

# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Valutazione della suscettibilità al rischio idraulico di  
infrastrutture viarie della Provincia di Torino



Relatore:

Prof. CLAPS Pierluigi

Candