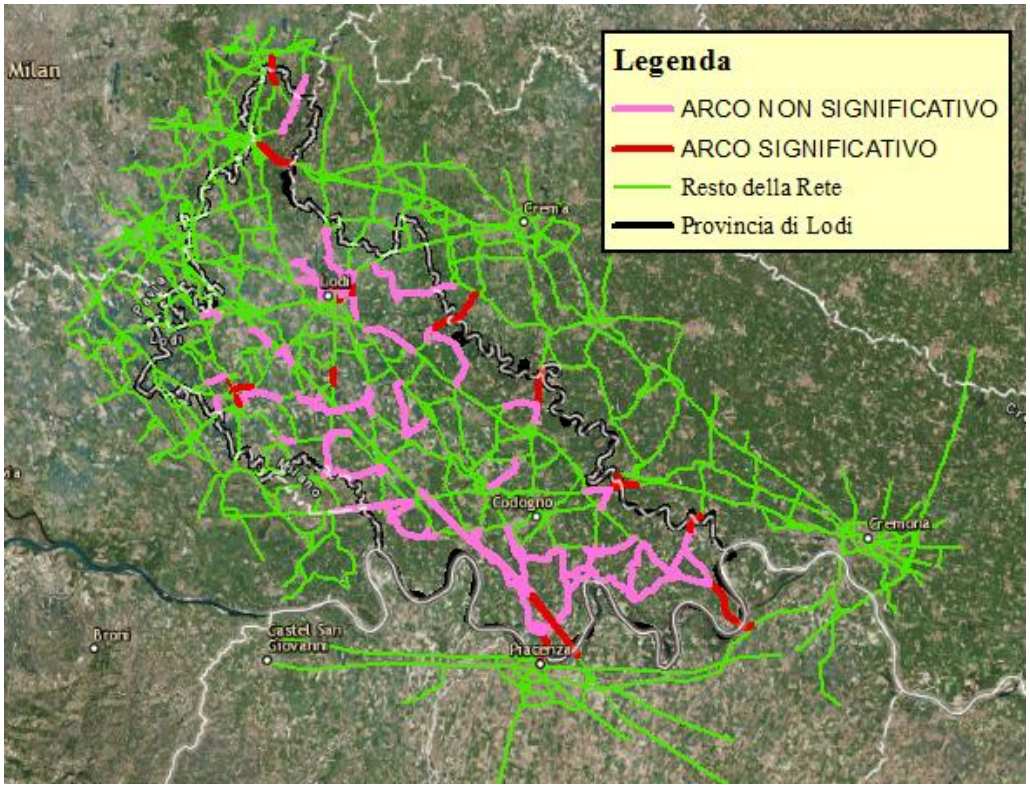


Figura 3.16 - Ipotesi di Scenario 2: archi significativi e archi non significativi

3.6.3. Ipotesi di Scenario 3

In ultima battuta si sono elaborate le Ipotesi di Scenario 3 che differiscono dalle altre ipotesi di scenario. Nello specifico, a partire dalle rete i – TraM, lo Scenario 3 considera le seguenti ipotesi:

I. Gli archi esposti alle zone di pericolosità P3 e P2 secondo il PGRA, escludendo gli scenari rari P1;
II. Gli archi stradali con flusso dei veicoli equivalenti maggiore o uguale di 10.659 veq/d, corrispondente al 75° percentile della distribuzione VEQ.
III. l'Hot Spot Analysis riferita alle mappe IDW considerando significatività alfa=5% cioè livello di confidenza 1-alfa=95%. In particolare si sono considerati significativi:
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Residenziale;
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Servizi;
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Istruzione;
    - Gli archi presenti negli Hot Spot dell'Area Industriale – Commerciale.
IV. Gli archi relativi ai ponti non adeguati con franco ≤ 1 m o ai ponti con giudizio non espresso
V. Gli archi relativi ai ponti con flusso dei veicoli equivalenti maggiore o uguale di 9.507 veq/d, corrispondente al 50° percentile della distribuzione VEQ dei soli 33 archi stradali esposti con ponte.

CRITERIO	INDICE			
A) L'arco è in zone allagabili in base al PGRA?	A			
	Se P1 A_1= 0	Se P2 A_2=2	Se P3 A_3=3	A=0
B) L'arco ha un flusso equivalente dei veicoli maggiore o uguale al 75° percentile della VEQ?	B			
	SI = 1		NO = 0	
$\boldsymbol{I_1 = max(A_i) \times B}$				
C) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Istruzione, l'arco ricade in un Hot Spot?	C			
	SI = 1		NO = 0	
D) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Aziendale, l'arco ricade in un Hot Spot?	D			
	SI = 1		NO = 0	
E) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Servizi, l'arco ricade in un Hot Spot?	E			
	SI = 1		NO = 0	
F) Considerando l'Hot Spot Analysis condotta sull'Area Residenze, l'arco ricade in un Hot Spot?	F			
	SI = 1		NO = 0	
$\boldsymbol{I_2 = C + D + E + F}$				
G) L'arco insiste sulla circolazione di un ponte con franco < 1 m o su un ponte in cui non è specificato il franco, con un flusso veicolare equivalente maggiore del 50° percentile del VEQ dei soli archi con ponti?	G			
	SI = 1		NO = 0	
$\boldsymbol{I = I_1 \times I_2 + G = max(A_i) \times B \times (C + D + E + F) + G}$				

Tabella 3.19 - Ipotesi di Scenario 3: criteri di scelta e Indice di significatività I

La Tab. 3.19 riassume i criteri adottati per caratterizzare ogni arco della rete e per calcolare l'indice di significatività I in base al quale è stato scelto di interrompere o meno l'arco.
Per I ≥ 1 l'arco è considerato significativo, dunque verrà spento.
Per I < 1 l'arco è considerato non significativo, dunque rimarrà acceso.
Anche in questo scenario si considera l'esposizione degli archi in base al fatto che essi siano presenti almeno in un hot spot per almeno una tipologia di area e anche qui, come nelle altre ipotesi di scenario, l'utilità di considerare l'Hot Spot Analysis è supportata dai risultati.
L'Ipotesi di Scenario 3 infatti, in termini di esposizione alla pericolosità, ai percentili della VEQ e agli Hot Spot è del tutto identica all'Ipotesi di Scenario 2. L'introduzione

dell'ipotesi V sul flusso degli archi relativi ai ponti, ha l'obiettivo di individuare gli archi significativi più vulnerabili per poi commentare e valutare eventuali differenze. L'aggiunta di questi ipotesi ha un effetto sul numero di archi significativi desunti da questa analisi e riportati in Tab. 3.20 divisi per ambito territoriale e per bacino.

Ambito Territoriale	**RP**			**RSP**				**Totale**
Bacino	*Adda*	*Lambro*	*Po*	*Adda*	*Lambro*	*Adda-Lambro*		
N° archi significativi	11	2	3	–	1	1		18

Tabella 3.20 - Ipotesi di Scenario 3: archi significativi per ambito territoriale e per bacino

Sulla base delle ipotesi e degli archi significativi di Tab.3.20 sono state calcolate le seguenti simulazioni riassunte in Tab. 3.21.

BACINO	**ADDA**	**LAMBRO**	**PO**	**RSP**	**N° ARCHI SIGNIFICATIVI**
SIMULAZIONE 3.a	×	×		×	15
SIMULAZIONE 3.b	×			×	12
SIMULAZIONE 3.c		×		×	4
SIMULAZIONE 3.d			×		3

Tabella 3.21 - Ipotesi di Scenario 3: simulazioni calcolate per bacino

In Fig. 3.17 si riportano in rosso gli archi significativi da interrompere e in rosa quelli non significativi da tenere accesi durante le simulazioni.

Infine si precisa che la simulazione 2.c e la simulazione 3.c sono identiche in quanto individuano gli stessi archi, per cui praticamente le simulazioni da riprodurre risultano essere 11.
Si precisa inoltre che tenendo conto della memoria storica (alluvione del 15 Maggio 1905) e del PGRA, la zona di Sant'Angelo Lodigiano (Fiume Lambro e Lambro Meridionale) può essere soggetta ad allagamenti, per cui risulta ragionevole studiare l'interruzione degli archi individuati nelle simulazioni 2.c e 3.c nonostante i ponti in queste simulazioni abbiano un franco adeguato, come risulta dal confronto con la Mappa dei Ponti Compatibili.

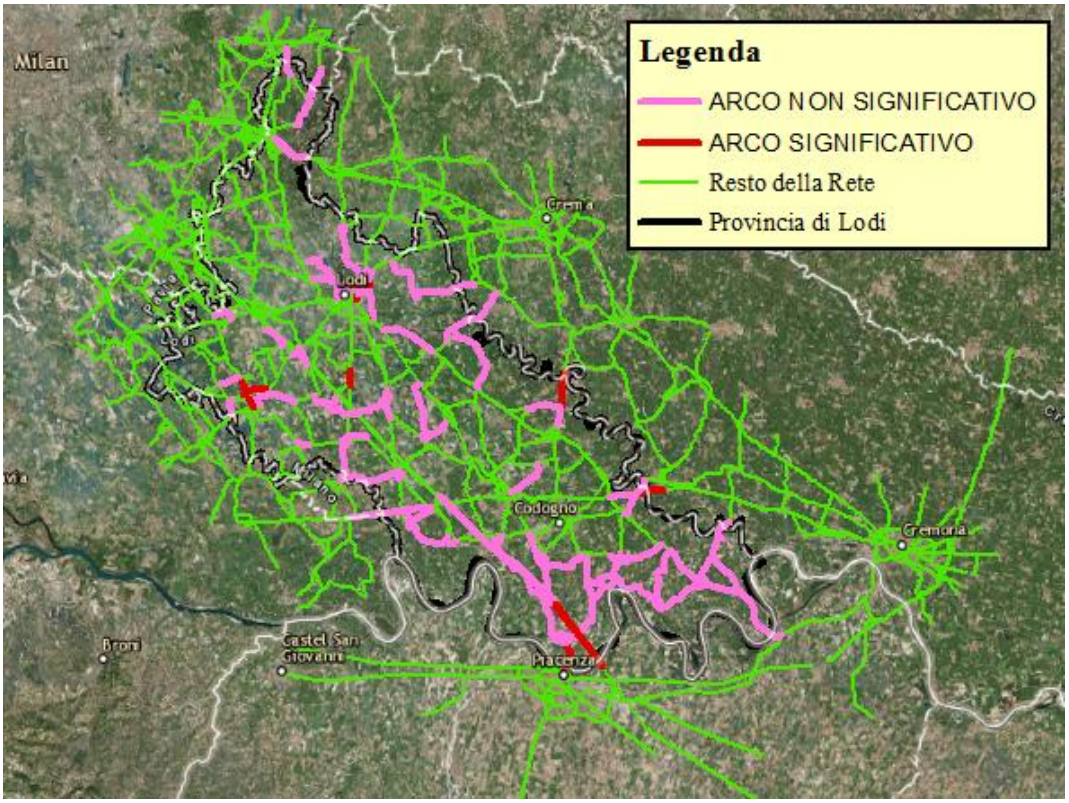


Figura 3.17 - Ipotesi di Scenario 3: archi significativi e archi non significativi

3.7. Risultati

A seguito dell'interruzione degli archi significativi selezionati, grazie al modello i – TraM si è stati in grado di calcolare le variazione dei carichi veicolari e dei principali indicatori di viaggio, come percorrenze e tempi di viaggio.
A partire dalle Ipotesi di Scenario 1, 2 e 3 discusse nel precedente paragrafo, con il supporto di META srl, sono state calcolate le 12 simulazioni, nella pratica 11 in quanto come già evidenziato la simulazione 2.c e la simulazione 3.c individuano gli stessi archi significativi seppur sulla base di ipotesi leggermente diverse.
Gli output ottenuti dal modello i – TraM sono di due tipi:

- Output di tipo qualitativo, rappresentati dai flussogrammi
- Output di tipo quantitativo, rappresentati dai report statistici.

Di seguito si discutono i risultati ottenuti attraverso un'analisi qualitativa critica dei flussogrammi e un'analisi quantitativa dei report statistici, dai quali è possibile valutare e stimare il danno indiretto generato dall'interruzione di archi critici.

3.7.1. Analisi qualitativa

I carichi veicolari della rete stradale, ottenuti simulando il modello di trasporto i – TraM, sono rappresentati graficamente dai flussogrammi, ovvero da mappe che permettono di valutare le caratteristiche di deflusso della rete di trasporto.
Alcuni flussogrammi delle simulazioni sono riportati nelle seguenti figure e mentre tutti i flussogrammi di ogni simulazione sono riportati negli Allegati così da poter essere consultati nella scala appropriata per valutare il danno dello scenario.
A partire dal modello i – TraM, calcolato in condizioni ordinarie senza interruzioni di archi, è stato generato il flussogramma dello Scenario "Stato di fatto" (SDF), riportato in Fig. 3.18.

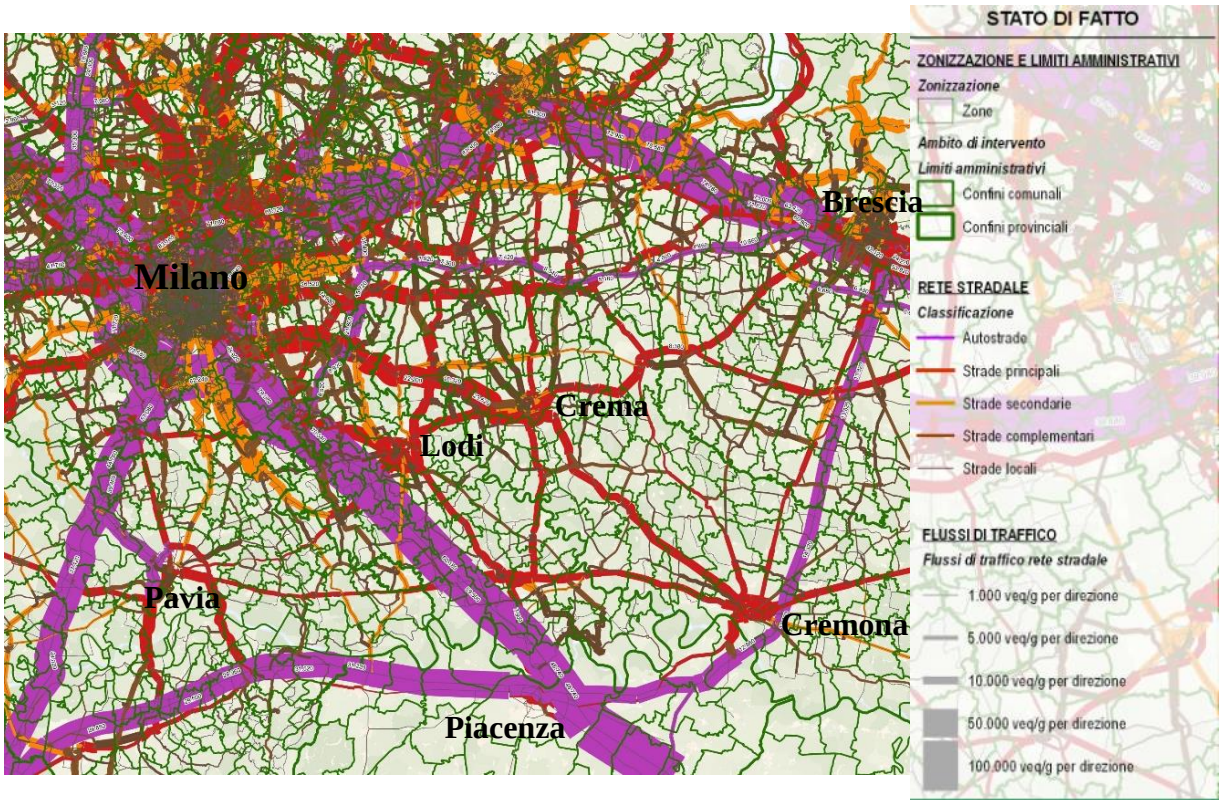


Figura 3.18 - Scenario SDF: flussogramma

In ogni flussogramma è riportata la zonizzazione del rete.
Nel flussogramma dello Scenario SDF i flussi sono stati classificati con un colore in base all'attributo *Classe*.
Lo spessore degli archi indica l'ordine di grandezza del flusso giornaliero di veicoli equivalenti per direzione.
In condizioni ordinarie, in base alla classificazione degli archi, si hanno dunque i seguenti range di ordini di grandezza dei flussi giornalieri di veicoli equivalenti per direzione, riportati in Tab. 3.22.
A partire da questa simulazione, sono stati calcolati i flussogrammi per ogni simulazione di scenario e sono state mappate le differenze fra lo Scenario Simulato i-esimo e lo

Scenario SDF, al fine di valutare i sovraccarichi in blu e le riduzioni di carico in rosso che si generano sulla rete di trasporto a seconda del numero di interruzioni di archi critici.

Tipo di arco stradale	Range di Ordini di grandezza di veq/d per direzione	Colore in Legenda
Autostrade	50.000 – 100.000	
Strade Principali	5.000 – 50.000	
Strade Secondarie	1.000 – 30.000	
Strade Complementari	1.000 – 10.000	
Strade Locali	< 1.000 (non visibili)	

Tabella 3.22 - Range Ordini di grandezza dei flussogrammi per classe di strada

I sovraccarichi e le riduzioni di carico generate dai vari deflussi hanno un range di ordini di grandezza che varia tra +/– 1.000 veq/d per direzione e i +/– 10.000 veq/d per direzione. Intuitivamente si può comprendere come il segno + indica i sovraccarichi mentre il segno – indica le riduzioni di carico.
Confrontando i 12 flussogrammi ad una scala ampia si riscontra che a livello qualitativo vi è una certa somiglianza tra le varie Ipotesi di Scenario 1, 2 e 3 ma si riscontrano delle differenze sostanziali tra le simulazioni di bacino.

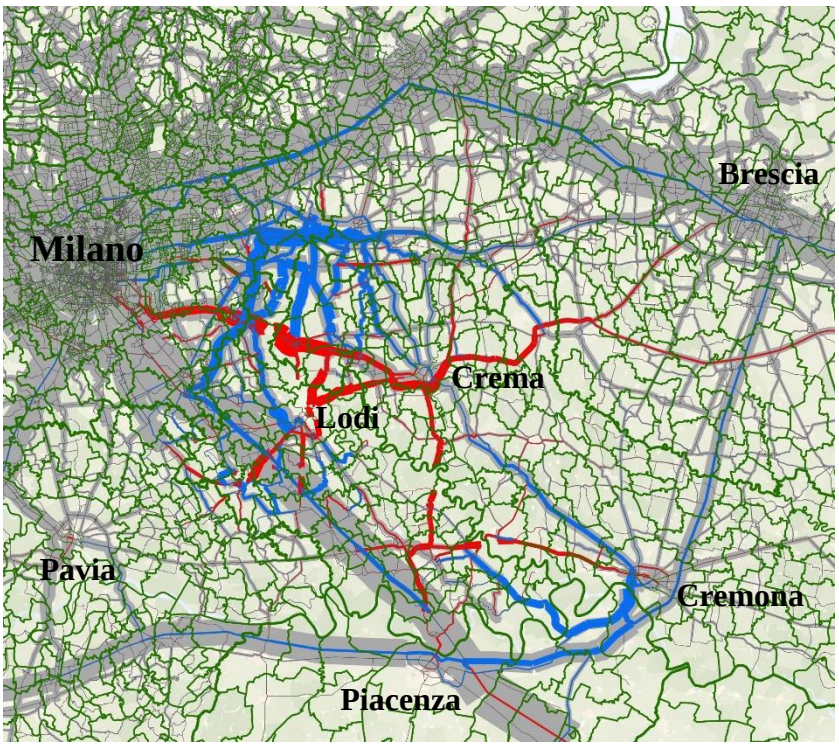


Figura 3.19 - Esempi di flussogrammi delle simulazioni a, bacino Adda - Lambro

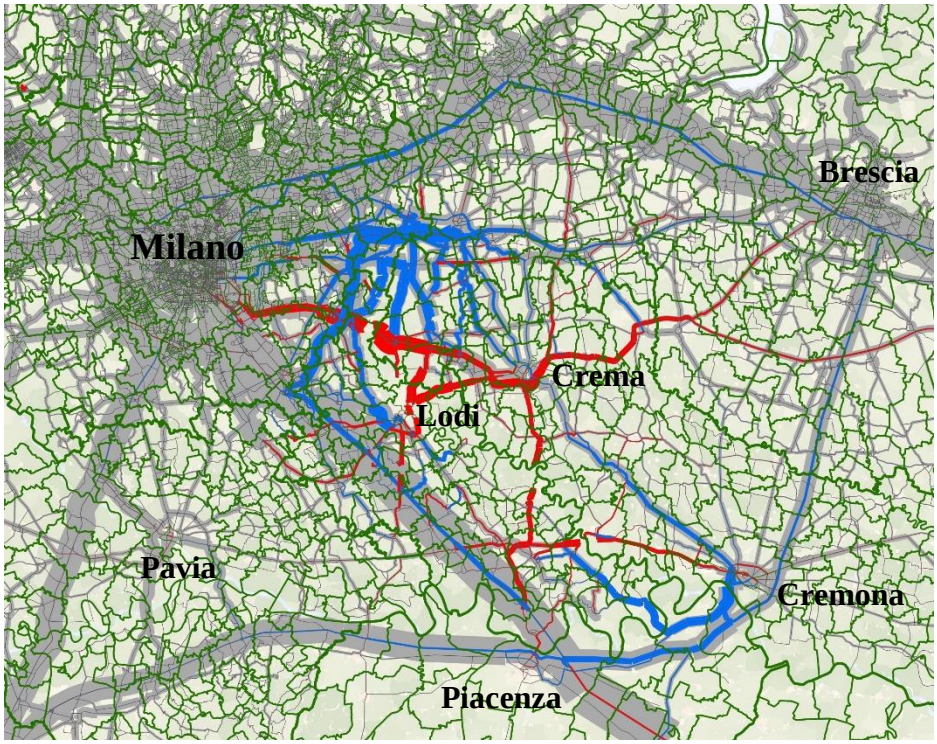


Figura 3.20 - Esempi di flussogrammi delle simulazioni b, bacino Adda

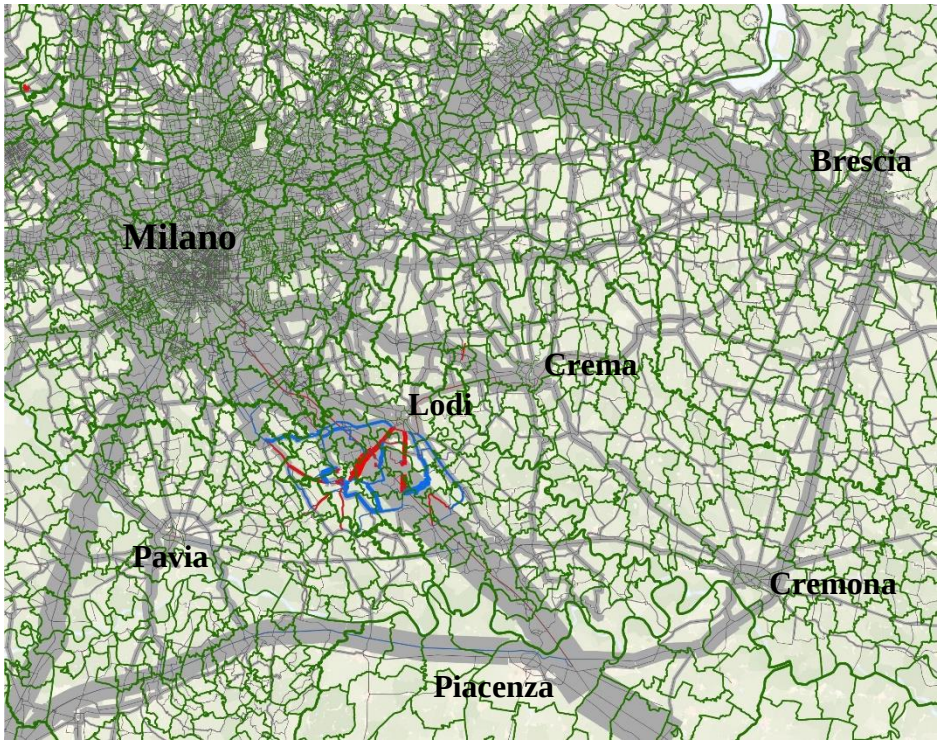


Figura 3.21 - Esempi di flussogrammi delle simulazioni c, bacino Lambro

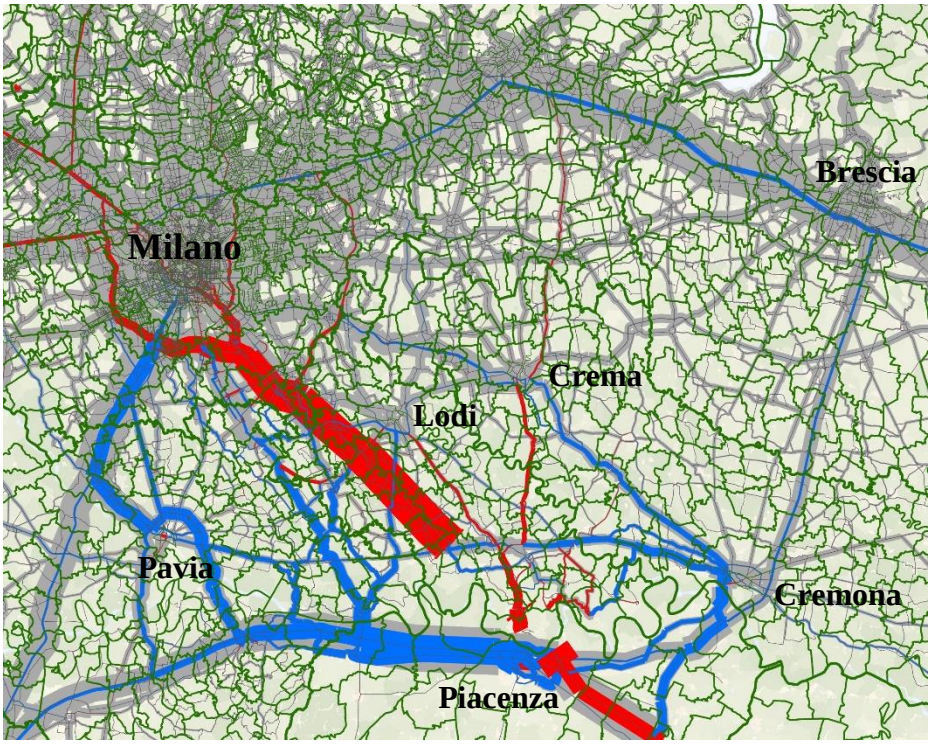


Figura 3.22 - Esempi di flussogrammi delle simulazioni d, bacino Po

Osservando le Figure 3.19, Fig. 3.20 e Fig. 3.21, si sottolineano due prime grandi considerazioni fra le simulazione del bacino dell'Adda e il bacino del Lambro (simulazioni a; simulazioni b; simulazioni c) è che:

- Le interruzioni causate dalle alluvioni nel bacino dell'Adda hanno un effetto maggiore rispetto a quelle del bacino del Lambro, poiché hanno ripercussioni anche al di fuori della Provincia di Lodi;
- Le interruzioni causate dalle alluvioni nel bacino del Lambro, invece, hanno un effetto più a livello locale e circoscritto alla Provincia di Lodi, in particolare fra la rete stradale che congiunge i centri di Lodi e di Sant'Angelo Lodigiano.

Concentrandosi più nel dettaglio sulle simulazioni del bacino dell'Adda (simulazioni b), si evidenzia come in realtà gran parte del sovraccarico che si viene a creare a Nord della Provincia di Lodi è dovuto alla riduzione di carico che si ha sulla Paullese (SP415), in quanto questa strada provinciale è stata interrotta sull'attraversamento della Paullese sull'Adda. Si sottolinea in aggiunta che la Paullese potrebbe interrompersi anche sull'attraversamento della Paullese sul Canale della Muzza. Come si vede dallo Scenario SDF, la Paullese (SP415) è un'arteria della rete principale (Classe 3), con un ordine di grandezza di flusso di circa 50.000 veq/d.
La sua interruzione genera un danno sistemico alla rete di trasporto che si ripercuote su più Province (Città Metropolitana di Milano, Provincia di Lodi, Provincia di Bergamo; Provincia di Cremona).

Il motivo della chiusura di questa arteria principale nelle varie simulazioni del bacino dell'Adda, è dovuto al fatto che il tratto di attraversamento sull'Adda è relativo ad un ponte sul quale non è stato espresso un giudizio di compatibilità idraulica. Inoltre nella zona Nord della Provincia di Lodi, durante le simulazioni del bacino dell'Adda, sono state interrotte ulteriori archi di classe minore sul Torrente Molgora in quanto su questo torrente vi sono attraversamenti non adeguati con la compatibilità idraulica (franco idraulico minore di 1 m).

Osservando le simulazioni d sul bacino del Po (simulazioni d) in Fig. 3.22, si riscontra un danno sistemico significativo dovuto alla riduzione di carico dell'Autostrada A1, con conseguenti sovraccarichi nelle Province limitrofe in particolare per raggiungere Milano partendo da Piacenza si utilizza la viabilità locale del Centro di Pavia continuando poi per la SP35 fino a Milano oppure utilizzando un tratto della SP35 per poi prendere la A7 fino a Milano.
In alternativa per chi parte da Piacenza o da Cremona Ovest è possibile raggiungere Milano aggirando la Provincia di Lodi da Est percorrendo la Paullese (SP415).
Chi invece si trova a Cremona Est e vuole raggiungere Milano può scegliere di andare fino a Brescia, prendere la A4 e tornare indietro verso Milano.

3.7.2. Analisi quantitativa

A livello quantitativo le analisi hanno evidenziato essenzialmente due indicatori di viaggio:

- I volumi di traffico [veicoli*km]: indica il numero di chilometri percorsi da tutti i veicoli in un giorno;
- I tempi di percorrenza [veicoli*h]: indica le ore percorse da tutti i veicoli in un giorno.

Tutte le simulazioni e gli indicatori calcolati sono riferiti ad un giorno medio feriale, e ricostruiscono il quadro di 24 ore.
Per ogni simulazione di scenario sono state calcolate i relativi indicatori, in termini di veicoli equivalenti con 1 veicolo leggero assunto uguale a 1 veicolo equivalente e un veicolo pesante assunto uguale a 2 veicoli equivalenti, e distinguendo in termini di veicoli leggeri e veicoli pesanti.

In Tab. 3.23 si riportano gli indicatori per ogni simulazione calcolati in termini di veicoli equivalenti, mentre in Tab. 3.24 gli stessi indicatori per ogni simulazione ma calcolati distinguendo in termini di veicoli leggeri e veicoli pesanti.

INDICATORI DI VIAGGIO - VEICOLI EQUIVALENTI		
	VOLUMI DI TRAFFICO (veicoli*km)	TEMPI DI PERCORRENZA (veicoli*h)
	veq*km	veq*h
SDF	377.039.040,16	6.769.625,58
1A	379.545.195,01	6.905.161,47
1B	379.407.091,61	6.900.350,20
1C	377.237.030,25	6.777.082,37
1D	380.311.303,63	7.000.921,55
2A	380.333.177,78	6.936.694,07
2B	380.211.746,04	6.932.311,64
2C	377.072.648,46	6.770.528,33
2D	380.314.564,42	7.000.636,07
3A	378.397.840,09	6.866.281,12
3B	378.396.061,77	6.866.070,47
3C	377.072.648,46	6.770.528,33
3D	379.965.810,91	6.964.598,83

Tabella 3.23 - Indicatori di viaggio - veicoli equivalenti

INDICATORI DI VIAGGIO - VEICOLI LEGGERI E PESANTI				
	VOLUMI DI TRAFFICO (veicoli*km)		TEMPI DI PERCORRENZA (veicoli*h)	
	Legg*km	Pes*km	Legg*h	Pes*h
SDF	254.767.330,82	61.135.854,67	4.905.425,48	932.100,05
1A	256.952.745,13	61.296.224,94	5.033.546,43	935.807,52
1B	256.825.108,83	61.290.991,39	5.029.014,88	935.667,66
1C	254.953.221,95	61.141.904,15	4.912.414,03	932.334,17
1D	257.489.251,03	61.411.026,30	5.065.235,03	967.843,26
2A	257.704.089,26	61.314.544,26	5.063.263,43	936.715,32
2B	257.591.038,40	61.310.353,82	5.058.929,40	936.691,12
2C	254.799.638,14	61.136.505,16	4.906.326,75	932.100,79
2D	257.492.277,44	61.411.143,49	5.064.980,75	967.827,66
3A	255.995.357,03	61.201.241,53	4.995.815,14	935.232,99
3B	255.993.559,91	61.201.250,93	4.995.630,55	935.219,96
3C	254.799.638,14	61.136.505,16	4.906.326,75	932.100,79
3D	257.162.556,57	61.401.627,17	5.038.510,77	963.044,03

Tabella 3.24 - Indicatori di viaggio - veicoli leggeri e pesanti

Successivamente si sono calcolate le differenze degli indicatori di viaggio fra la Simulazione di Scenario N-esima e lo Scenario SDF. Le differenze sono state calcolate sia in termini di veicoli equivalenti che distinguendo i veicoli leggeri da quelli pesanti (Tab. 3.25 e Tab. 3.26)

DIFFERENZA FRA SIMULAZION N-esime E SDF - VEICOLI EQUIVALENTI		
	VARIAZIONE DEI VOLUMI (veicoli*km)	VARIAZIONE DEI TEMPI (veicoli*h)
	veq*km	veq*h
SDF	0,00	0,00
1A	2.506.154,85	135.535,89
1B	2.368.051,45	130.724,62
1C	197.990,09	7.456,79
1D	3.272.263,47	231.295,97
2A	3.294.137,62	167.068,49
2B	3.172.705,88	162.686,06
2C	33.608,30	902,75
2D	3.275.524,26	231.010,49
3A	1.358.799,93	96.655,54
3B	1.357.021,61	96.444,89
3C	33.608,30	902,75
3D	2.926.770,75	194.973,25

Tabella 3.25 - Differenze degli indicatori di viaggio fra la Simulazione di Scenario N-esima e lo Scenario SDF - veicoli equivalenti

DIFFERENZA FRA SIMULAZIONE N-esime E SDF - VEICOLI LEGGERI E PESANTI				
	VARIAZIONE DEI VOLUMI (veicoli*km)		VARIAZIONE DEI TEMPI (veicoli*h)	
	Legg*km	Pes*km	Legg*h	Pes*h
SDF	0,00	0,00	0,00	0,00
1A	2.185.414,31	160.370,27	128.120,95	3.707,47
1B	2.057.778,01	155.136,72	123.589,40	3.567,61
1C	185.891,13	6.049,48	6.988,55	234,12
1D	2.721.920,21	275.171,63	159.809,55	35.743,21
2A	2.936.758,44	178.689,59	157.837,95	4.615,27
2B	2.823.707,58	174.499,15	153.503,92	4.591,07
2C	32.307,32	650,49	901,27	0,74
2D	2.724.946,62	275.288,82	159.555,27	35.727,61
3A	1.228.026,21	65.386,86	90.389,66	3.132,94
3B	1.226.229,09	65.396,26	90.205,07	3.119,91
3C	32.307,32	650,49	901,27	0,74
3D	2.395.225,75	265.772,50	133.085,29	30.943,98

Tabella 3.26 - Differenze degli indicatori di viaggio fra la Simulazione di Scenario N-esima e lo Scenario SDF - veicoli leggeri e pesanti

Le variazioni degli indicatori di viaggio così calcolate, rappresentano una stima dei danni indiretti generati dall'interruzione di archi stradali critici in seguito ad una alluvione.
Per tradurre questo tipo di danno indiretto in termini economici, si sono utilizzati i seguenti costi parametrici:

	Veicoli equivalenti	**Veicoli leggeri**	**Veicoli pesanti**
Variazione dei Volumi	0,20 €/km/veicoli	0,20 €/km/veicoli	0,48 €/km/veicoli
Variazione dei Tempi	13 €/h/veicoli	13 €/h/veicoli	50 €/km/veicoli

Tabella 3.27 - Costi parametrici utilizzati per valutare le variazioni degli indicatori di viaggio

Valore del tempo per i passeggeri per motivo del viaggio	Valore [Euro/ora-persona]
Occasionale e studio	5,00
Casa-Lavoro	10,00
Lavoro-Affari[16]	20,00
Ritorno a casa	5,00
Valore del tempo per le merci	**Valore**
Valore del tempo della merce trasportata	1,6-4[17] (euro/tonn ora)
Tempo di viaggio dei conducenti (solo se non già considerato nei costi operativi dei veicoli)	16– 33[18](euro/ora)

Tabella 3.28 - Esempi di valori del tempo per i passeggeri e le merci per motivi del viaggio

I costi parametrici utilizzati (Tab. 3.27) sono stati ricavati dalla letteratura. Ad esempio il costo parametrico utilizzato per le variazioni di volumi è maggiore per i veicoli pesanti in quanto i veicoli pesanti hanno delle tasse di viaggio da pagare a differenza dei veicoli leggeri. Il costo parametrico utilizzato per le variazioni dei tempi per i veicoli leggeri è stato calcolato assumendo come motivo di viaggio Casa – Lavoro e assumendo come media persone per macchina il valore medio per la Regione Lombardia pari a 1,3 persone/veicolo. Per cui, utilizzando il valore di 10 €/h/persona ricavato da Tab. 3.28, è stato utilizzato il valore 13 €/h per valutare le variazioni dei tempi per i veicoli leggeri.
Per i veicoli pesanti si è ipotizzato un costo parametrico di 50 €/h per le variazioni dei tempi, in base a quanto esplicitato nella Leggi Regionali di Regione Lombardia del 2015, comprendente cosi del personale e valore del tempo della merce trasportata pari a 2 €/ton/h.
Moltiplicando i valori delle variazioni degli indicatori di viaggio per i rispettivi costi parametrici e sommando i costi per le variazioni di volumi con i costi per le variazioni dei tempi, si sono stimati i danni indiretti in termini di costo monetario (Tab. 3.29)

	COSTO				
	Legg	Pes	Legg+Pes	veq*km+veq*h	Differenze %
SDF	€ -	€ -	€ -	€ -	–
1A	€ 2.102.655,21	€ 262.351,23	€ 2.365.006,44	€ 2.263.197,54	4,30%
1B	€ 2.018.217,80	€ 252.846,13	€ 2.271.063,93	€ 2.173.030,35	4,32%
1C	€ 128.029,38	€ 14.609,75	€ 142.639,13	€ 136.536,29	4,28%
1D	€ 2.621.908,19	€ 1.919.242,88	€ 4.541.151,07	€ 3.661.300,30	19,38%
2A	€ 2.639.245,04	€ 316.534,50	€ 2.955.779,54	€ 2.830.717,89	4,23%
2B	€ 2.560.292,48	€ 313.313,09	€ 2.873.605,57	€ 2.749.459,96	4,32%
2C	€ 18.177,97	€ 349,24	€ 18.527,21	€ 18.457,41	0,38%
2D	€ 2.619.207,83	€ 1.918.519,13	€ 4.537.726,97	€ 3.658.241,22	19,38%
3A	€ 1.420.670,82	€ 188.032,69	€ 1.608.703,51	€ 1.528.282,01	5,00%
3B	€ 1.417.911,73	€ 187.385,70	€ 1.605.297,43	€ 1.525.187,89	4,99%
3C	€ 18.177,97	€ 349,24	€ 18.527,21	€ 18.457,41	0,38%
3D	€ 2.209.153,92	€ 1.674.769,80	€ 3.883.923,72	€ 3.120.006,40	19,67%

Tabella 3.29 - Stima dei danni indiretti causati dall'interruzione di archi stradali a seguito di un'alluvione. In verde la differenza fra veicoli leggeri e pesanti; in arancio quelli invece considerando i veicoli equivalenti

I danni indiretti sono stati stimati valutando sia il caso che considera la stima degli indicatori in termini dii veicoli equivalenti, sia il caso che considera la stima degli indicatori in termini di veicoli leggeri e veicoli pesanti.

In Fig. 3.23 si riportano i costi giornalieri stimati delle variazioni degli indicatori di viaggio considerando la distinzione tra veicoli e leggeri e pesanti.

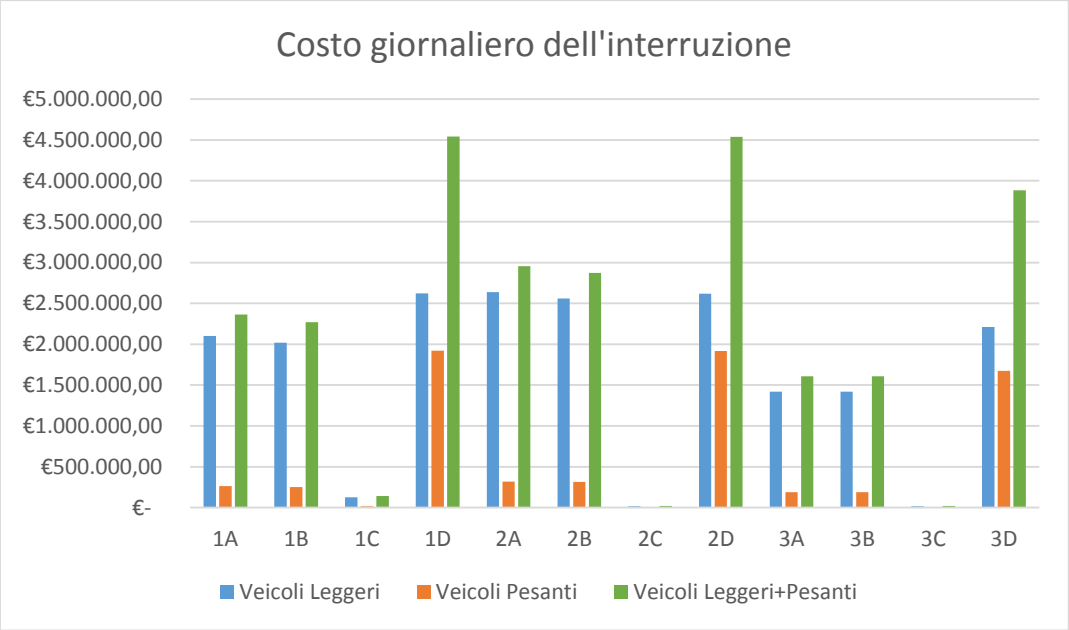


Figura 3.23 - Costo giornaliero dell'interruzione rappresentante il danno indiretto generato, considerando la distinzione fra veicoli leggeri e pesanti

Anche dai risultati di Fig. 3.25 risulta che i casi più gravosi sono quelli delle simulazioni d, dove l'autostrada entra subisce una rilevante riduzione del carico.

Le simulazioni del bacino del Lambro 2.c e 3.c sono meno dannose della simulazione 1c, mentre le simulazioni a e b del bacino dell'Adda sono più dannose nell'ipotesi di scenario 2 che nelle ipotesi di scenario 3 e 1. Questo risultato conferma il risultato qualitativo precedentemente discusso secondo cui le interruzioni sul bacino dell'Adda hanno ripercussioni maggiori rispetto a quelle del bacino del Lambro.

Infine sono stati sommati i costi dei veicoli leggeri con i costi dei veicoli pesanti, in modo da ottenere il costo totale paragonabile con i costi totali dei veicoli equivalenti.

Quello che emerge da questi risultati è che i costi stimati con i veicoli equivalenti sottostimano il danno indiretto rispetto ai costi stimati considerando distintamente i veicoli leggeri e veicoli pesanti (Fig. 3.24)

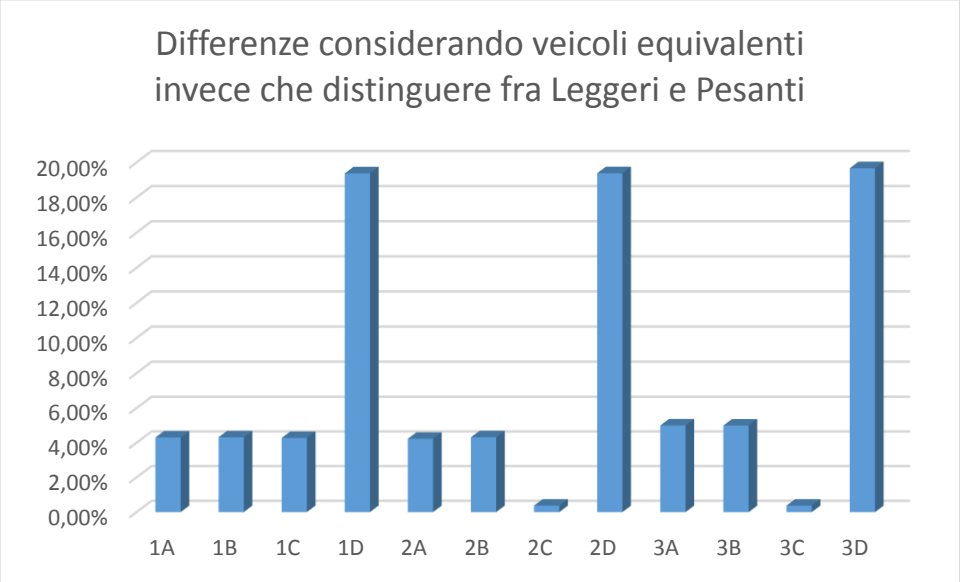


Figura 3.24 – Differenze fra la stima dei costi con i veicoli equivalenti fra la stima dei costi distinguendo i veicoli leggeri da quelli pesanti.

Dai risultati si evince che nelle simulazioni d in cui viene interrotta l'autostrada si ha una differenza di circa il 20% se non si considera la distinzione tra veicoli pesanti e leggeri. Tale risultato è giustificato dal fatto che nelle simulazioni d viene interrotta l'Autostrada A1, arteria sulla quale transitano molti veicoli pesanti per il trasporto merci.

Gli indicatori di viaggio calcolati dal modello di trasporto possono anche essere analizzati in base alla classificazione degli archi stradali.
Dai flussogrammi si può osservare qualitativamente che le simulazioni d del bacino del Po rappresentano le maggiori riduzioni di carico sulle Autostrade.
Considerando dunque gli indicatori di viaggio soltanto delle Autostrade, è possibile calcolarsi le differenze delle variazioni dei volumi di viaggio fra lo Scenario SDF e le simulazioni d. Moltiplicando tali differenze per la tariffa media del tratto dell'A1 è possibile ottenere il mancato guadagno delle Autostrade (Tab. 3.30).
La tariffa al km per il tratto Piacenza Sud – Milano Sud sulla A1, è stata stimata utilizzando i dati ricavati dal sito www.autostrade.it mediante il *tool* "Traffico, Percorsi e Pedaggi". Si riportano di seguito le tariffe utilizzate:

- 0,07 €/km per i veicoli leggeri e i veicoli equivalenti
- 0,10 €/km per i veicoli pesanti, ipotizzando che tutti i veicoli pesanti siano di tipo 3 assi.

Poiché le tariffe medie applicate variano in funzione al tipo di veicolo leggero o pesante, i risultati del mancato guadagno giornaliero delle Autostrade risultano essere più precisi differenziando i veicoli leggeri da quelli pesanti. Infatti, stimare il mancato guadagno delle autostrade in termini di veicoli equivalenti può sovrastimare il danno indiretto fino ad un massimo di 10,7%.

In Tab. 3.31 si riporta il mancato guadagno delle Autostrade per le tre simulazioni di scenario sommando i risultati dei veicoli leggeri con quelli dei veicoli pesanti.

AUTOSTRADE - VEICOLI EQUIVALENTI			
	VARIAZIONI DEI VOLUMI	DIFFERENZE	MANCATO GUADAGNO
SDF	197.160.040,53	€ -	€ -
1D	195.994.324,37	-€ 1.165.716,16	-€ 81.600,13
2D	196.009.601,48	-€ 1.150.439,05	-€ 80.530,73
3D	195.730.867,75	-€ 1.429.172,78	-€ 100.042,09
AUTOSTRADE - VEICOLI LEGGERI			
	VARIAZIONI DEI VOLUMI	DIFFERENZE	MANCATO GUADAGNO
SDF	107.707.135,67	€ -	€ -
1D	106.931.612,97	-€ 775.522,70	-€ 54.286,59
2D	106.946.252,32	-€ 760.883,35	-€ 53.261,83
3D	106.695.905,29	-€ 1.011.230,38	-€ 70.786,13
AUTOSTRADE - VEICOLI PESANTI			
	VARIAZIONI DEI VOLUMI	DIFFERENZE	MANCATO GUADAGNO
SDF	44.726.452,43	€ -	€ -
1D	44.531.355,70	-€ 195.096,73	-€ 19.509,67
2D	44.531.674,58	-€ 194.777,85	-€ 19.477,78
3D	44.517.481,23	-€ 208.971,20	-€ 20.897,12

Tabella 3.30 - Risultati delle variazioni dei volumi delle Autostrade e il mancato guadagno giornaliero

AUTOSTRADE - VEICOLI LEGGERI E PESANTI	
	MANCATO GUADAGNO
SDF	€ -
1D	-€ 73.796,26
2D	-€ 72.739,62
3D	-€ 91.683,25

Tabella 3.31 - Mancato guadagno giornaliero delle autostrade considerando i veicoli leggeri e pesanti.

3.8. Conclusioni preliminari

La metodologia di stima elaborata in questo capitolo ha lo scopo di investigare i danni indiretti generati dall'interruzione di archi stradali critici.
A partire da una rete stradale, su cui è possibile calcolare i carichi stradali, è possibile individuare archi stradali critici che potrebbero interrompersi durante uno scenario di alluvione, su una scala ampia come quella della Provincia di Lodi e senza l'utilizzo di modelli idraulici 2D. Sovrapponendo le informazioni delle Mappe di Pericolosità del PGRA, insieme a delle Mappe degli Hot Spot, appositamente create, e delle Mappe dei Ponti che contengono informazioni riguardo la compatibilità idraulica dei manufatti, è possibile individuare gli archi stradali critici per diverse ipotesi di scenario, diversificando la vulnerabilità degli archi stradali.
Una volta individuati gli archi critici, utilizzando un modello di trasporto, è possibile calcolare per ogni simulazione di scenario i flussogrammi che permettono di capire come variano le condizioni di deflusso della rete di trasporto.

Il modello di trasporto fornisce anche report statistici con cui è possibile calcolare gli indicatori di viaggio che considerano le variazioni di volumi e le variazioni di tempo generata in seguito all'interruzione degli archi.
L'analisi qualitativa condotta sui flussogrammi e l'analisi quantitativa sulle statistiche degli indicatori di viaggio suggeriscono che:

- Con questo metodo di stima si riesce ad ottenere qualche informazioni in più per la gestione del rischio idraulico. In particolare sui danni indiretti causati da un'alluvione, le quali risultano utili per definire strategie di mitigazione del rischio alluvionale valutate attraverso analisi costi – benefici.
- Ad esempio nel caso studio del bacino dell'Adda e del bacino del Po, si hanno effetti maggiori coinvolgendo anche le Province confinanti, mentre nel caso studio del bacino del Lambro, si hanno effetti più a livello locale.
- L'analisi di vulnerabilità degli archi in termini di carichi veicolari, ha evidenziato che generalmente gli archi stradali con carichi maggiori sono quelli da proteggere con più urgenza, in quanto una loro interruzione può generare un danno sistemico ingente. Questa metodologia dunque aiuta ad individuare gli archi da proteggere in base ad una certa necessità e quindi ad individuare priorità di intervento;
- Eventuali collassi di ponti e quindi interruzioni di archi stradali critici (caso Paullese) possono generare danni sistemici di grande rilevanza, per cui tale metodologia aiuta ad individuare con una certa priorità i ponti che devono essere soggetti ad un'analisi di vulnerabilità più dettagliata;
- I tempi di percorrenza invece tendono ad aumentare: questo perché i flussi non allontanati che restano nell'area di analisi utilizzano percorsi tendenzialmente più lenti e quindi impiegano più tempo ad arrivare a destinazione. L'aumento dei volumi, inoltre, determina un incremento della congestione e quindi un ulteriore aumento dei tempi su archi prima più performanti.
- Utilizzando dei costi parametrici, a partire dalle variazioni degli indicatori di viaggio è possibile dare una stima quantitativa dei costi e quindi dei danni indiretti generati dall'interruzione di archi stradali critici;
- Disponendo di un modello di trasporto che permetta di distinguere il carico dei veicoli leggeri dal carico dei veicoli pesanti, è possibile ottenere delle stime più vicine alla realtà in quanto i costi parametrici variano in base alla domanda di viaggio e alla modalità di viaggio e quindi per i veicoli leggeri si utilizzano costi parametrici più bassi rispetto ai veicoli pesanti;
- La stima dei danni indiretti basata su veicoli equivalenti tende a sottostimare i risultati rispetto alla suddivisione fra veicoli leggeri e veicoli pesanti.
- Disponendo di un modello che fornisca le statistiche degli indicatori di viaggio in base alla classificazione stradale, è possibile calcolare le variazioni dei volumi per le Autostrade e di conseguenza, utilizzando le tariffe del pedaggio autostradale, calcolare il mancato guadagno in caso di riduzione dei carichi stradali sulle Autostrade.
- Anche nel caso della stima del mancato guadagno, se possibile, è meglio considerare separatamente i carichi dei veicoli leggeri dai carichi dei veicoli pesanti e solo in un secondo momento sommare gli effetti, così da ottenere una

stima più prossima alla realtà in quanto anche per quanto riguarda le tariffe del pedaggio queste due tipologie di veicoli hanno costi parametrici differenti. La stima del mancato guadagno basata sui veicoli equivalenti tende invece a sovrastimare il danno indiretto generato.

- Riuscendo ad ottenere una stima in termini monetari del danno indiretto generato in seguito ad interruzioni di archi stradali a causa di un'alluvione, è possibile tenere in considerazione tale metodologia e i vantaggi che essa comporta per utilizzarli in un'analisi costi benefici più dettagliata al fine di fornire maggiori indicazioni ai pianificatori e ai gestori dell'emergenza per soluzioni di gestioni del rischio più consapevoli.
- La disponibilità di dati in termini di DB aggregati di edifici da sottoporre ad una analisi dei cluster per individuare gli Hot Spot, le poche valutazioni di compatibilità idraulica effettuata sui ponti, l'indisponibilità di Mappe della Pericolosità in termini di profondità di tirante idrico e l'imprescindibilità di un modello di trasporto rappresentano i limiti di questa metodologia.

Capitolo 4

Conclusioni e discussione dei risultati

Attraverso la modellazione di una rete di trasporto stradale è stata condotta un'analisi dei danni alluvionali indiretti causati dal danno diretto alle infrastrutture di trasporto al fine di fornire strumenti di supporto utili per la gestione del rischio alluvionale.
Infatti, la Direttiva 2007/60/CE, relativa alla gestione dei rischi di alluvioni, e le sue attuazioni, evidenza come la valutazione delle potenziali conseguenze negative associate a diversi scenari di alluvione sia una base preziosa per la definizione delle priorità e di ulteriori aspetti tecnici, finanziari e politici utili per prendere decisioni riguardanti la gestione del rischio di alluvione.
Inoltre gli strumenti normativi pongono l'attenzione sul fatto che il rischio alluvionale sia un problema globale che deve essere affrontato con un meccanismo comunitario inteso ad agevolare una cooperazione rafforzata negli interventi di soccorso della Protezione Civile.
In Italia, a livello normativo, con il D.Lgs. 23/02/2010, n. 49 – "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni" e con tutta la normativa di Protezione Civile è stato esplicitato come sia necessario individuare le conseguenze negative derivanti dalle alluvioni anche per le infrastrutture strategiche e i servizi critici, entrambi essenziali nella gestione dell'emergenza del rischio alluvioni.

Dopo il Capitolo 1 che introduce l'obiettivo di ricerca, le definizioni di rischio e di danno e gli strumenti normativi, nel Capitolo 2, a partire dal caso studio del Comune di Lodi, è stata modellata una rete stradale per analizzare la fase di gestione dell'emergenza e capire quale sia la risposta della rete stessa in relazione ad uno scenario di alluvione.
Il modello di traffico utilizzato per queste elaborazioni è stato costruito e valutato ad hoc. La ricorrente mancanza di dati utili alle analisi di rischio alluvionale, ha reso difficile l'identificazione di una rete di trasporto stradale, caratterizzata da attributi di costo e di restrizione adatti alla risoluzione di un modello di traffico, in grado di calcolare percorsi che minimizzino i tempi di percorrenza. Tuttavia il modello di traffico costruito ad hoc evidenzia come non solo sia possibile costruire una rete di trasporto consistente atta a risolvere il calcolo di percorsi che minimizzano attributi di costo, ma soprattutto come sia utile per valutare la risposta della rete stessa al fine di supportare la gestione del rischio.
I risultati, in coerenza con altri studi, dimostrano che la caratterizzazione degli archi in termini di velocità e quindi in termini di tempi di percorrenza è essenziale per una valutazione corretta della risposta emergenziale della rete stradale, sia in termini di condizioni ordinarie che di alluvione.

L'utilizzo della Curva Velocità – Tiranti Idrici (Arrighi, et al., 2019), fornisce informazioni utili per la costruzione del modello di traffico da utilizzare nello scenario alluvionale. Tuttavia tali informazioni devono essere integrate con ulteriori valutazioni sulla velocità, che tengano in considerazioni rallentamenti esistenti nelle reali condizioni di viaggio per via di curve e intersezioni, in quanto la *FreeFlow Speed*, ovvero la velocità di flusso libero dei veicoli, non tiene conto delle suddette reali condizioni di viaggio, con il conseguente rischio di calcolare percorsi troppo veloci e quindi di avere errori nella valutazione della risposta della rete stradale.
Questa tesi, evidenzia come considerando semplicemente un coefficiente di riduzione α_{SPEED} si possano ottenere velocità più vicine alle condizioni reali di viaggio.
Tali risultati suggeriscono, dunque, che per una migliore gestione del rischio sia fondamentale disporre di una rete di trasporto stradale costruita con determinati attributi di costo e di restrizione che possa essere messa a disposizione dei pianificatori e dei gestori dell'emergenza.
Considerando sempre l'utilità di avere a disposizione un modello di traffico, questi risultati dimostrano come sia possibile definire a priori un sistema di percorsi di evacuazioni caratterizzati da determinati tempi di allertamento, di risposta della popolazione, di generazione del viaggio e di mobilitazione dei veicoli, così da stimare per ogni sistema di percorso di evacuazione un tempo di evacuazione determinato, che consideri anche fattori di sicurezza.
Per quanto riguarda i tempi di evacuazione sono fortemente influenzati dalle modalità di allertamento e dai tempi di risposta delle persone.
Il confronto fra il caso peggiore, quello intermedio e quello migliore di Tab. 2.11 dimostra come una modalità di avvertimento di tipo *multiple sources* garantisca tempi di evacuazione migliori rispetto a una modalità di avvertimento di tipo moderata, come ad esempio il semplice porta a porta. Per cui tali risultati potrebbero essere considerati per valutare opportunità di investimento sulle modalità di allertamento, considerando ad esempio l'utilizzo di televisioni, radio, siti internet, applicazioni Web & Mobile, sistemi VoIP, messaggi di massa alla popolazione e l'allertamento porta a porta con del personale.
I risultati ottenuti da queste elaborazioni, inoltre, dimostrano come il disporre di mappe di pericolosità in termini non solo di estensione, ma anche di profondità dei tiranti idrici, permette di valutare in maniera specifica la risposta della rete stradale e le conseguenze dell'alluvione sulla mobilità stradale in caso di evacuazione, individuando i percorsi più veloci per uscire dalla zona di pericolo nel minor tempo possibile.
Avere un'idea della dinamica dell'alluvione disponendo di mappe di pericolosità per determinati istanti temporali, permette anche di valutare, nel caso di scenari simili a quello studiato, il livello idrometrico nelle stazioni idrometriche e avere dunque delle soglie di riferimento che garantiscono, con un certo fattore di sicurezza, i tempi di inizio e di fine in cui l'evacuazione deve avvenire, come si evince dai risultati di Tab.2.10.
La modellazione della rete stradale, integrata con le informazioni di rischio legate ad un ipotetico scenario alluvionale sull'Adda nel Comune di Lodi, ha permesso di fornire strumenti di supporto per la gestione del rischio alluvionale valutando l'accessibilità in termini di copertura territoriale dei servizi critici per l'emergenza, come ospedali, Vigili del Fuoco, Carabinieri e Volontari di Protezione Civile.

Attraverso l'analisi delle service area, in coerenza con altri studi, è stato dimostrato che la copertura territoriale dei servici critici individuati diminuisce in seguito ad uno scenario alluvionale rispetto alle condizioni dello scenario ordinario.
Tale risultato può essere utilizzato per stabilire, in base alle richieste di determinati servizi critici e alle condizioni di scenario, la posizione di determinati servizi in maniera da garantire comunque una certa copertura territoriale, sottolineando che distribuire in maniera omogenea i servizi critici utilizzando più punti di servizio, là dove possibile, garantisce una copertura territoriale migliore in caso di emergenza.

Nel Capitolo 3, infine, grazie all'utilizzo del modello di trasporto i – TraM e a partire dall'area di studio comprendente la Provincia di Lodi e i suoi confini, è stata modellata la rete di trasporto stradale valutando le interruzioni di archi stradali significativi al fine di calcolare le differenze di carichi veicolari e quindi degli indicatori di viaggio, in modo da stimare monetariamente i danni indiretti che si potrebbero avere in quella determinata zona a seguito di 12 differenti scenari di simulazione.
I flussogrammi, ottenuti per ogni scenario di simulazione, permettono di capire qualitativamente come variano le condizioni di deflusso della rete di trasporto stradale.
Le stime degli indicatori di viaggio per ogni scenario di simulazione considerano quantitativamente le variazioni dei volumi di traffico e le variazioni dei tempi di percorrenza generate in seguito all'interruzione degli archi. A partire da questi indicatori di viaggio, in base a dei costi parametrici, è possibile stimare in termini monetari i danni alluvionali indiretti per ogni simulazione di scenario.
La metodologia utilizzata, riassunta nel work flow di Fig. 3.1, oltre al modello di trasporto i – TraM, tiene in considerazione le mappe di pericolosità della Direttiva Alluvioni (solo in termini di estensione dell'alluvione), la compatibilità idraulica dei ponti e l'analisi hot spot di determinate tipologie di aree rilevanti dal punto di vista socio economico le quali sono state individuate a partire da un approccio analitico alla micro – scala.
I risultati ottenuti da queste elaborazioni innanzitutto evidenziano che, con questo metodo di stima, è possibile ottenere qualche informazione in più per la gestione del rischio idraulico, in particolare fornisce informazioni sui danni indiretti causati da un'alluvione.
Considerando il caso studio, negli scenari di simulazione appartenenti al bacino dell'Adda o al bacino del Po, si hanno effetti maggiori coinvolgendo anche le Province confinanti mentre negli scenari di simulazione appartenenti al bacino del Lambro si hanno effetti più a livello locale che restano confinati nella Provincia di Lodi.
I risultati confermano inoltre che gli scenari di simulazione che numericamente considerano meno archi stradali ma che considerano archi con flussi maggiori, sono gli scenari che creano maggiori danni indiretti, per cui tale metodologia è in grado di individuare priorità di intervento identificando gli archi da proteggere con più urgenza.
Tale metodologia aiuta inoltre ad individuare con una certa priorità i ponti che devono essere soggetti ad un'analisi di vulnerabilità più dettagliata, in quanto eventuali collassi dei ponti stessi possono generare danni sistemici di grande rilevanza, come dimostra il caso della Paullese per cui tale analisi suggerisce di condurre una valutazione ulteriore e di maggiore dettaglio sulla possibilità che quell'arco stradale possa interrompersi o meno.
Osservando i tempi di percorrenza, questi tendono sempre ad aumentare. Questo accade perché i flussi non allontanati che restano nell'area di analisi utilizzano percorsi

tendenzialmente più lenti e quindi impiegano più tempo ad arrivare a destinazione. Inoltre, l'aumento dei volumi determina un incremento della congestione e quindi un ulteriore aumento dei tempi su archi prima più performanti.
Questa analisi dimostra inoltre come sia più di dettaglio avere un modello di trasporto che restituisca gli indicatori di viaggio in termini non solo di veicoli equivalenti, ma anche distinguendo i veicoli leggeri da quelli pesanti. I costi parametrici infatti variano in base alla domanda di viaggio e alle modalità di viaggio e quindi per i veicoli leggeri si utilizzano costi parametrici più bassi rispetto ai veicoli pesanti. Tale distinzione permette dunque di ottenere stime dei danni indiretti più vicine alla realtà, mentre la stima dei danni indiretti basata sui veicoli equivalenti tende a sottostimare i risultati.
Le ulteriori analisi condotte grazie al modello i – TraM hanno permesso di valutare la variazione degli indicatori di viaggio in base alla classificazione stradale, ottenendo così le variazioni dei volumi di traffico e le variazioni dei tempi di percorrenza delle sole Autostrade. Di conseguenza, utilizzando le tariffe del pedaggio autostradale, è stato possibile calcolare il mancato guadagno in caso di riduzione dei carichi stradali sulle Autostrade.
Anche in questo i risultati dimostrano che calcolare il mancato guadagno delle Autostrade distinguendo i veicoli leggeri da quelli pesanti si ottengono costi più vicini alla realtà, per le stesse motivazioni di prima, mentre facendo il calcolo in termini di veicoli equivalenti in questo caso si tende a sovrastimare il danno alluvionale indiretto generato.
Tali risultati affermano, dunque, che questa metodologia riesce a stimare economicamente i danni indiretti generati dall'interruzione di archi stradali e perciò potrebbe essere presa in considerazione in un'analisi costi benefici più dettagliata al fine di fornire maggiori indicazioni ai pianificatori e ai gestori dell'emergenza per soluzioni di gestioni del rischio più consapevoli.

Si precisa, infine, che in un'analisi costi benefici occorre comunque ricordare i limiti di questa metodologia rappresentati da:

- Disponibilità di Database aggregati di edifici da sottoporre ad un'analisi dei cluster per individuare gli Hot Spot;
- Poche valutazioni di compatibilità idraulica effettuate sui ponti (Fig. di riferimento Capitolo 3), con conseguenti archi significativi interrotti durante le simulazioni portando così a delle stime dei danni indiretti diverse da quelle che realmente si otterrebbero in scenari di alluvione simili a quelli studiati;
- Indisponibilità di mappe della pericolosità in termini di profondità dei tiranti idrici vista anche la vasta scala del problema;
- Imprescindibilità della metodologia da un modello di trasporto che riesca a calcolare gli indicatori di viaggio anche in termini di veicoli leggeri e veicoli pesanti e non solo in termini di veicoli equivalenti.
- Risultati non ancora validati in quanto non sono disponibili dati reali sui danni indiretti occorsi in scenari simili a quelli studiati, per cui occorre valutare con occhio critico le stime economiche in modo da non inficiare l'analisi costi – benefici.

Bibliografia

AdBPo. 1999. Delibera 2/1999. *Direttiva "Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B". Approvazione.* 11 Maggio 1999.

AdBPO. 2016. *PGRA - Aree a rischio significativo di alluvione ARS Distrettuali.* 2016.

Arrighi, Chiara, et al. 2019. Preparedness against mobility disruption by flood. [a cura di] Damia Barcelo. 1 Marzo 2019, Vol. 654, p. 1010 - 1022.

Assessing urban strategies for reducing the impacts of extreme weather on infrastructure networks. **Pregnolato, Maria, et al. 2016.** 160023, 5 Aprile 2016, R. Soc. open sci., Vol. 3.

Assicurazioni, UnipolSai. 2018. Comunicato Stampa. *Dati dell'Osservatorio UnipolSai sulle abitudini di guida degli Italiani.* Bologna, Italia : s.n., Novembre 2018.

Barthelemy, M. 2011. Spatial Network. s.l. : H. Orland, 8 Novembre 2011. Vol. Reports Physics 499, p. 1- 101.

Beria, Paolo, et al. 2017. *QUAINT - QUantitative Analysis of Italian National Transport Deliverable 1 - Mid-term Report 13/06/2017.* Milano, Italy : QUAINT project, 2017. ref.: RBSI14JR1Z.

Brown, Shaun e Dawson, Richard. 2016. Building network-level resilience to resource disruption from flooding: Case studies from the Shetland Islands and Hurricane Sandy. 20 Ottobre 2016, p. 8.

CNR - IRPI. 2018. *Rapporto periodico sul rischio posto alla Popolazione Italiana da Frane e Inondazioni.* s.l. : Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, 2018.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica. 2014. *Manuale per l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) dell'insediamento urbano.* [a cura di] Fabrizio Bramerini e Sergio Castenetto. Roma : Betmultimedia, 2014.

CRED - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. 2018. *Natural Disasters 2017 EM-DAT file dated 02/07/2018.* Brussels : s.n., 2018.

D. Lgs. 2 Gennaio 2018, n. 1. 2018. Codice della protezione civile. s.l., Italia : Gazzetta Ufficiale, 2 Gennaio 2018.

D. Lgs. 23 Febbraio 2010, n. 49. 2010. *Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni.* s.l., Italia : Gazzetta Ufficiale, 23 Febbraio 2010.

1992. D.Lgs. n°258. *Codice della Strada.* 30 Aprile 1992.

2001. D.M. n°6792. *Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Strade.* 2001 Novembre 2001.

DPCM. 2003. Disposizioni attuative dell'art. 2, commi 2, 3 e 4, dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003. 21 Ottobre 2003. Vol. GU n. 252 del 29 ottobre 2003.

FEDERPNEUS. 2017. Comunicato Stampa. *Italia: in crescita nel 2015 la velocità media percepita dei mezzi di trasporto.* Bologna, Italia : s.n., 24 Aprile 2017.

Flood maps in Europe—Methods, availability and use. **deMoel, H., van Alphen, J. e Aerts, J.C.J.H. 2009.** 2009, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. , Vol. 9, p. 289–301.

Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. **Büchele, B., et al. 2006.** 200, 12 Giugno 2006, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Vol. 6, p. 485–503.

FLOODsite. 2017. *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods.* 2017.

Galliani, Marta. 2017. Affidabilità delle stime di danno alluvionale al variare del livello di conoscenza della vulnerabilità. [a cura di] Daniela Molinari, Anna Rita Scorzini e Guido Minucci. 2017.

Gattai, Edoardo. 2019. Flood Damage Assessment in Support of the Definition of Risk Mitigation Strategies: The Case of Lodi. [a cura di] Daniela Molinari, Alessio Radice e Giulia Pesaro. 2019.

Hooper, E., Chapman, L. e Quinn, A. 2014. The impact of precipitation on speed-flow relationships along a UK motorway corridor. 2014, Vol. 117, 1 - 2, p. 303 - 316.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. *Climatechange 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability.* 2014.

Javid, Adeel Muhammad. 2013. Understanding Dijkstra Algorithm. *SSRN Electronic Journal.* Gennaio 2013.

Kendon, Elizabeth J., et al. 2012. Realism of rainfall in a very high resolution regional climate model. 2012, Vol. 25, 17, p. 5791–5806.

Kron, Wolfgang. 2005. Flood Risk = Hazard • Values • Vulnerability. Marzo 2005, Vol. 30, 1, p. 58 - 68.

—. 1999. Reason for the increase in natural catastrophes: The development of exposed areas. 1999, p. 82 - 94.

Legnani, Lucia. 2012. La Valutazione del Rischio secondo la Direttiva Alluvioni: una proposta metodologica applicabile al contesto italiano. [a cura di] Francesco Ballio, Scira Menoni e Daniela Molinari. 2012.

Lindell, Michael K. e Prater, Carla S. 2007. Critical Behavioral Assumptions in Evacuation Time Estimate Analysis for Private Vehicles: Examples from Hurricane Research and Planning. *Journal of Urban Planning and Development.* Marzo 2007, Vol. 133.

Merz, B., et al. 2010. Assessment of economic flood damage. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010, Vol. 10, p. 1697–1724.

Molinari, Daniela. 2012/2013. Slides - Corso: Emergency plans for hydrogeological risk (CERM). *Evacuation time estimates.* Lecco : s.n., 2012/2013.

Molinari, Daniela, et al. 2014. Ex post damage assessment: an Italian experience. 2014, Vol. 14, p. 901 – 916.

Molinari, Daniela, et al. 2019. Modelli per la previsione e gestione del danno alle reti in caso di alluvione. *MODELLI PER LA PREVISIONE E GESTIONE DEL DANNO ALLE RETI IN CASO DI ALLUVIONE.* s.l. : Fondazione AMGA, Marzo 2019.

OPCM. 2003. Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. 20 Marzo 2003. Vol. GU Serie Generale n.105 del 08-05-2003 - Suppl. Ordinario n. 72.

Opper, Stephen, Cinque, Peter e Davies, Belinda. 2010. Timeline modelling of flood evacuation operations. 2010, Vol. 3, p. 175 - 187.

Parker, D. J., Green, C. H. e Thompson, P. M. 1987. Urban flood protection benefits: A project appraisal guide. *Gower Technical.* 1987.

Penning-Rowsell, Edmund, et al. 2013. *Flood and Coastal Erosion Risk Management.* Londra : s.n., 2013.

PGRA - d.p.c.m. 27/10/16. 2016. Approvazione del Piano di gestione del rischio di alluvioni del distretto idrografico Padano. 27 Ottobre 2016.

Poljanšek, K., et al. 2017. *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less.* s.l. : Publications Office of the European Union, 2017. ISBN 978-92-79-60679-3.

Potential impacts of climate change on flood-induced travel disruptions: a case study of Portland, Oregon, USA. **Chang, H., et al. 2010.** 4, 2010, Ann. Assoc. Am. Geogr. 100 (4), 938–952., Vol. 100, p. 938 - 952.

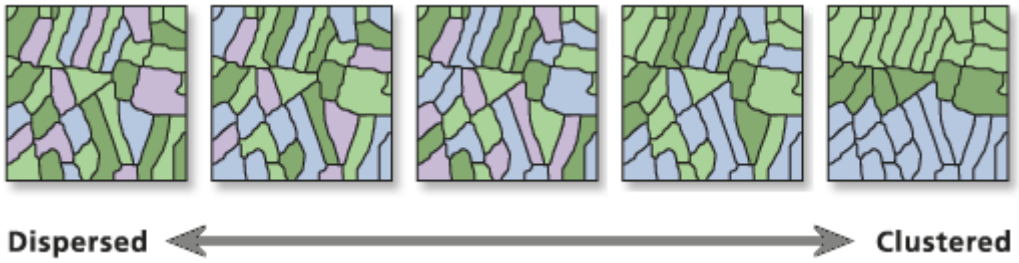
Pregnolato, Maria, et al. 2017. Impact of Climate Change on Disruption to Urban Transport Networks from Pluvial Flooding. Dicembre 2017, Vol. 23, 4.
Pregnolato, Maria, et al. 2017. The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. 23 Giugno 2017, p. 67 - 81.
Provincia di Lodi. 2007. La Provincia di Lodi Presentazione. *Provincia di Lodi.* [Online] 25 Luglio 2007. http://www.provincia.lodi.it.
Scorzini, Anna Rita, Radice, Alessio e Molinari, Daniela. 2018. A New Tool to Estimate Inundation Depths by Spatial Interpolation (RAPIDE): Design, Application and Impact on Quantitative Assessment of Flood Damages. Water 2018, 10, 1805. s.l. : MDPI, 8 Dicembre 2018. Vol. 10.
Smith, K. e Ward, R. 1998. Floods: Physical processes and human impacts. *Smith, K. and Ward, R.:.* 1998.
Studio Paoletti Ingegneri Associati. 2005, aggiornamento 2010. *Studio idrologico-idraulico del tratto di F. Adda inserito nel territorio comunale.* 2005, aggiornamento 2010. Relazione idrologica-idraulica.
Trigila, A., et al. 2018. *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio.* ISPRA. 2018. Rapporti 287/2018. ISBN 978-88-448-0901-0.
Urbanik, T. 2000. Evacuation time estimates for nuclear power plants. *Journal of Hazardous Materials.* 2000, Vol. 75, p. 165 - 180.
Wang, Fahui e Xu, Yanqing. 2011. Estimating O–D travel time matrix by Google Maps API: implementation, advantages,. 2011, Vol. 17, 4, p. 199-209.

APPENDICE

Analisi dei Cluster

All'interno dello *Spatial Statistics Tools* di ArcMAP è possibile trovare una serie di *tools* utili per eseguire l'analisi dei Cluster. Lo strumento Hot Spot Analysis (Getis – Ord Gi*) è il tool di ArcMAP che permette di analizzare i cluster individuando gli Hot Spot e i Cold Spot. Al fine di ottimizzare l'analisi, si suggerisce di utilizzare tutti i seguenti strumenti nell'ordine specificato nello schema delle procedure per l'Analisi dei Cluster. Ogni procedura fornisce degli output da utilizzare come input nella procedura successiva fino ad ottenere la massima banda di distanza utile per stabilire il miglior metodo di misurazione della relazione reciproca spaziale fra gli elementi di un dataset.

1) <u>Spatial Autocorrelation (Global Moran's I)</u>



Lo strumento Spatial Autocorrelation (Global Moran's I) misura l'autocorrelazione spaziale in base alle posizioni e ai valori degli elementi in maniera simultanea. Dato un insieme di elementi (puntiformi o poligonali) e un attributo associato, questo indice valuta la distribuzione del campione stabilendo se è raggruppato (clustered), disperso o casuale, rispetto a quel determinato attributo.
Lo strumento calcola il valore dell'indice Moran's I

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \omega_{i,j} \cdot z_i \cdot z_j}{\sum_{i=1}^{n} z_i^2}$$

Con

- $z_i = (x_i - \bar{X})$ Rappresenta la deviazione dell'attributo di un determinato elemento i dalla sua media
- $\omega_{i,j}$ Rappresenta il peso spaziale tra l'elemento i e l'elemento j
- n Rappresenta il numero totale degli elementi del set di dati
- $S_0 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \omega_{i,j}$ Rappresenta l'aggregazione di tutti i pesi spaziali

I valori dell'indice non possono essere interpretati direttamente; lo strumento Spatial Autocorrelation (Global Moran's I) è una statistica inferenziale, il che significa che i risultati dell'analisi sono sempre interpretati nel contesto della sua ipotesi nulla.

Per la statistica di Global Moran I, l'ipotesi nulla afferma che l'attributo che viene analizzato è distribuito casualmente tra le caratteristiche dell'area di studio; detto in altro modo, la distribuzione spaziale in base ad un valore osservato è casuale.
Perciò, dopo che lo strumento Spatial Autocorrelation (Global Moran's I) calcola il valore dell'Indice, viene calcolato il valore atteso e la varianza dell'indice.

$$E[I] = -\frac{1}{(n-1)}$$ Valore atteso dell'indice I

$$V[I] = E[I^2] - E[I]^2$$ Varianza dell'indice I

I valori dell'indice previsto e osservato vengono quindi confrontati e normalizzati per la varianza dell'indice, calcolando così uno z_I – score e un p – value che indica se tale differenza è statisticamente significativa o meno.

$$z_I = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}}$$

I p – value sono approssimazioni numeriche dell'area sotto la curva per una distribuzione nota, limitata dalla statistica del test.

Se i valori nel set di dati tendono a raggrupparsi nello spazio l'indice di Moran sarà positivo e di conseguenza possiamo avere o dei cluster di valori elevati vicino ad altri valori alti oppure dei cluster di valori bassi vicino ad altri valori bassi.

Quando invece i valori alti respingono altri valori elevati e tendono ad essere vicini a valori bassi, l'indice sarà negativo. Il numeratore dello z_I – score è normalizzato dalla varianza in modo che i valori dell'indice variano tra -1.0 e +1.

$z_I < 0$ Gli elementi sono distribuiti in maniera dispersa. Non si creano Cluster

$z_I > 0$ Gli elementi sono distribuiti in maniera aggregata. Si creano Cluster

Quando il p - value restituito da questo strumento è statisticamente significativo, è possibile rifiutare l'ipotesi nulla. La tabella seguente riassume l'interpretazione dei risultati.

Maggiori dettagli ai seguenti link:

http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/spatial-autocorrelation.htm

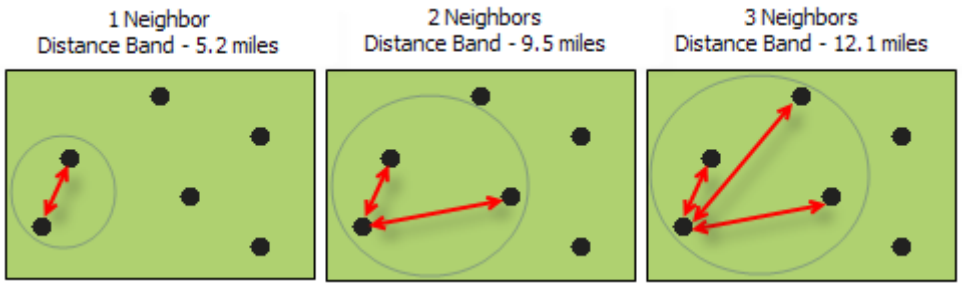
http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-spatial-autocorrelation-moran-s-i-spatial-st.htm

Il valore p *non* è statisticamente significativo.	Non puoi rifiutare l'ipotesi nulla. È abbastanza probabile che la distribuzione spaziale dei valori degli elementi sia il risultato di processi spaziali casuali. Lo schema spaziale osservato dei valori degli elementi potrebbe benissimo essere una delle tante, molte possibili versioni di casualità spaziale completa (CSR).
Il valore p *è* statisticamente significativo e il punteggio z è positivo.	Puoi rifiutare l'ipotesi nulla. La distribuzione spaziale di valori alti e / o valori bassi nel set di dati è più spazialmente distribuita come cluster di quanto ci si aspetterebbe se i processi spaziali sottostanti fossero casuali.
Il valore p *è* statisticamente significativo e il punteggio z è negativo.	Puoi rifiutare l'ipotesi nulla. La distribuzione spaziale di valori elevati e valori bassi nel set di dati è più dispersiva nello spazio di quanto ci si aspetterebbe se i processi spaziali sottostanti fossero casuali. Un modello spaziale disperso spesso riflette un certo tipo di processo competitivo: un elemento con un valore elevato dell'attributo respinge altri elementi con valori elevati; allo stesso modo, un elemento con un valore basso respinge altri elementi con valori bassi.

2) Calculate Distance Band from Neighbor Count

Questo strumento restituisce il minimo, il massimo e la distanza media che un elemento ha rispetto agli N elementi più vicini. N è un parametro di input.

Nel caso studio del Capitolo 3 si è utilizzato questo tool per individuare la distanza di soglia media rispetto ad un solo punto vicino (neighbor), per cui è stato preso N=1.



Questo strumento fornisce una strategia per determinare un valore di distanza di soglia (distance – band) da utilizzare con alcuni *tools* dello *Spatial Statistics tools* come Hot Spot Analysis (Getis – Ord Gi*).

Maggiori dettagli al seguente link:

http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-statistics/calculate-distance-band-from-neighbor-count.htm

3) Incremental Spatial Autocorrelation

Questo strumento misura l'autocorrelazione spaziale per una serie di distanze e opzionalmente crea un grafico a linee di quelle distanze in base al loro corrispondente z – score.
Gli z – score rispecchiano l'intensità del clustering spaziale, e gli z-score di picco statisticamente significativi indicano le distanze in cui i processi spaziali che promuovono il clustering sono più pronunciati.
Queste distanze di picco sono spesso valori appropriati da utilizzare per gli strumenti con un parametro Distance Band o Distance Radius, come ad esempio per il tool Hot Spot Analysis (Getis – Ord Gi*) utilizzato nella Procedura 5.

I picchi Z-score riflettono le distanze in cui i processi spaziali che promuovono il clustering sono più pronunciati.

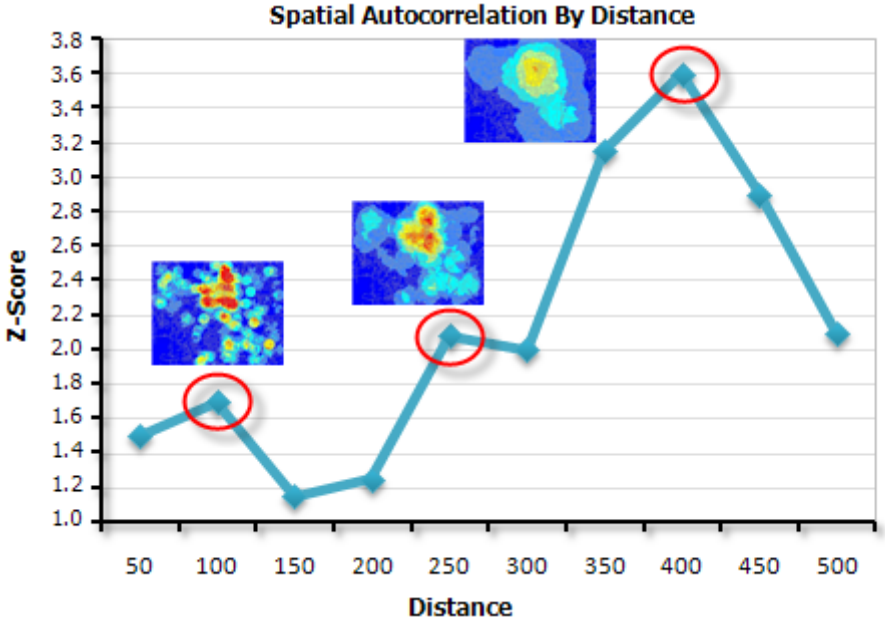
Tutte le misurazioni della distanza sono basate sui centroidi degli elementi e la distanza iniziale è la distanza più piccola che garantirà che ogni elemento abbia almeno una elemento adiacente, cioè è la distanza calcolata nella Procedura 2 per N=1.

La distanza di incremento predefinita è la distanza media dalla caratteristica vicina più prossima a ciascun elemento. Nel caso in cui si utilizzi una distanza iniziale appropriata usando le strategie sopra riportate (punto 2) e non si ha ancora una distanza di picco, si potrebbero sperimentare distanze di incremento più o meno grandi. In questo caso potrebbe essere meglio utilizzare la distanza minima o la distanza massima calcolate nella Procedura 2, invece della distanza media.

Maggiori dettagli ai seguenti link:

http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/incremental-spatial-autocorrelation.htm

http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-statistics/how-incremental-spatial-autocorrelation-works.htm



4) Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi*)

Questo strumento identifica cluster spaziali statisticamente significativi di valori elevati (Hot Spot) e di valori bassi (Cold Spot).

Per ciascun elemento della classe di elementi in input, questo strumento crea una nuova classe di elementi in output con uno z – score, un p – value e un intervallo di confidenza (Gi_Bin) per ciascuna elemento della classe di elementi in input.

Lo z – score e il p - value sono misure di significatività statistica, calcolate per ogni elemento in relazione a tutti gli altri elementi, che indicano se rifiutare o meno l'ipotesi nulla.
In effetti, indicano se il raggruppamento spaziale osservato di valori alti o bassi è più

pronunciato di quanto ci si aspetterebbe in una distribuzione casuale di quegli stessi valori.
Il campo Gi_Bin identifica gli Hot Spot e i Cold Spot statisticamente significativi. Le caratteristiche Gi_bin riflettono i seguenti livelli di significatività statistica con determinati livelli di confidenza:

- Per Gi_bin = +/- 3 si intende una significatività statistica con un livello di confidenza del 99%;
- Per Gi_bin = +/- 2 si intende una significatività statistica con un livello di confidenza del 95%;
- Per Gi_bin = +/- 1 si intende una significatività statistica con un livello di confidenza del 90%;
- Per Gi_bin = 0 il clustering non è statisticamente significativo, per cui non si può rigettare l'ipotesi nulla e quindi gli elementi sono spazialmente distribuiti in modo casuale.

Un alto punteggio z e un piccolo valore p per una funzione indicano un raggruppamento spaziale di Hot Spot. Un punteggio z negativo basso e un piccolo valore p indica un raggruppamento spaziale di Cold Spot. Più alto (o più basso) è il punteggio z, più intenso è il clustering. Un punteggio z vicino allo zero indica nessun apparente raggruppamento spaziale.

E' possibile scegliere diversi metodi per misurare le relazioni spaziali fra gli elementi. La scelta del metodo di misurazione per le relazioni spaziali fra gli elementi i-esimi e j-esimi è fondamentale in quanto più realisticamente si riesce a modellare l'interazione reciproca nello spazio fra gli elementi, più si ottengono risultati accurati.

Il metodo FIXED_DISTANCE_BAND funziona bene per gli elementi puntiformi ed è l'opzione predefinita utilizzata dallo strumento Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi *). È spesso una buona opzione per i dati poligono quando vi è una grande variazione nelle dimensioni dei poligoni (poligoni molto grandi ai margini dell'area di studio e poligoni molto piccoli al centro dell'area di studio, ad esempio) e si desidera garantire una scala coerente di analisi.

Per ottimizzare l'Hot Spot Analysis dei Cluster è bene utilizzare una banda di distanza che rifletta la massima autocorrelazione spaziale.

La banda di distanza che mostra il massimo clustering, misurata dallo strumento Incremental Spatial Autocorrelation, è la distanza in cui tali processi spaziali sono più attivi o più pronunciati.

Si spiega così l'utilità delle procedure precedenti. Utilizzando lo strumento Incremental Spatial Autocorrelation si calcola la banda di distanza massima in corrispondenza del massimo z – score di picco.

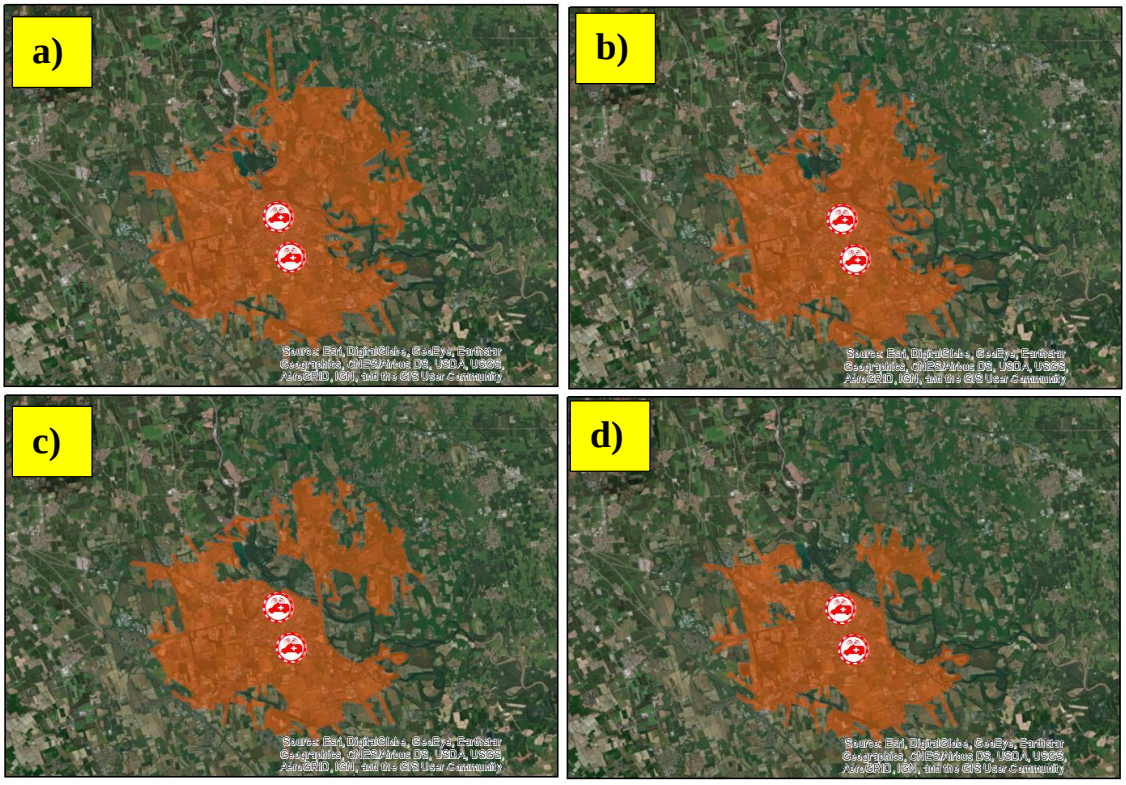
Maggiori dettagli ai seguenti link:

http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/hot-spot-analysis.htm

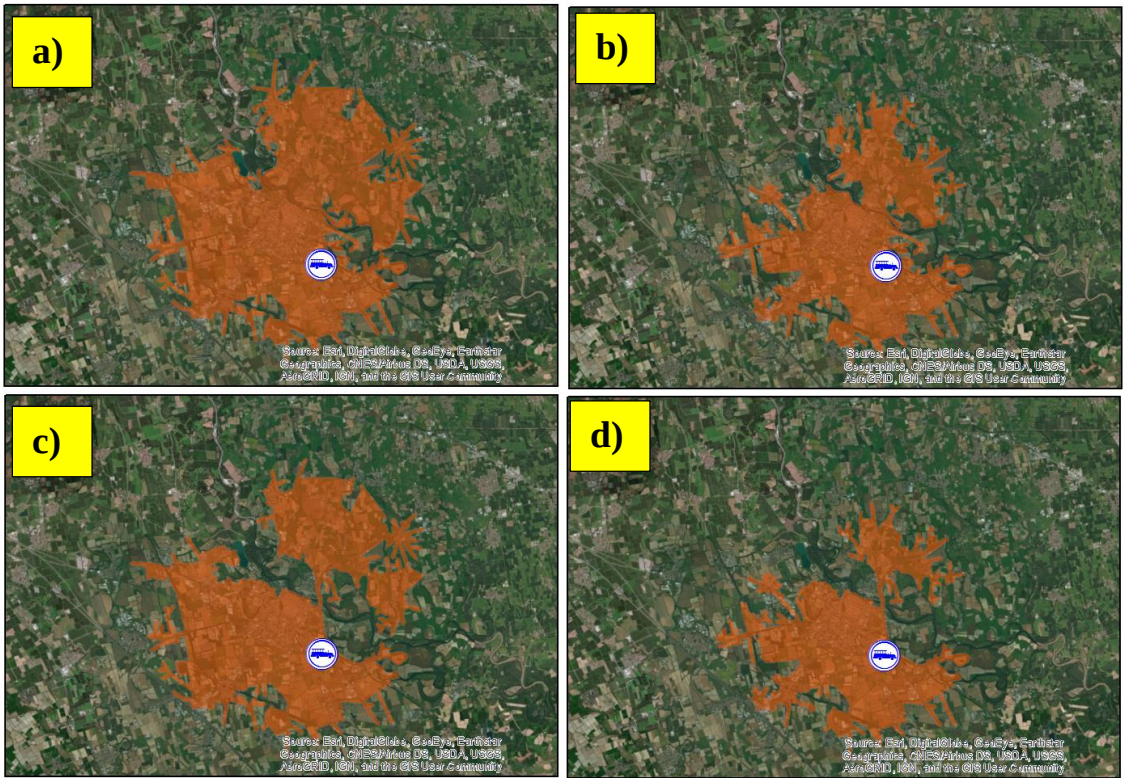
http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/modeling-spatial-relationships.htm

ALLEGATI

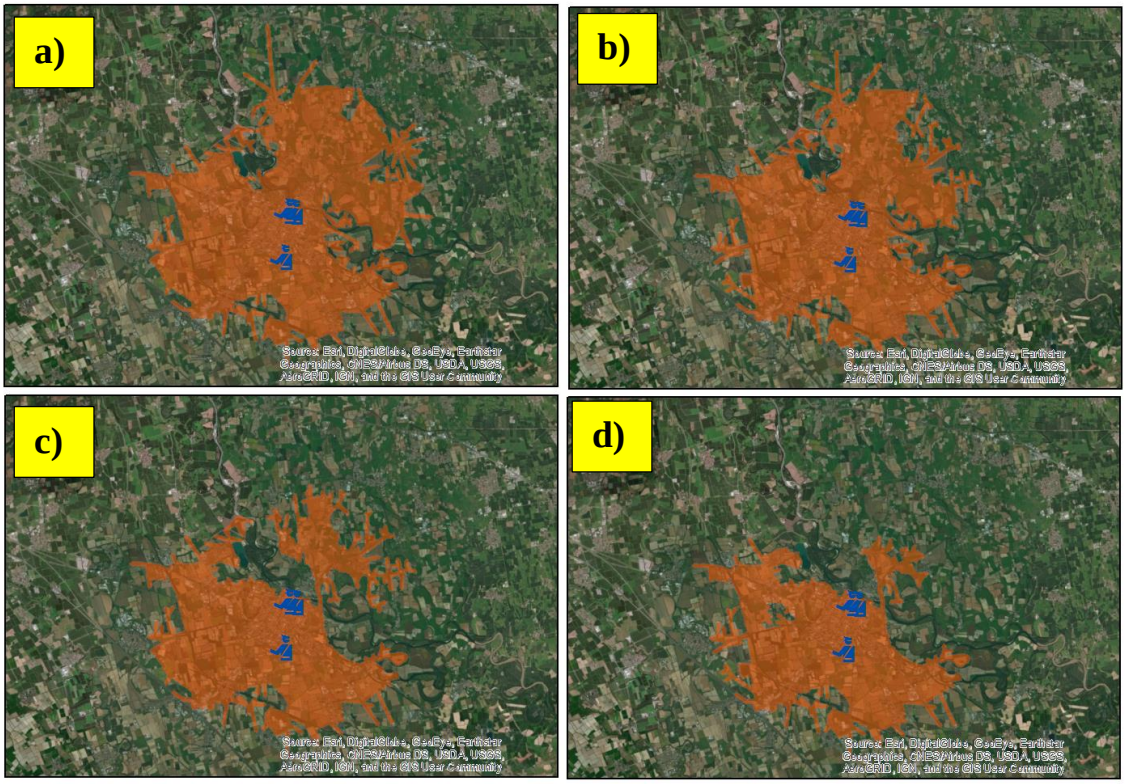
ALLEGATO A - Service Area Stazioni Ambulanze Lodi - a) Condizione Ordinaria 100% Vmax; b) Condizione Ordinaria 80% Vmax; c) Condizione Alluvione 100% Vmax; d) Condizione Alluvione 80% Vmax



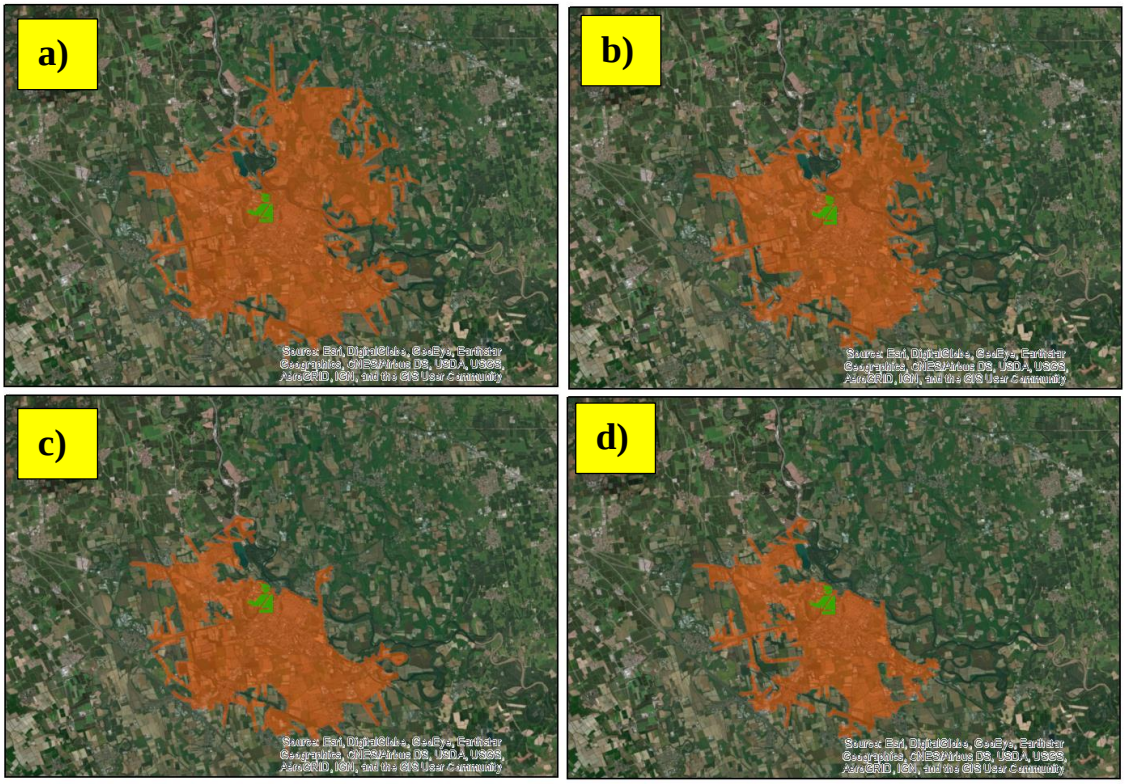
ALLEGATO B - Service Area Vigili del Fuoco Lodi - a) Condizione Ordinaria 100% Vmax; b) Condizione Ordinaria 80% Vmax; c) Condizione Alluvione 100% Vmax; d) Condizione Alluvione 80% Vmax



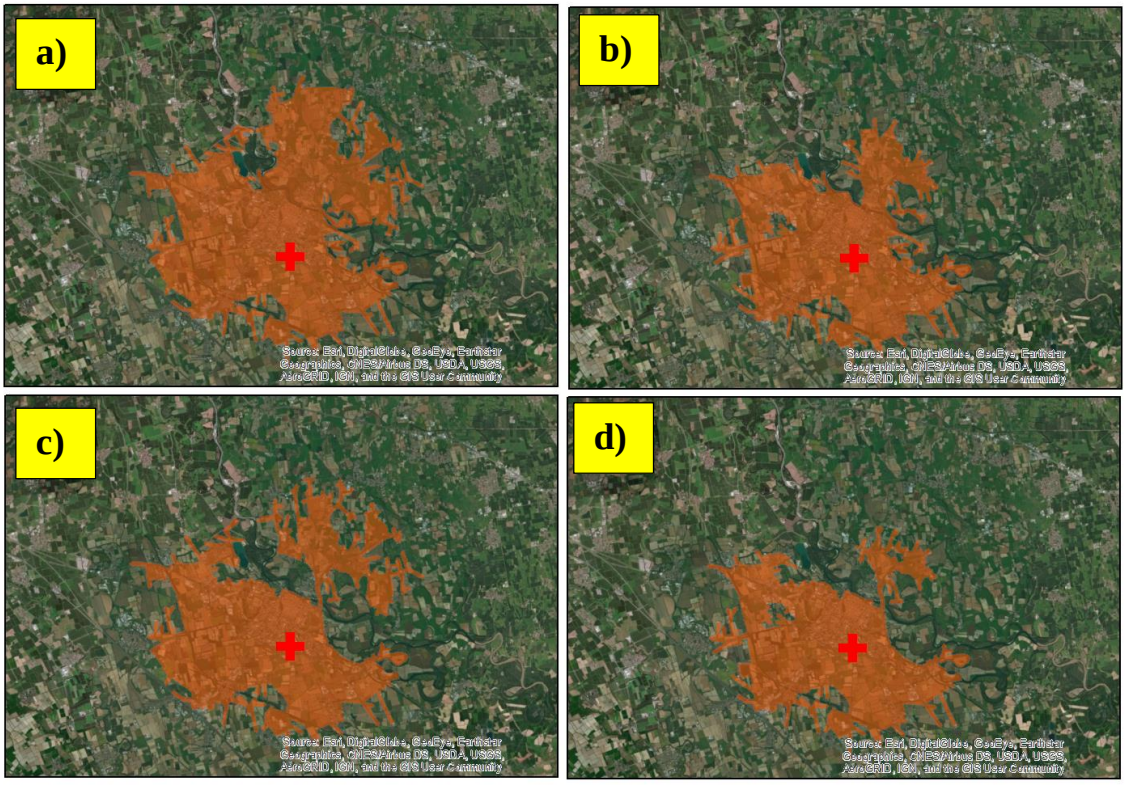
ALLEGATO C - Service Area Carabinieri Lodi - a) Condizione Ordinaria 100% Vmax; b) Condizione Ordinaria 80% Vmax; c) Condizione Alluvione 100% Vmax; d) Condizione Alluvione 80% Vmax



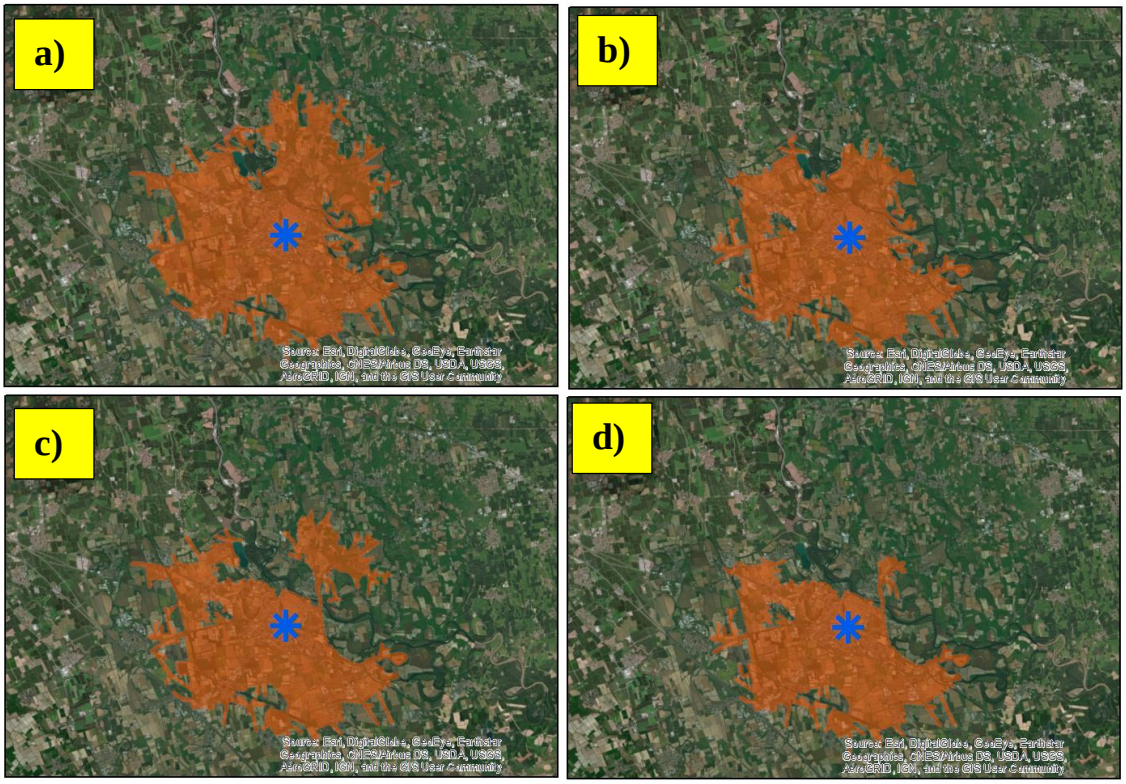
ALLEGATO D - Service Area Polizia Locale Lodi - a) Condizione Ordinaria 100% Vmax; b) Condizione Ordinaria 80% Vmax; c) Condizione Alluvione 100% Vmax; d) Condizione Alluvione 80% Vmax



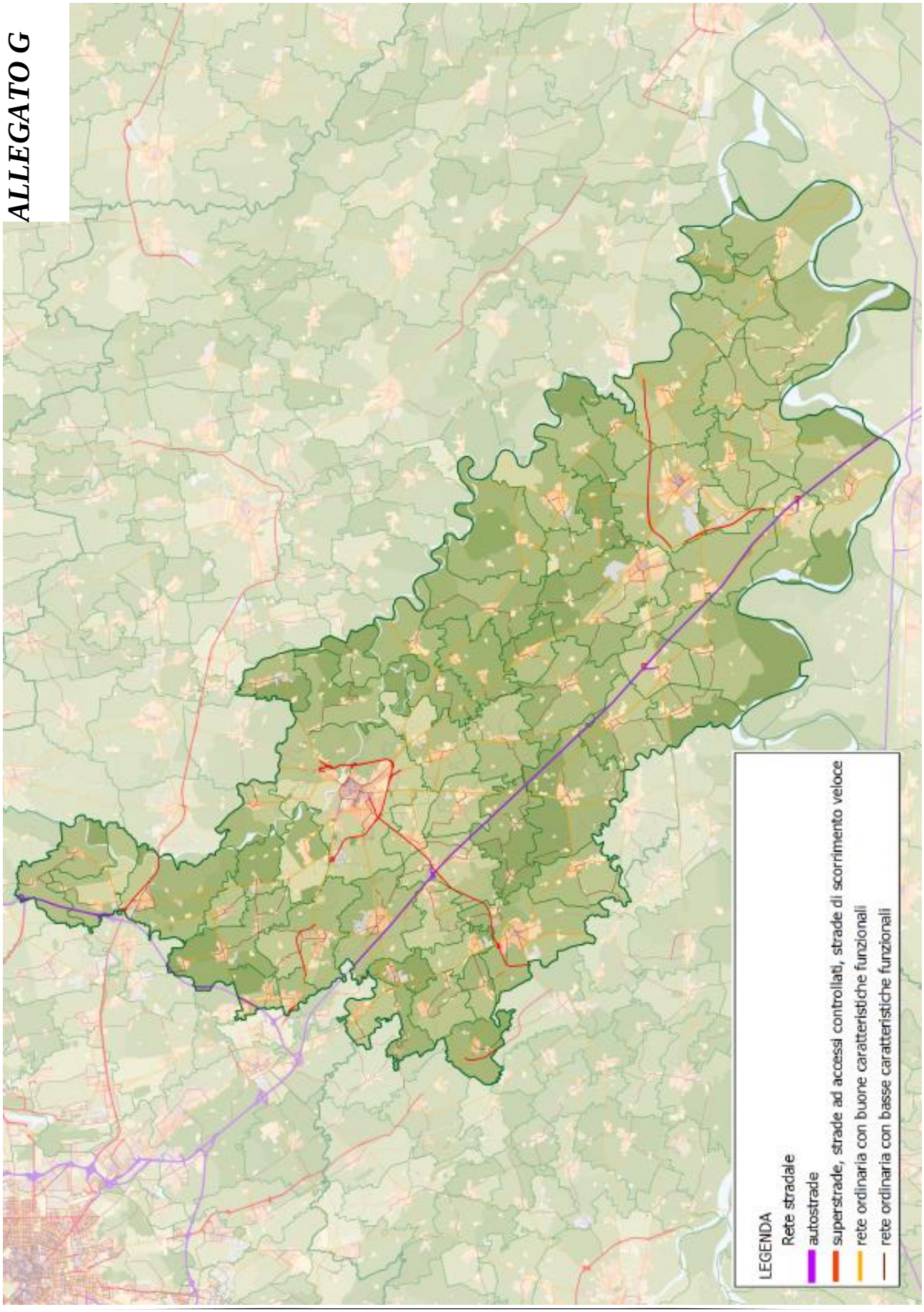
ALLEGATO E - Service Area AE Soccorritori e Risorse Lodi - a) Condizione Ordinaria 100% Vmax; b) Condizione Ordinaria 80% Vmax; c) Condizione Alluvione 100% Vmax; d) Condizione Alluvione 80% Vmax



ALLEGATO F - Service Area Volontari PC Lodi - a) Condizione Ordinaria 100% Vmax; b) Condizione Ordinaria 80% Vmax; c) Condizione Alluvione 100% Vmax; d) Condizione Alluvione 80% Vmax



ALLEGATO G


LEGENDA
Rete stradale
autostrade
superstrade, strade ad accessi controllati, strade di scorrimento veloce
rete ordinaria con buone caratteristiche funzionali
rete ordinaria con basse caratteristiche funzionali

ALLEGATO H

NOME COMUNE	ABITANTI	COD ISTAT	NOME COMUNE	ABITANTI	COD ISTAT	NOME COMUNE	ABITANTI	COD ISTAT
Provincia	**229.339**	**98**						
Abbadia Cerreto	299	98001	Fombio	2.311	98026	Sant'Angelo Lodigiano	13.131	98050
Bertonico	1.167	98002	Galgagnano	1.246	98027	Santo Stefano Lodigiano	1.944	98051
Boffalora d'Adda	1.759	98003	Graffignana	2.686	98028	Secugnago	2.031	98052
Borghetto Lodigiano	4.483	98004	Guardamiglio	2.708	98029	Senna Lodigiana	1.960	98053
Borgo San Giovanni	2.353	98005	Livraga	2.608	98030	Somaglia	3.830	98054
Brembio	2.684	98006	Lodi	44.649	98031	Sordio	3.265	98055
Casaletto Lodigiano	3.086	98008	Lodi Vecchio	7.526	98032	Tavazzano con Villavesco	6.193	98056
Casalmaiocco	2.972	98009	Maccastorna	66	98033	Terranova dei Passerini	906	98057
Casalpusterlengo	15.250	98010	Mairago	1.408	98034	Turano Lodigiano	1.555	98058
Caselle Landi	3.110	98011	Maleo	3.227	98035	Valera Fratta	1.676	98059
Caselle Lurani	1.623	98012	Marudo	1.659	98036	Villanova del Sillaro	1.831	98060
Castelgerundo	1.521	98062	Massalengo	4.508	98037	Zelo Buon Persico	7.211	98061
Castelnuovo Bocca d'Adda	1.648	98013	Meleti	474	98038			
Castiglione d'Adda	4.774	98014	Merlino	1.807	98039			
Castiraga Vidardo	2.719	98015	Montanaso Lombardo	2.306	98040			
Cavenago d'Adda	2.234	98017	Mulazzano	5.742	98041			
Cervignano d'Adda	2.173	98018	Orio Litta	2.057	98042			
Codogno	15.820	98019	Ospedaletto Lodigiano	1.907	98043			
Comazzo	2.233	98020	Ossago Lodigiano	1.446	98044			
Cornegliano Laudense	2.940	98021	Pieve Fissiraga	1.770	98045			
Corno Giovine	1.181	98022	Salerano sul Lambro	2.685	98046			
Cornovecchio	223	98023	San Fiorano	1.844	98047			
Corte Palasio	1.540	98024	San Martino in Strada	3.658	98048			
Crespiatica	2.192	98025	San Rocco al Porto	3.524	98049			

ALLEGATO I

CARABINIERI			
N°	**Tenenze CC**	**Utenti**	**Competenza Territoriale**
1	Lodi	55.685	Abbadia Cerreto, Boffalora d'Adda, Cornegliano Laudense, Corte Palasio, Crespiatica, Lodi, Montanaso Lombardo
2	Lodi Vecchio	13.297	Casaletto Lodigiano, Lodi Vecchio, Salerano sul Lambro
3	Tavazzano con Villavesco	19.418	Casalmaiocco, Galgagnano, Mulazzano, Sordio, Tavazzano con Villavesco
4	Sant'Angelo Lodigiano	24.931	Borgo San Giovanni, Caselle Lurani, Castiraga Vidardo, Marudo, Pieve Fissiraga, Sant'Angelo Lodigiano, Valera Fratta
5	Borghetto Lodigiano	14.954	Borghetto Lodigiano, Graffignana, Massalengo, Ossago Lodigiano, Villanova del Sillaro
6	Cavenago d'Adda	8.855	Cavenago d'Adda, Mairago, San Martino in Strada, Turano Lodigiano
7	Zelo Buon Persico	13.424	Cervignano d'Adda, Comazzo, Merlino, Zelo Buon Persico
8	Codogno	23.805	Codogno, Fombio, San Fiorano, Somaglia
9	Castelnuovo Bocca d'Adda	5.298	Caselle Landi, Castelnuovo Bocca d'Adda, Maccastorna, Meleti
10	Casalpusterlengo	19.965	Brembio, Casalpusterlengo, Secugnago
11	Orio Litta	8.532	Livraga, Orio Litta, Ospedaletto Lodigiano, Senna Lodigiana
12	Guardamiglio	8.176	Guardamiglio, San Rocco al Porto, Santo Stefano Lodigiano
13	Maleo	6.152	Castelgerundo, Corno Giovine, Cornovecchio, Maleo
14	Castiglione d'Adda	6.847	Bertonico, Castiglione d'Adda, Terranova dei Passerini

ALLEGATO J

GUARDIA DI FINANZA			
N°	**Tenenze GDF**	**Utenti**	**Competenza Territoriale**
1	Lodi	136.869	Abbadia Cerreto, Boffalora d'Adda, Borghetto Lodigiano, Borgo San Giovanni, Casaletto Lodigiano, Casalmaiocco, Caselle Lurani, Castiraga Vidardo, Cavenago d'Adda, Cervignano d'Adda, Comazzo, Cornegliano Laudense, Corte Palasio, Crespiatica, Galgagnano, Graffignana, Lodi, Lodi Vecchio, Mairago, Marudo, Massalengo, Merlino, Montanaso Lombardo, Mulazzano, Ossago Lodigiano, Pieve Fissiraga, Salerano sul Lambro, San Martino in Strada, Sant'Angelo Lodigiano, Sordio, Tavazzano con Villavesco, Valera Fratta, Villanova del Sillaro, Zelo Buon Persico
2	Casalpusterlengo	92.470	Bertonico, Brembio, Casalpusterlengo, Caselle Landi, Castelgerundo, Castelnuovo Bocca d'Adda, Castiglione d'Adda, Codogno, Corno Giovine, Cornovecchio, Fombio, Guardamiglio, Livraga, Maccastorna, Maleo, Meleti, Orio Litta, Ospedaletto Lodigiano, San Fiorano, San Rocco al Porto, Santo Stefano Lodigiano, Secugnago, Senna Lodigiana, Somaglia, Terranova dei Passerini, Turano Lodigiano

ALLEGATO K

VIGILI DEL FUOCO			
N°	**VVF**	**Utenti**	**Competenza Territoriale**
1	LODI	338.646	ABBADIA CERRETO, BOFFALORA D`ADDA, CASALMAIOCCO, CAVENAGO D`ADDA, CERVIGNANO D`ADDA, COMAZZO, CORNEGLIANO LAUDENSE, CORTE PALASIO, CRESPIATICA, GALGAGNANO, LODI, LODI VECCHIO, MAIRAGO, MASSALENGO, MERLINO, MONTANASO LOMBARDO, MULAZZANO, OSSAGO LODIGIANO, SAN MARTINO IN STRADA, SORDIO, TAVAZZANO CON VILLAVESCO, ZELO BUON PERSICO, SALA OPERATIVA PROVINCIALE
2	CASALPUSTERLENGO	81.895	BERTONICO, BREMBIO, CASALPUSTERLENGO, CASELLE LANDI, CASTELGERUNDO, CASTELNUOVO BOCCA D`ADDA, CASTIGLIONE D`ADDA, CODOGNO, CORNO GIOVINE, CORNOVECCHIO, FOMBIO, GUARDAMIGLIO, LIVRAGA, MACCASTORNA, MALEO, MELETI, ORIO LITTA, OSPEDALETTO LODIGIANO, SAN FIORANO, SAN ROCCO AL PORTO, SANTO STEFANO LODIGIANO, SECUGNAGO, SENNA LODIGIANA, SOMAGLIA, TERRANUOVA DEI PASSERINI, TURANO LODIGIANO
3	SANT'ANGELO LODIGIANO	38.137	BORGHETTO LODIGIANO, BORGO SAN GIOVANNI, CASALETTO LODIGIANO, CASELLE LURANI, CASTIRAGA VIDARDO, GRAFFIGNANA, MARUDO, PIEVE FISSIRAGA, SALERANO SUL LAMBRO, SANT`ANGELO LODIGIANO, VALERA FRATTA, VILLANOVA DEL SILLARO

ALLEGATO L

N° POSTI LETTO – OSPEDALI			
	2014	**2015**	**MEDIA BIENNIO 2014 – 2015**
LODI	324	311	318
CODOGNO	121	115	118
CASALPUSTERLENGO	54	54	54
SANT'ANGELO LODIGIANO	87	87	87
TOTALE	586	567	577

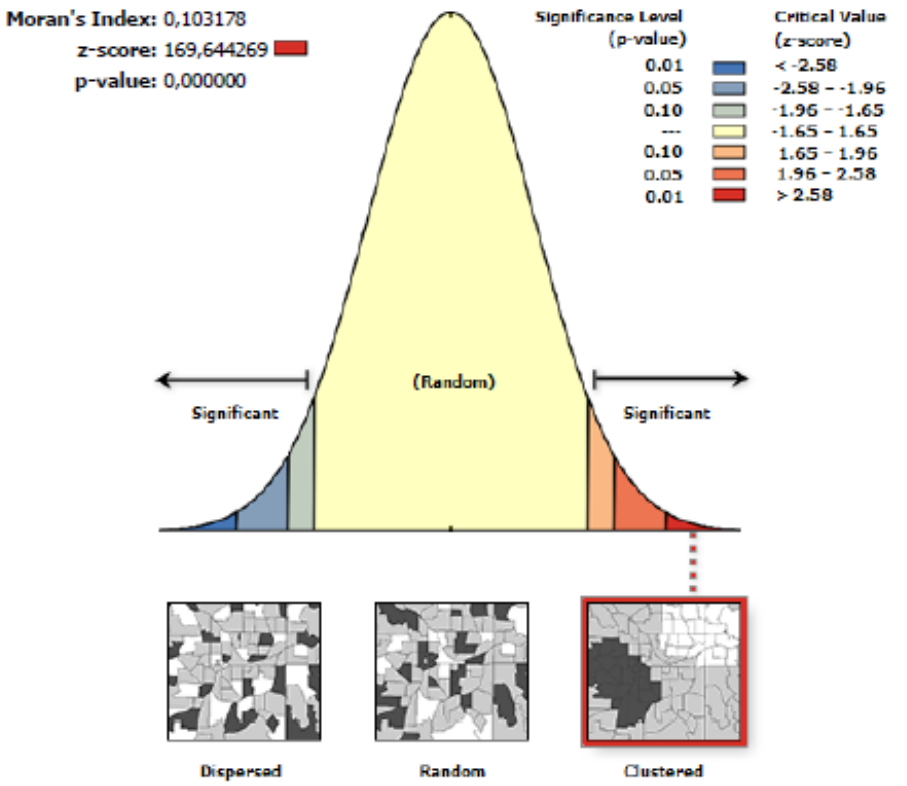
ALLEGATO M

TRIBUNALE DI LODI			
COMUNE	**CAP**	**PROVINCIA**	**N° UTENTI**
ABBADIA CERRETO	26834	LO	295
BERTONICO	26821	LO	1.185
BOFFALORA ADDA	26811	LO	1.708
BORGHETTO LODIGIANO	26812	LO	4.400
BORGO SAN GIOVANNI	26851	LO	2.297
BREMBIO	26822	LO	2.691
CAMAIRAGO	26823	LO	665
CARPIANO	20080	LO	4.000
CASALETTO LODIGIANO	26852	LO	2.857
CASALMAIOCCO	26831	LO	3.100
CASALPUSTERLENGO	26841	LO	14.962
CASELLE LANDI	26842	LO	1.660
CASELLE LURANI	26853	LO	3.108
CASTELNUOVO BOCCA ADDA	26843	LO	1.647
CASTIGLIONE ADDA	26823	LO	4.776
CASTIRAGA VIDARDO	26866	LO	2.684
CAVACURTA	26844	LO	839
CAVENAGO D'ADDA	26824	LO	2.226
CERRO AL LAMBRO	20077	MI	4.994
CERVIGNANO D'ADDA	26832	LO	2.119
CODOGNO	26845	LO	15.439
COLTURANO	20060	MI	2.012
COMAZZO	26833	LO	2.206
CORNEGLIANO LAUDENSE	26854	LO	2.879
CORNOGIOVINE	26846	LO	1.179
CORNOVECCHIO	26847	LO	214
CORTE PALASIO	26834	LO	1.153
CRESPIATICA	26835	LO	2.134
DRESANO	20077	MI	3.094
FOMBIO	26861	LO	2.299
GALGAGNANO	26832	LO	1.228
GRAFFIGNANA	26813	LO	2.638
GUARDAMIGLIO	26862	LO	2.672
LIVRAGA	26814	LO	2.621
LOCATE DI TRIULZI	20085	MI	9.861
LODI	26900	LO	43.465
LODI VECCHIO	26855	LO	7.487
MACCASTORNA	26843	LO	62

TRIBUNALE DI LODI			
COMUNE	**CAP**	**PROVINCIA**	**N° UTENTI**
MAIRAGO	26825	LO	1.411
MALEO	26847	LO	3.269
MARUDO	26866	LO	1.621
MASSALENGO	26815	LO	4.350
MEDIGLIA	20060	MI	12.850
MELEGNANO	20077	MI	17.002
MELETI	26843	LO	478
MERLINO	26833	LO	1.880
MONTANARO LOMBARDO	26836	LO	2.285
MULAZZANO	26837	LO	5.687
ORIO LITTA	26863	LO	2.027
OSPEDALETTO LODIGIANO	26864	LO	1.896
OSSAGO	26816	LO	1.425
PAULLO	20067	MI	11.153
PIEVE FISSIRAGA	26854	LO	1.651
SALERANO SUL LAMBRO	26857	LO	2.693
SAN COLOMBANO AL LAMBRO	20078	MI	7.299
SAN FIORANO	26848	LO	1.795
SAN GIULIANO MILANESE	20098	MI	36.460
SAN MARTINO IN STRADA	26817	LO	3.619
SAN ROCCO AL PORTO	26865	LO	3.521
SAN ZENONE AL LAMBRO	20070	MI	4.242
SANT'ANGELO LODIGIANO	26866	LO	12.848
SANTO STEFANO LODIGIANO	26849	LO	1.927
SECUGNAGO	26826	LO	1.986
SENNA LODIGIANA	26856	LO	2.014
SOMAGLIA	26867	LO	3.779
SORDIO	26858	LO	3.198
TAVAZZANO CON VILLAVESCO	26838	LO	6.270
TERRANOVA PASSERINI	26827	LO	905
TRIBIANO	20067	MI	3.422
TURANO LODIGIANO	26828	LO	1.553
VALERA FRATTA	26859	LO	1.679
VILLANOVA DEL SILLARO	26818	LO	1.813
VIZZOLO PREDABISSI	20070	MI	4.003
ZELO BUON PERSICO	26839	LO	7.003
TOTALE			**345.870**

ALLEGATO N

Spatial Autocorrelation Report



Given the z-score of 169.644268769, there is a less than 1% likelihood that this clustered pattern could be the result of random chance.

Global Moran's I Summary

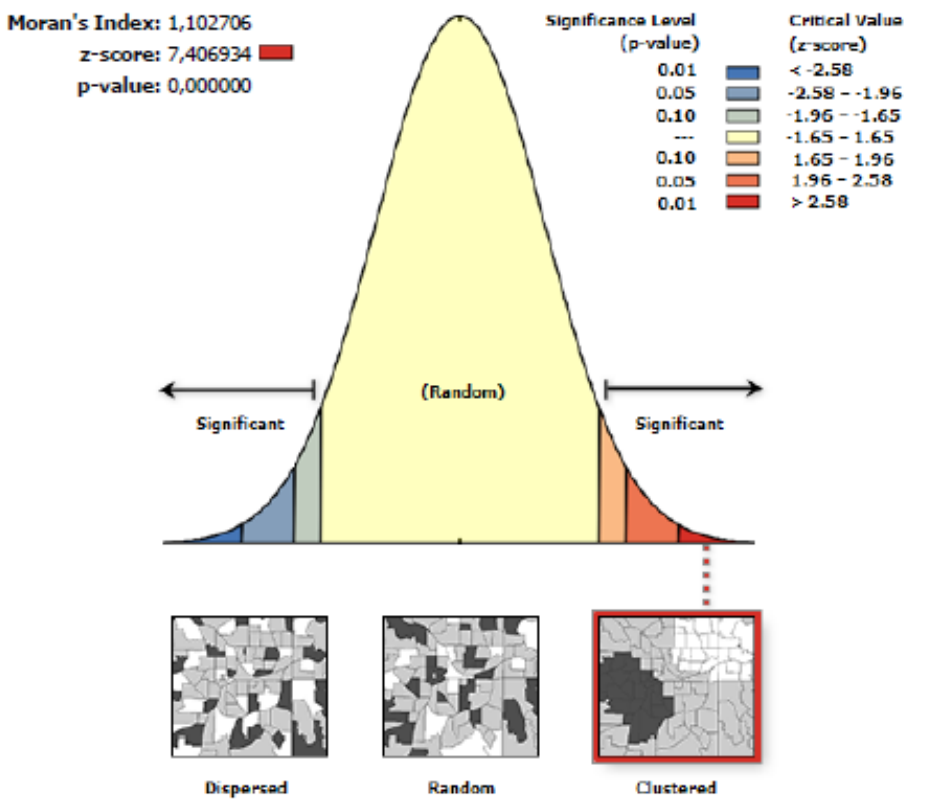
Moran's Index:	0,103178
Expected Index:	-0,000027
Variance:	0,000000
z-score:	169,644269
p-value:	0,000000

Dataset Information

Input Feature Class:	Data_Type\Residenti
Input Field:	AREA_M2
Conceptualization:	INVERSE_DISTANCE
Distance Method:	EUCLIDEAN
Row Standardization:	False
Distance Threshold:	1083,5026 Meters
Weights Matrix File:	None
Selection Set:	False

ALLEGATO O

Spatial Autocorrelation Report



Given the z-score of 7.40693411498, there is a less than 1% likelihood that this clustered pattern could be the result of random chance.

Global Moran's I Summary

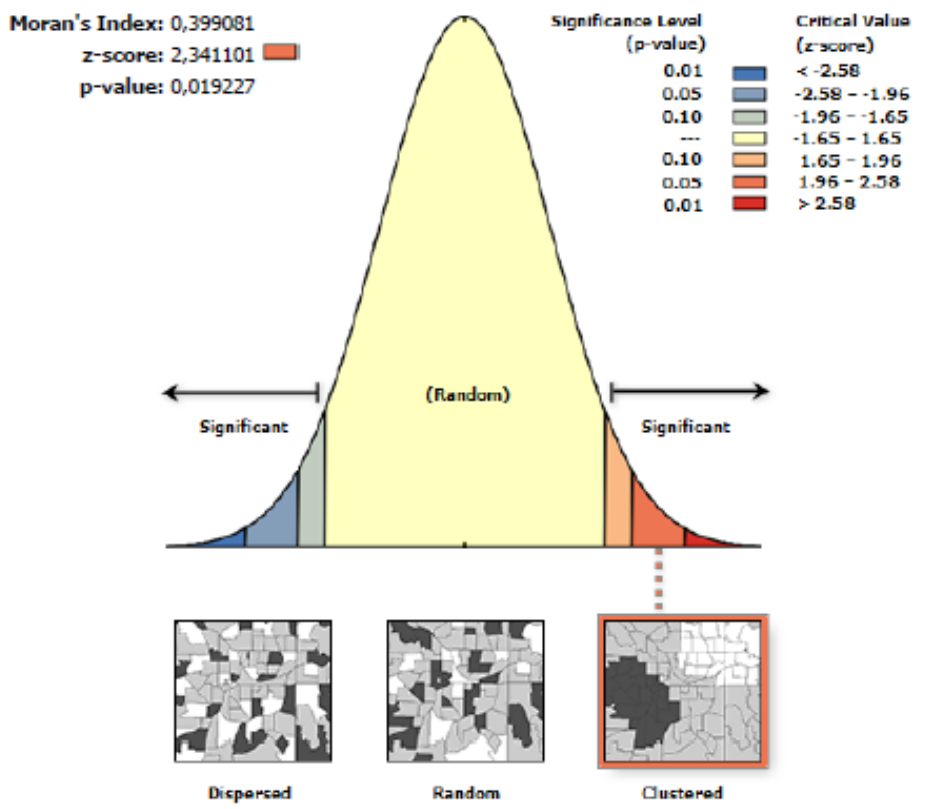
Moran's Index:	1,102706
Expected Index:	-0,008475
Variance:	0,022506
z-score:	7,406934
p-value:	0,000000

Dataset Information

Input Feature Class:	Data_Type\Servizi
Input Field:	N_UTENTI
Conceptualization:	INVERSE_DISTANCE
Distance Method:	EUCLIDEAN
Row Standardization:	False
Distance Threshold:	4676,5807 Meters
Weights Matrix File:	None
Selection Set:	False

ALLEGATO P

Spatial Autocorrelation Report



Given the z-score of 2.34110054385, there is a less than 5% likelihood that this clustered pattern could be the result of random chance.

Global Moran's I Summary

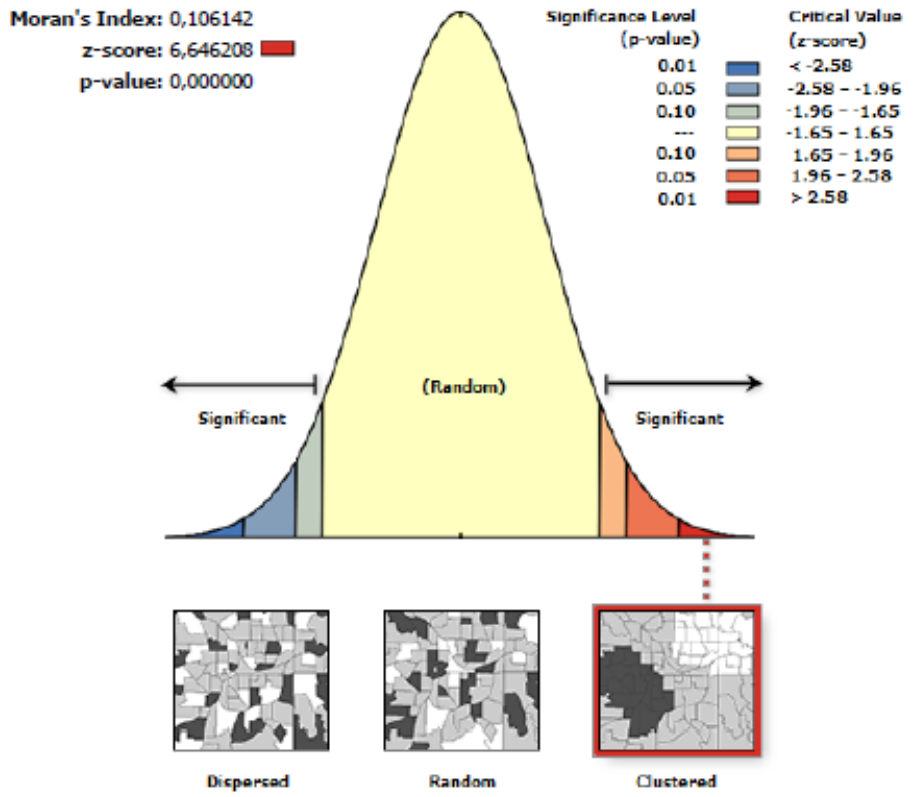
Moran's Index:	0,399081
Expected Index:	-0,006452
Variance:	0,030006
z-score:	2,341101
p-value:	0,019227

Dataset Information

Input Feature Class:	Data_Type\Scuole_Prov_LO
Input Field:	N_ALUNNI
Conceptualization:	INVERSE_DISTANCE
Distance Method:	EUCLIDEAN
Row Standardization:	False
Distance Threshold:	4346,4429 Meters
Weights Matrix File:	None
Selection Set:	False

ALLEGATO Q

Spatial Autocorrelation Report



Given the z-score of 6.64620848037, there is a less than 1% likelihood that this clustered pattern could be the result of random chance.

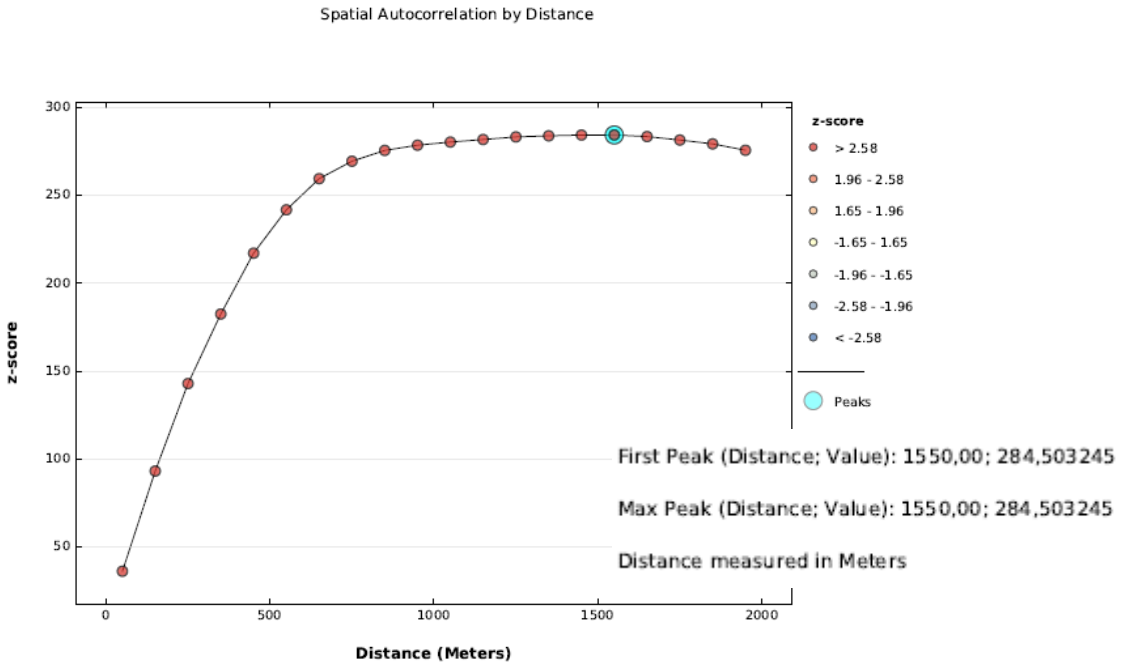
Global Moran's I Summary

Moran's Index:	0,106142
Expected Index:	-0,000519
Variance:	0,000258
z-score:	6,646208
p-value:	0,000000

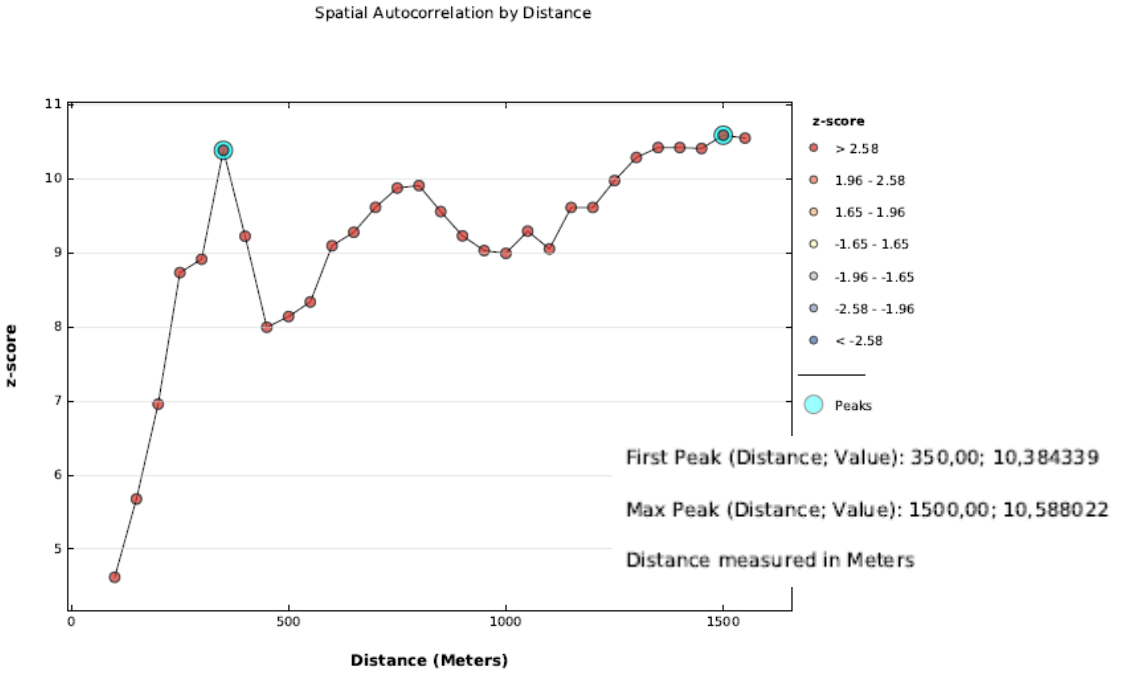
Dataset Information

Input Feature Class:	Data_Type\Aziende_ATECO
Input Field:	RICAVI
Conceptualization:	INVERSE_DISTANCE
Distance Method:	EUCLIDEAN
Row Standardization:	False
Distance Threshold:	2243,4584 Meters
Weights Matrix File:	None
Selection Set:	False

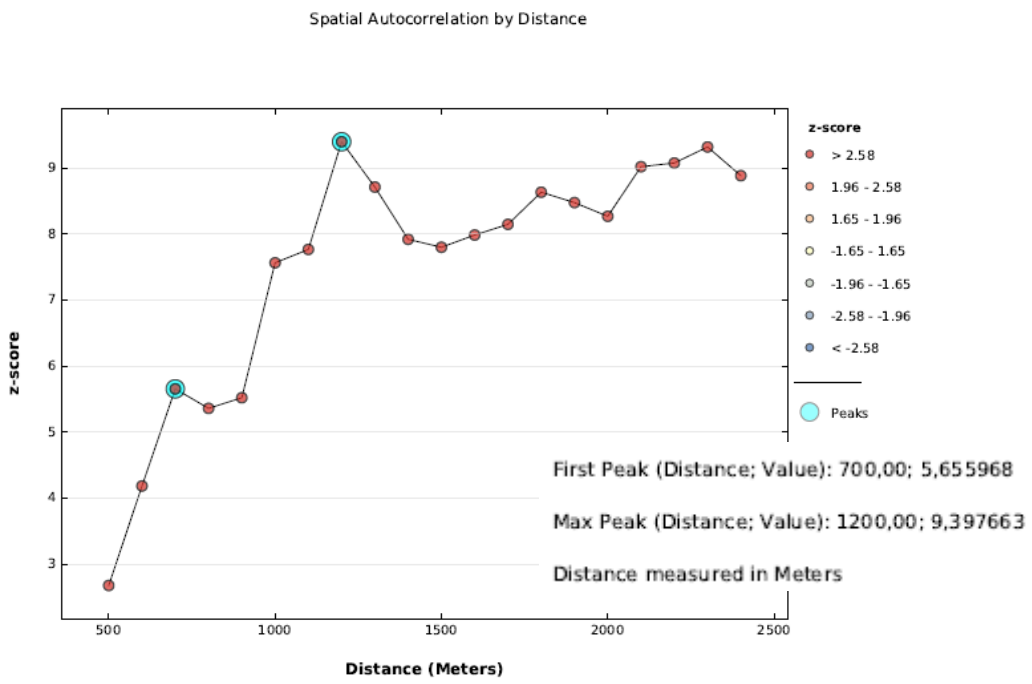
ALLEGATO R



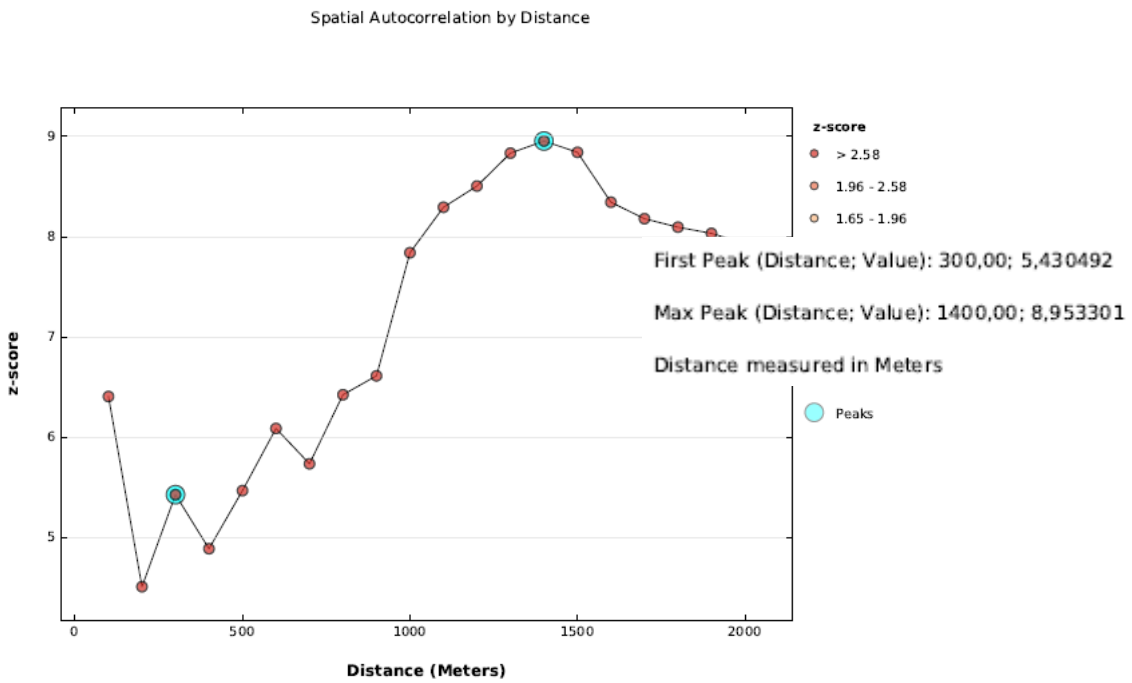
ALLEGATO S



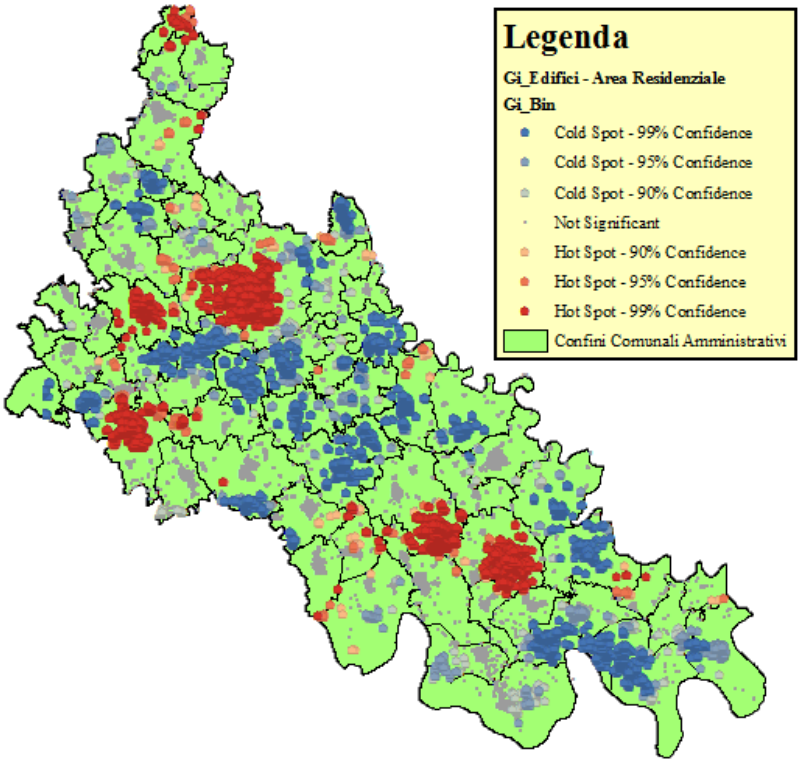
ALLEGATO T



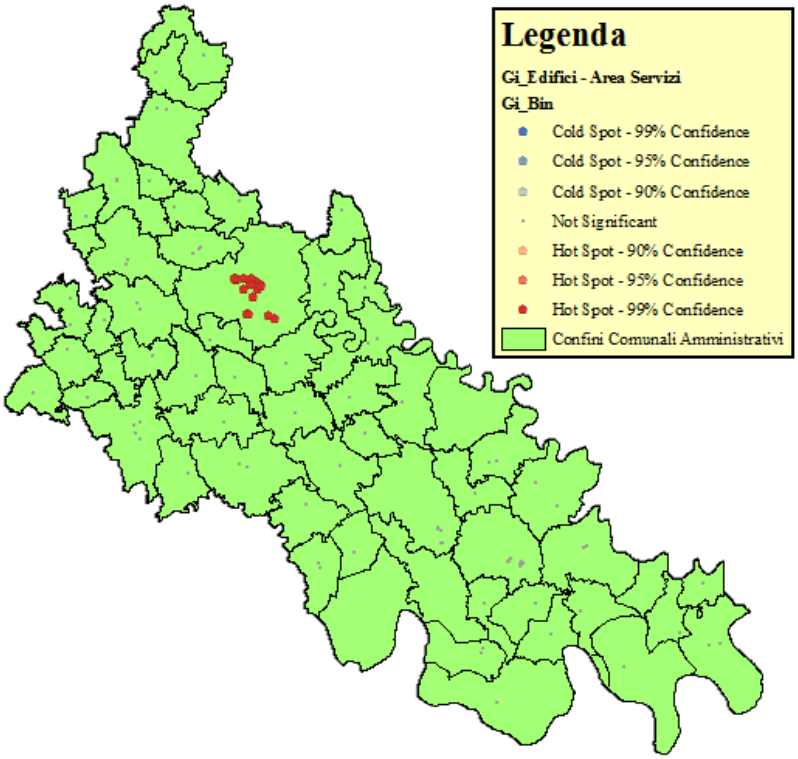
ALLEGATO U



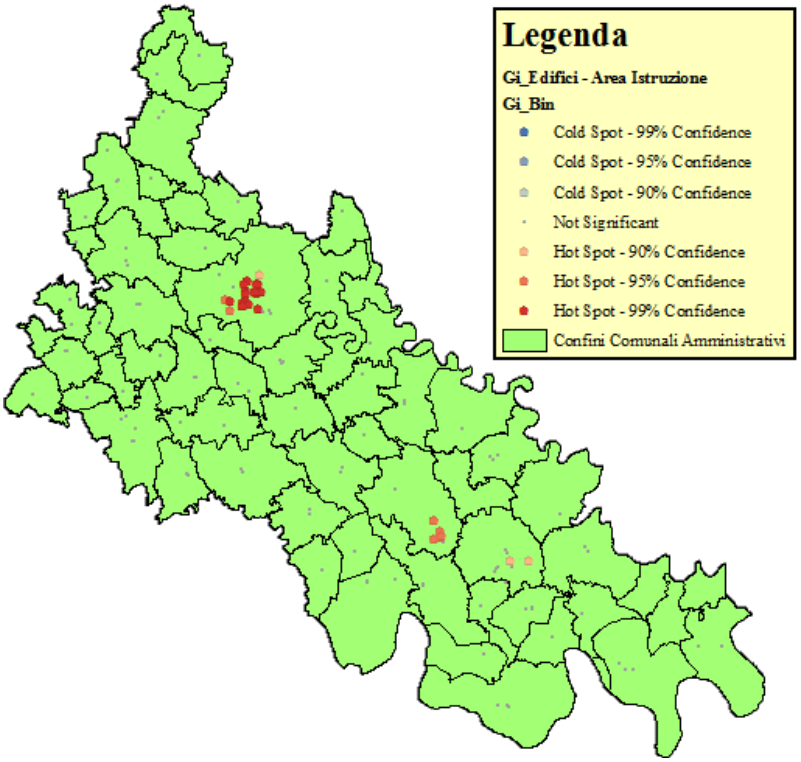
ALLEGATO V



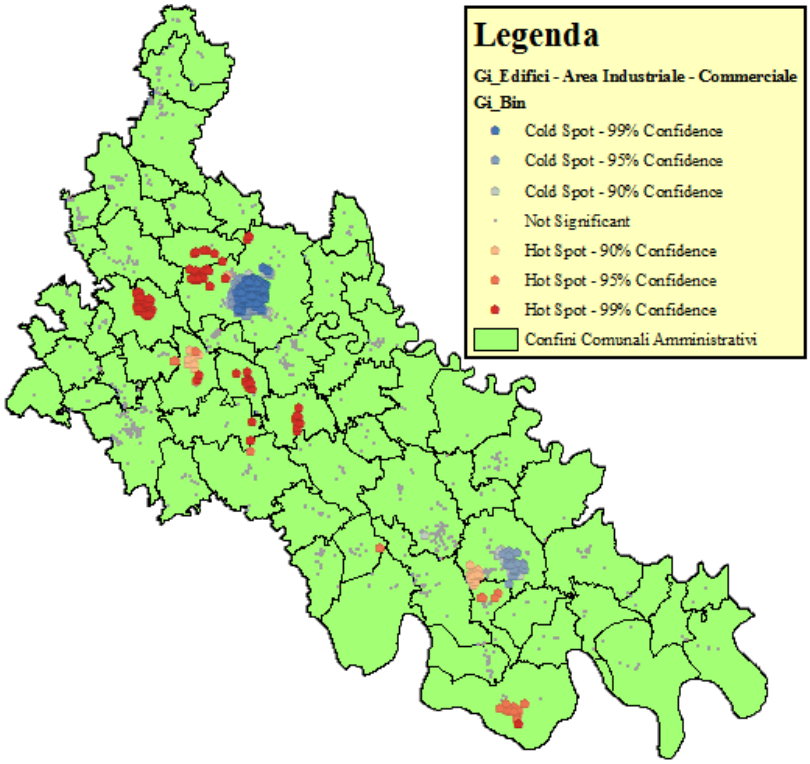
ALLEGATO W



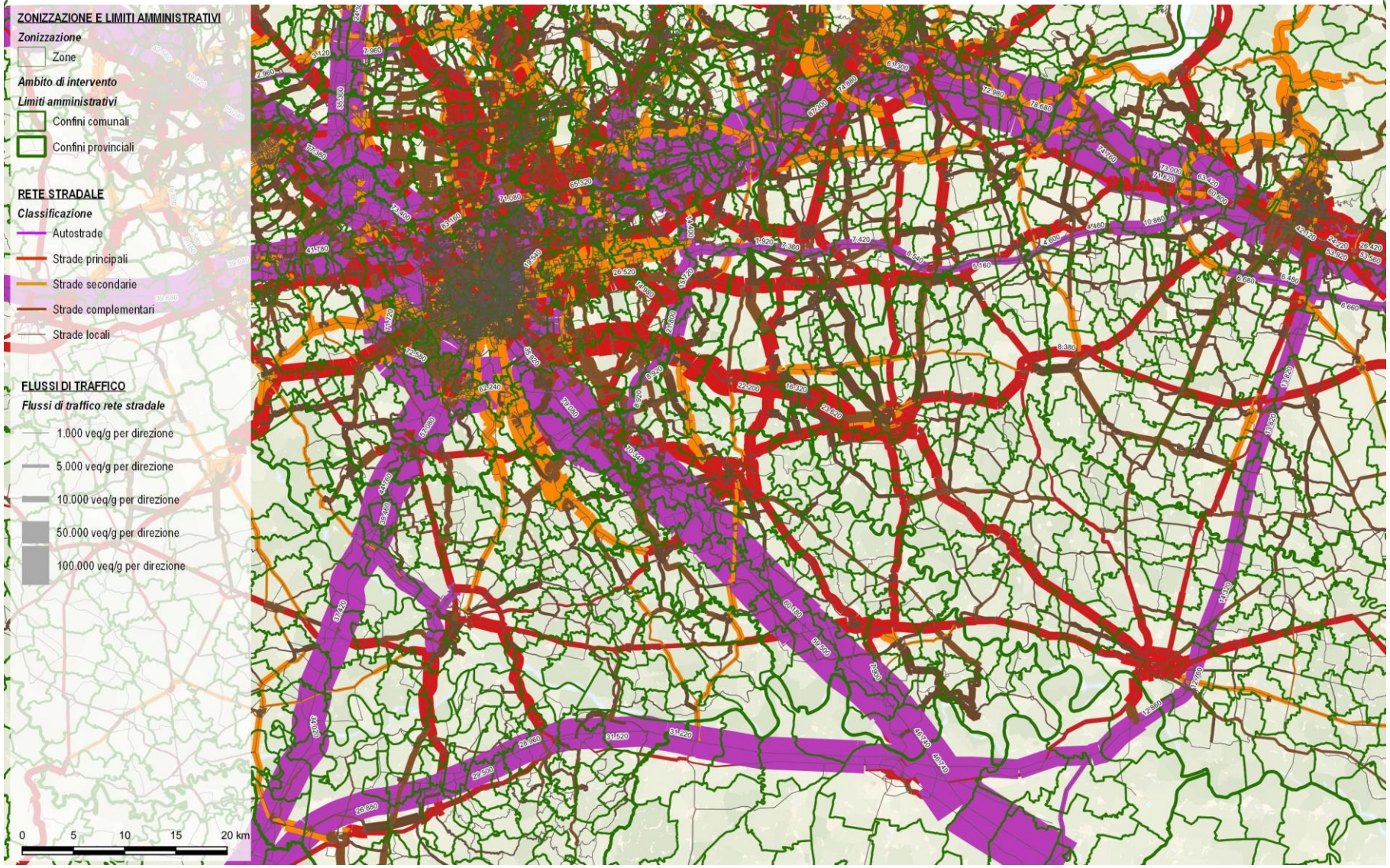
ALLEGATO X



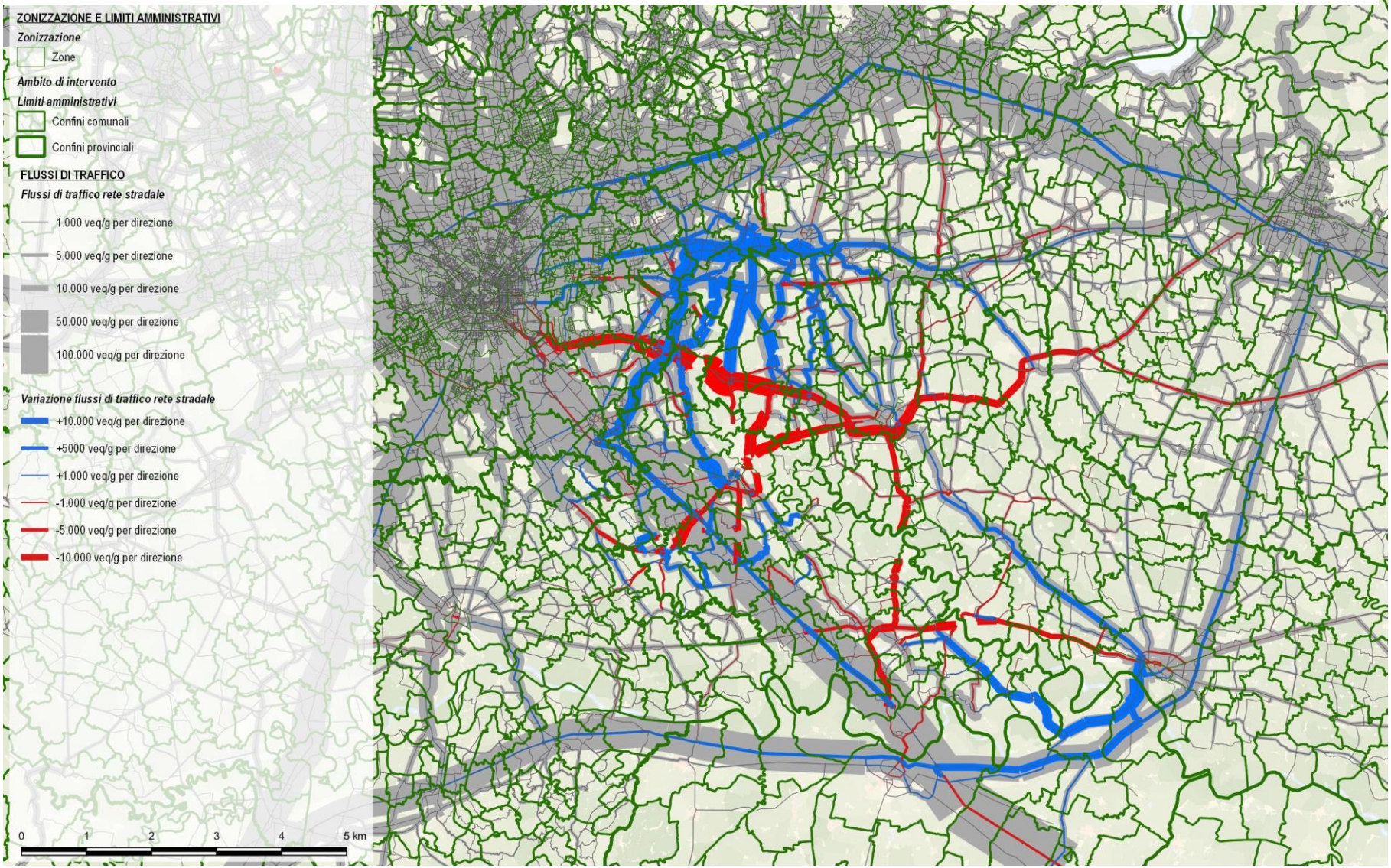
ALLEGATO Y



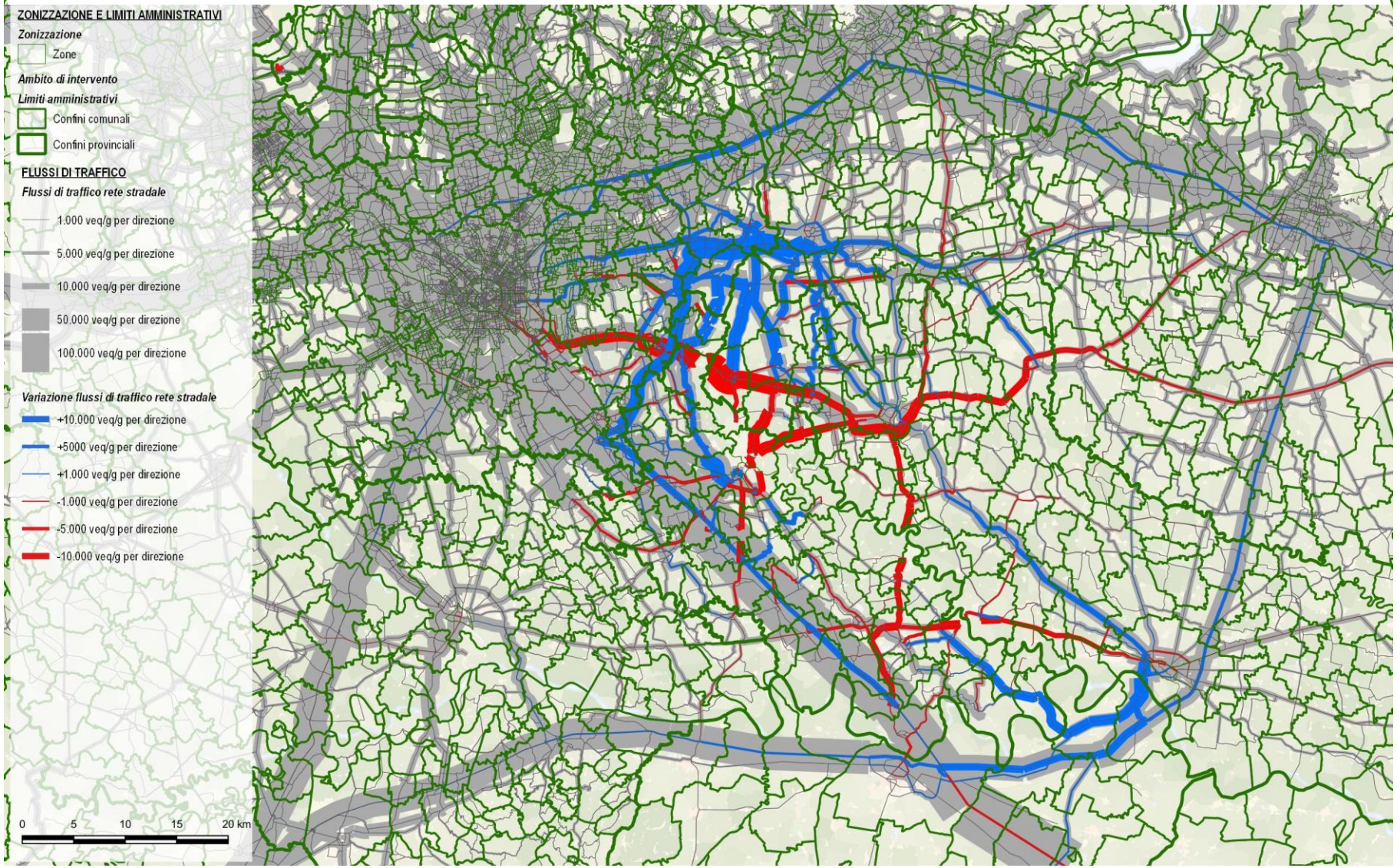
ALLEGATO Z - Scenario SDF



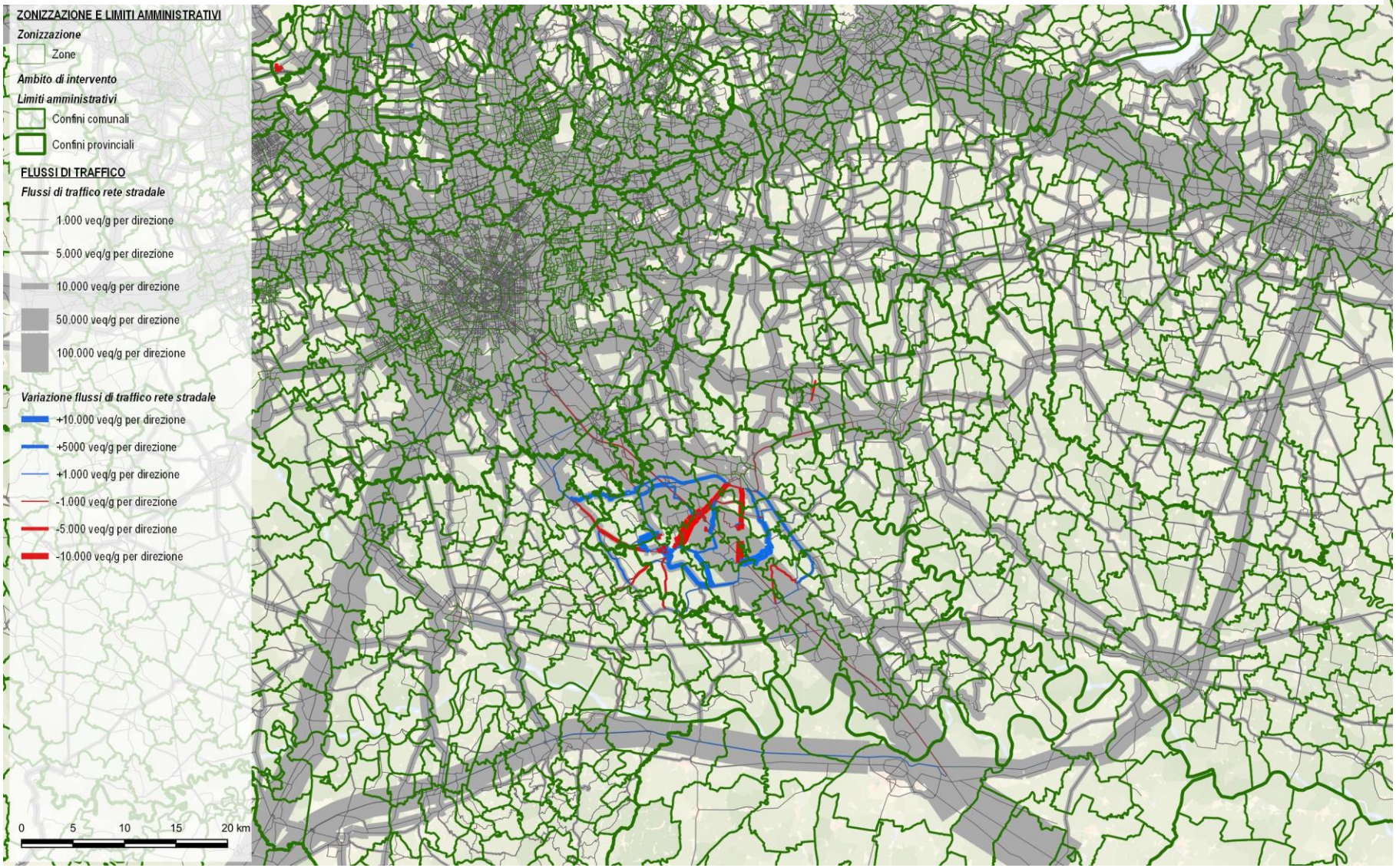
ALLEGATO AA – Simulazione 1.a



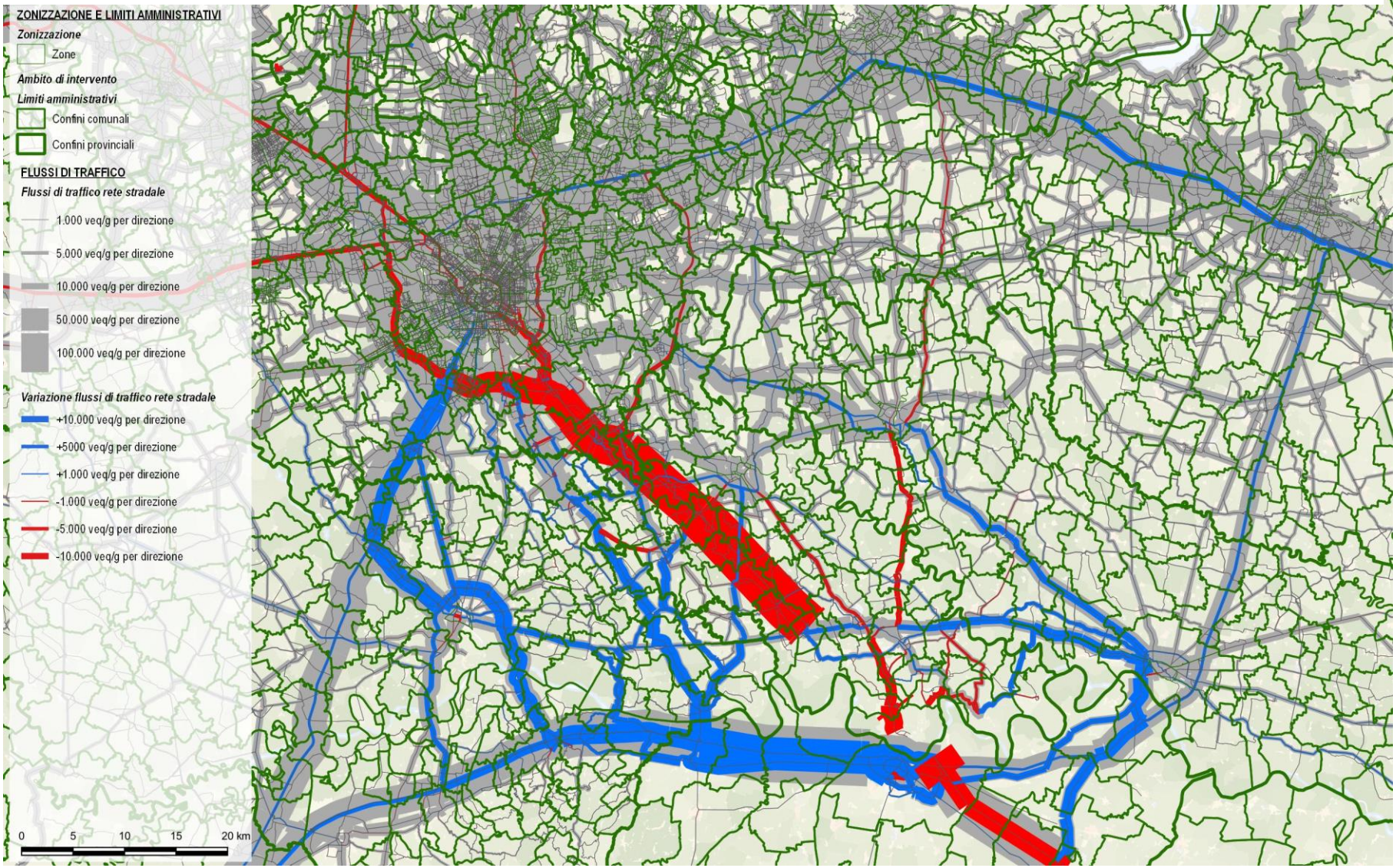
ALLEGATO BB – Simulazione 1.b



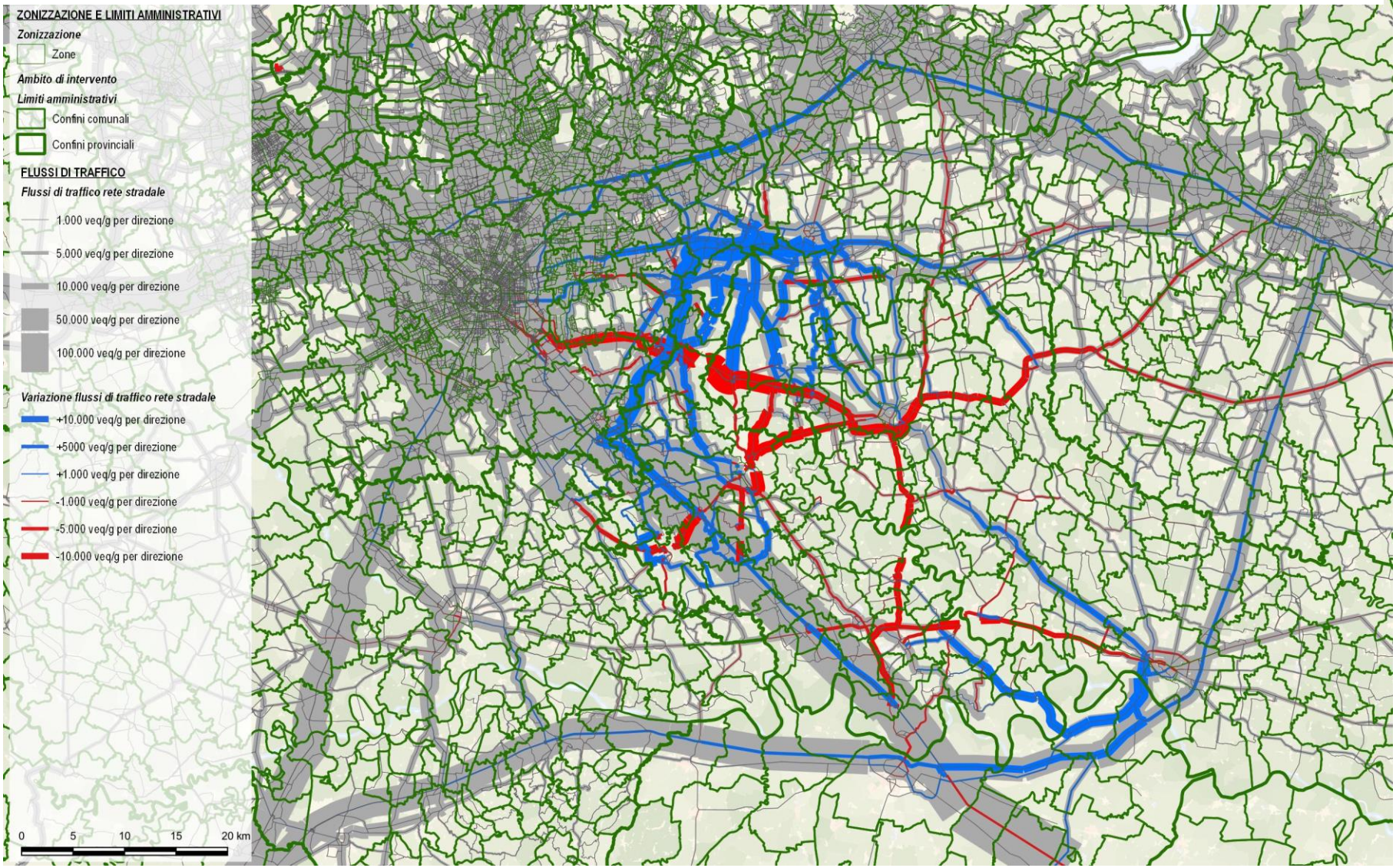
ALLEGATO CC – Simulazione 1.c



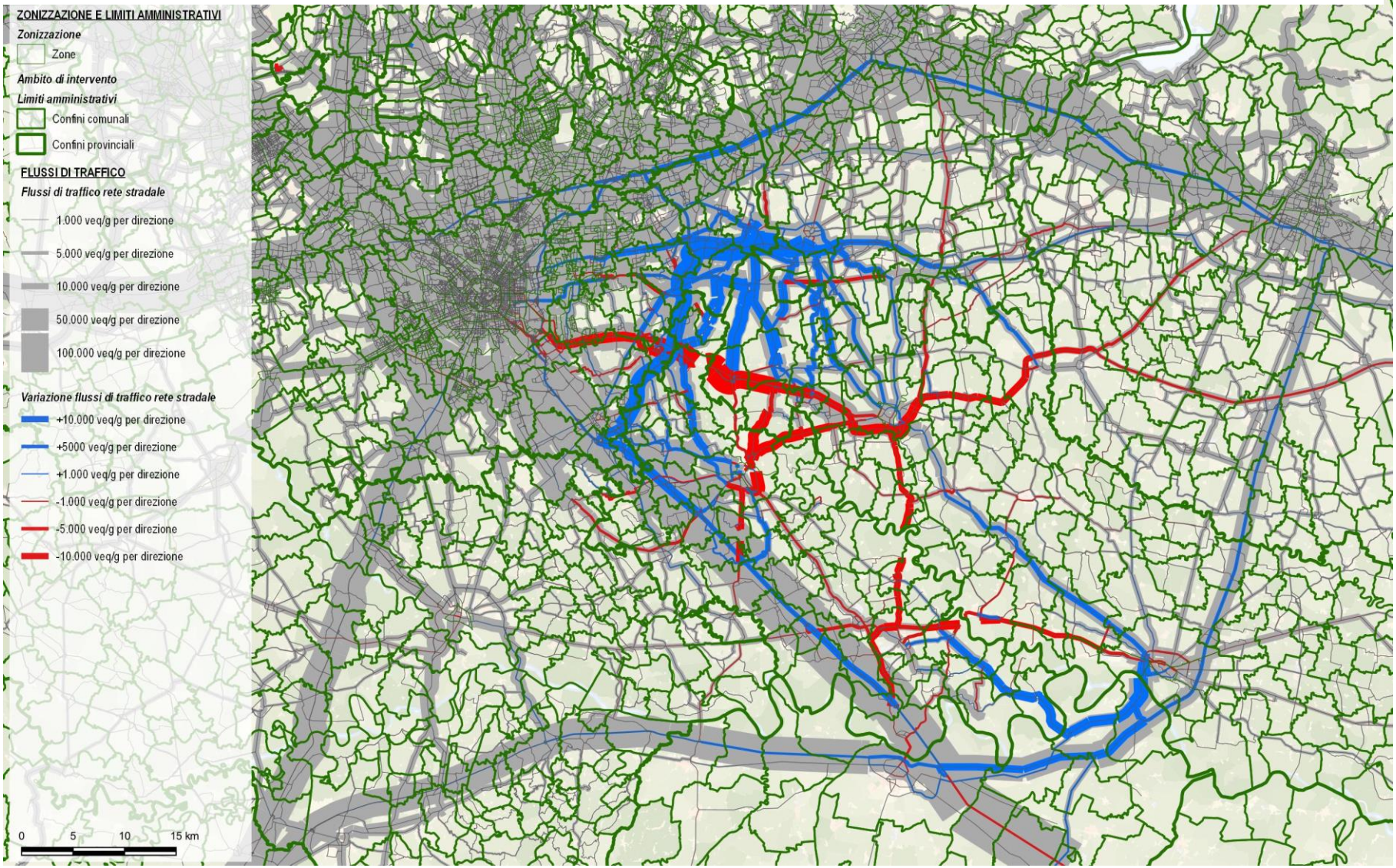
ALLEGATO DD – Simulazione 1.d



ALLEGATO EE – Simulazione 2.a

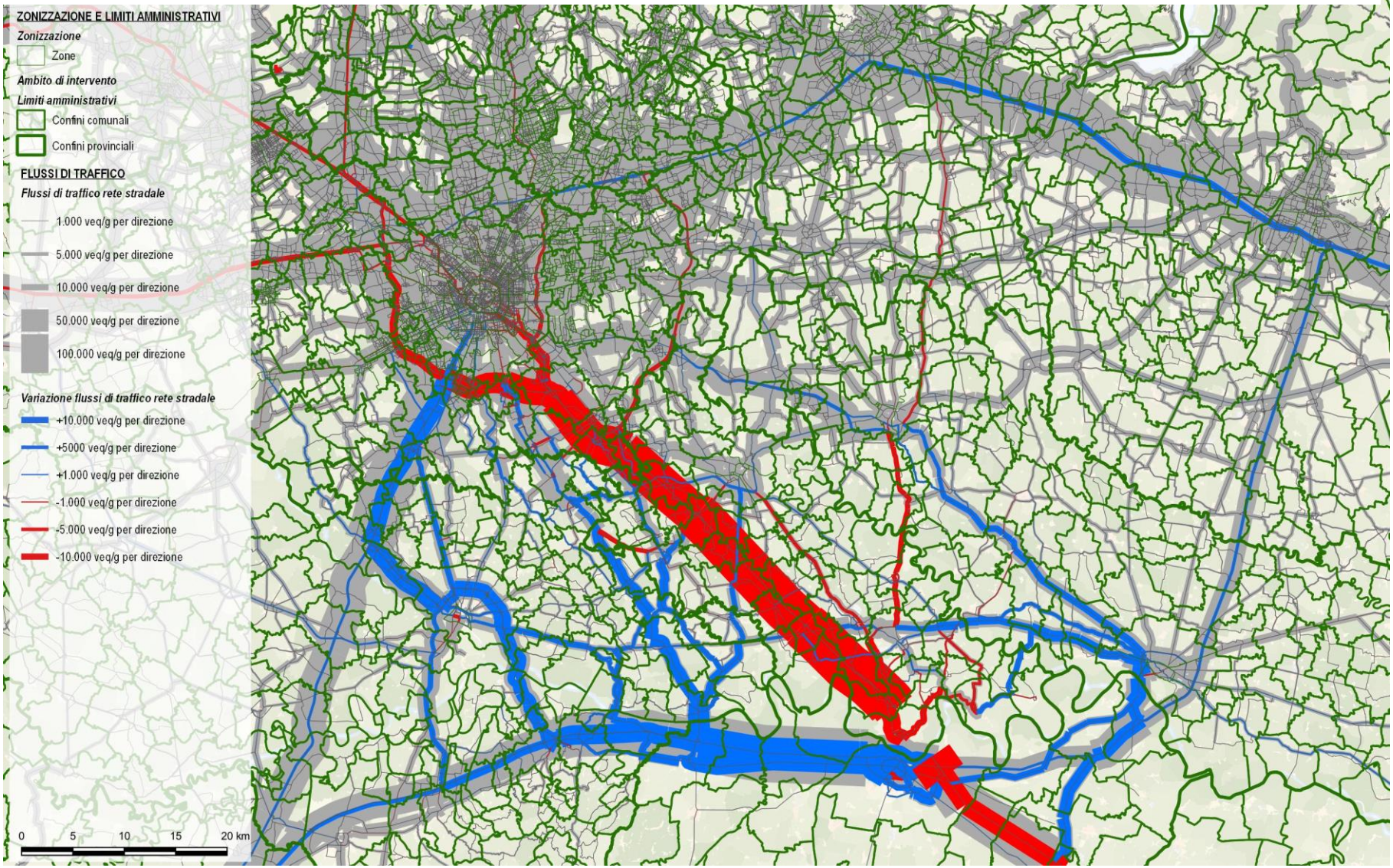


ALLEGATO FF – Simulazione 2.b

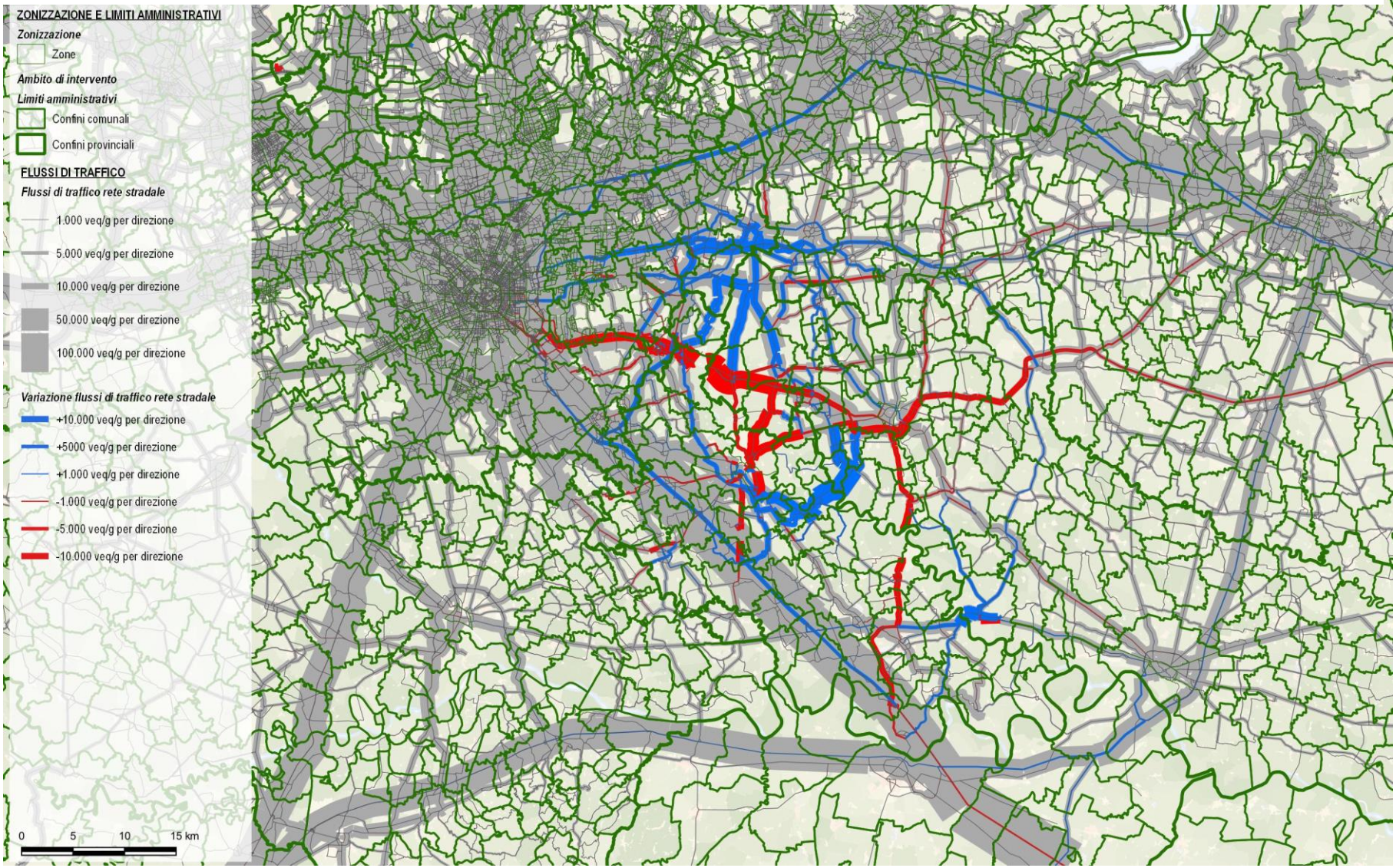


ALLEGATO GG - Simulazione 2.c ≡ Simulazione 3.c

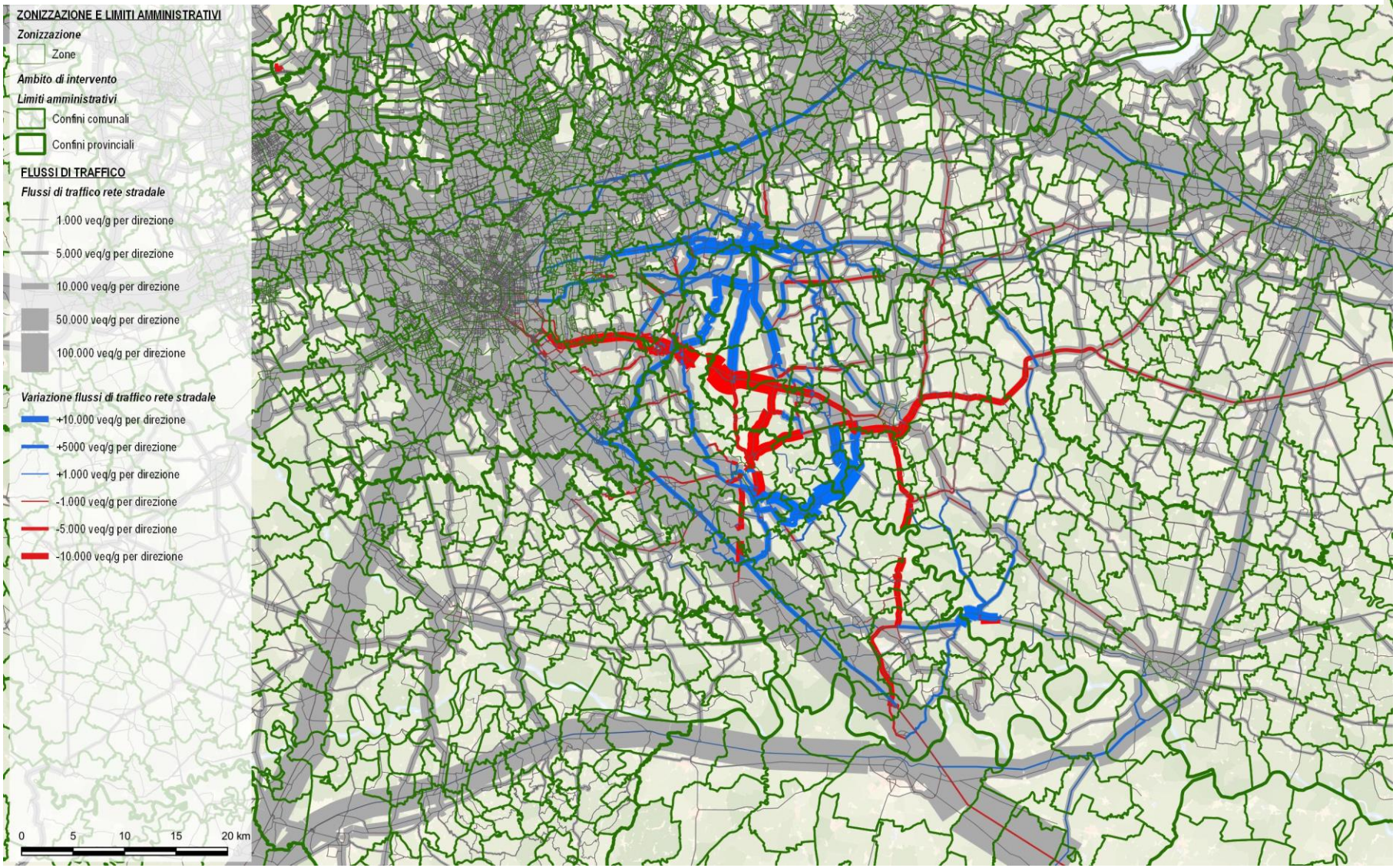
ALLEGATO HH – Simulazione 2.d



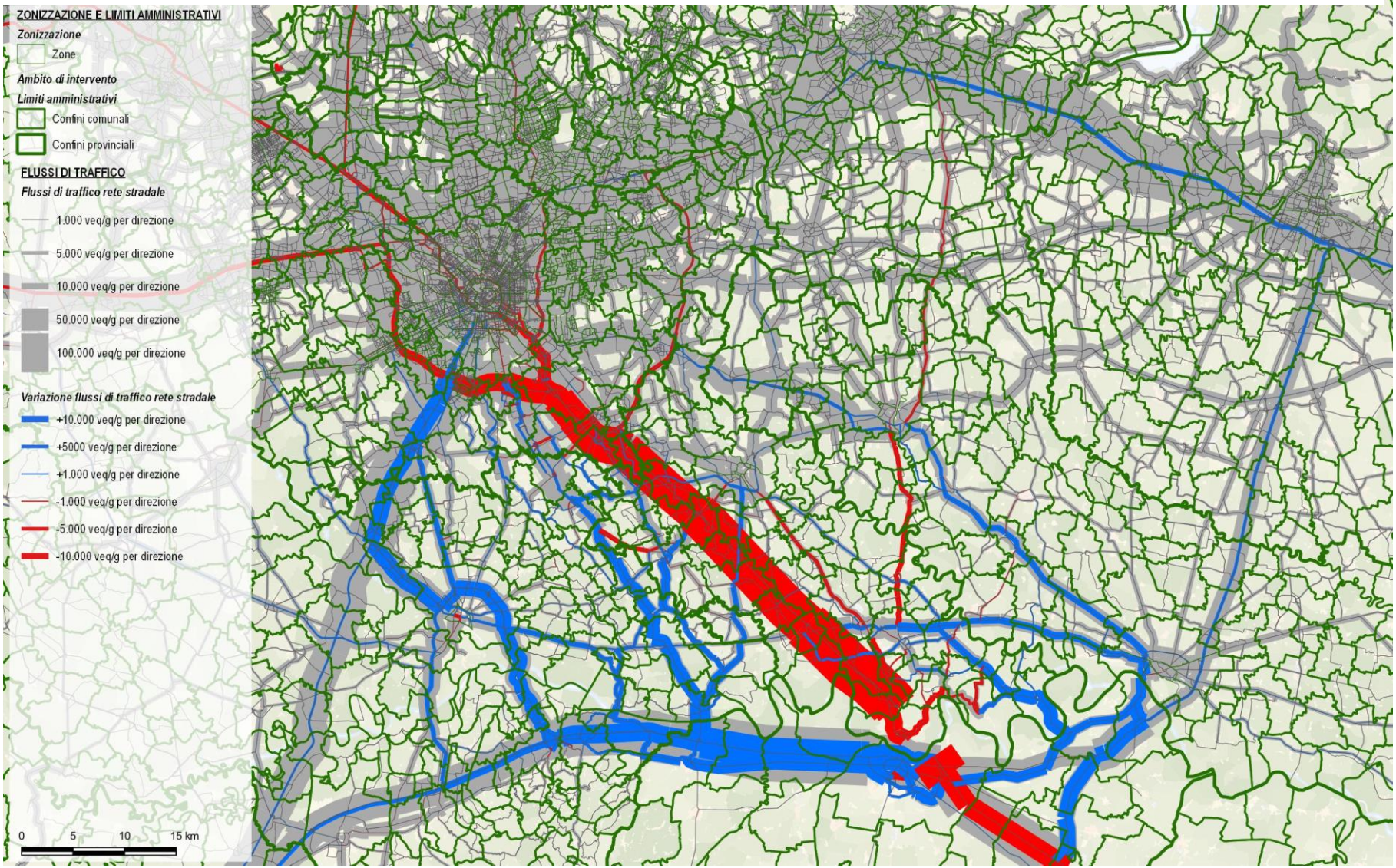
ALLEGATO II – Simulazione 3.a



ALLEGATO JJ – Simulazione 3.b



ALLEGATO KK – Simulazione 3.d



Ringraziamenti

Voglio in particolar modo dedicare questo mio traguardo ai miei Genitori.
A mia Madre, per avermi sostenuto in questi anni di distanza con l'amore e i sacrifici che solo una donna forte e dolce come te può sostenere. Questi anni sono stati duri per entrambi e se sono arrivato fino a qui oggi è perché sei stata il miglior modello quotidiano da seguire.
A mio Padre, che "mi manca come l'aria dopo un pugno in pancia". Grazie per avermi insegnato, giusto in tempo, il valore dell'istruzione e per avermi dato forza dopo ogni mio fallimento. Spero di renderti orgoglioso, sempre.
Ringrazio inoltre mio Fratello, per il confronto quotidiano e per tutte le parole e gli insegnamenti scritti e non detti. Purtroppo le distanze di questi anni continueranno ad esserci, perché ognuno percorre la sua strada, ma al momento giusto so sempre dove trovarti.
A mio Nonna, per ogni "conto alla rovescia" e per l'affetto infinito. I tuoi insegnamenti su cos'è la semplicità e il valore che ne consegue, mi indicano la via.
Ringrazio la Prof.ssa Daniela Molinari e il Dott. Guido Minucci, per la massima disponibilità, l'impegno e la professionalità con cui mi hanno aiutato guidandomi in questa ricerca, ma soprattutto per avermi insegnato in questi anni, che la valutazione e la mitigazione del rischio sono opportunità di miglioramento per tutti.
Ringrazio la Dott.ssa Maria Pregnolato, per la disponibilità, i consigli e il confronto professionale che hanno contribuito alla stesura del Capitolo 2.
Ringrazio il Prof. Paolo Beria e la Società META srl, per avere dato un supporto concreto alla stesura del Capitolo 3 mettendo a disposizione il modello i – TraM, oltre le loro competenze professionali, il loro tempo e le loro risorse.
Ringrazio inoltre la Dott.ssa Anna Rita Scorzini e Alice Gallazzi per l'interesse verso questo tema di ricerca, per i confronti e la loro disponibilità.
Un ringraziamento speciale va alla Dott.ssa Antonina Aranzulla, per avermi trasmesso tutta la sua esperienza, per avermi dato fiducia sin dal primo giorno e per avermi concesso i giusti spazi in situazioni che non mi sarei mai sognato di vivere. Da oggi in poi, qualsiasi posto di lavoro ricoprirò, ricorderò sempre con affetto i tuoi insegnamenti.
Un ringraziamento non basterebbe e qualsiasi altra parola non riuscirebbe a descrivere la fortuna che ho avuto nel passare con voi ogni giorno di questi anni. Da domani, mi mancherà tutto di voi ma soprattutto il non sentire la vostra voce ogni volta che rientrerò a casa, quella voce che dopo ogni giornata storta mi regalava un sorriso e che dopo ogni giornata radiosa mi faceva comprendere ancor di più il bene che vi voglio. A Lorenzo, Davide, Nicolò e Giuseppe, grazie per essere stati la mia famiglia, LP6 per sempre nel cuore e nella mente.
Ringrazio tutti i miei Amici conosciuti in questi anni universitari. Non vi cito perché già sapete la stima e l'affetto che ho per voi. Sono stati anni duri che riinizierei da capo solo per poterli rivivere insieme. Ognuno di noi sta prendendo o ha preso la sua strada e le distanze aumentano e aumenteranno con il passare degli anni. Da parte mia però, terrò sempre vivo il ricordo delle nostre avventure e quando la mancanza sarà troppa farò di tutto per rincontrarvi, perché se il cuore è fatto di materia ed ogni pezzo ha la sua importanza allora voi non siete certo da meno.

Ai miei Amici di sempre, quelli che “Oh ma quando torni?!”. Vi garantisco che la mia direzione punta sempre verso l’Abruzzo, spero solo che il percorso sia breve. So che mi aspetterete con l’entusiasmo e la voglia di far festa di sempre, e per questo vi ringrazio. Tornerò anche per voi, perché mi mancate ogni giorno.
Ringrazio tutta la Ritmi Urbani, per l’amicizia che va oltre tutto e per tutte le volte che con la musica mi avete fatto vivere meglio di quanto avrei potuto senza. Ma soprattutto per tutte le volte che lo immaginate con i Breakers.
Ringrazio Lares Italia, per avermi dato una missione e ringrazio Lares Lombardia per avermi dato la possibilità di adempierla ogni giorno, ma soprattutto di avermi fatto conoscere Persone pronte a dare una mano ad ogni emergenza o, meglio ancora, pronte a sacrificarsi ancor prima dell’emergenza. Ringrazio in particolare Fabio, Igor, Marta e Veronica, perché tra le mille difficoltà abbiamo creato un qualcosa di fantastico che vale la pena portare avanti.
Ringrazio Marcello, Ilde e Marco per avermi accolto a casa loro e, nonostante le distanze, per farmi sentire ogni giorno parte di quella che sarà e che per certi versi già è parte della mia famiglia. L’affetto che mi dimostrate è per me prezioso, spero di poterlo contraccambiare a dovere nel tempo.
Ringrazio la mia Dolce Stefania, per essermi accanto in ogni momento ma soprattutto di aver detto sì nonostante le distanze. In questi anni né Milano né Grenoble ci hanno separati e per me questo vuol dire tutto. Grazie per avermi ridato la vita, per avermi fatto tornare a sorridere, a credere, ad amare. Grazie per avermi tenuto in vita in questi giorni e in tutti gli altri giorni di sconforto. Grazie per avermi aspettato. Da oggi spero di non doverti fare aspettare più ma, semmai dovessi tardare ancora un po’, tu ricorda che il mio posto è accanto a te.
Ultimo ringraziamento a Milano, la città che mi ha fatto diventare l’uomo che sono oggi. Provo un misto di dolore e gioia nel lasciarti, ma questa è la mia scelta che avevo già preso da tempo, ancor prima di incontrarti. In un modo o nell’altro sarò sempre legato a te, per cui arrivederci.

Grazie a tutti.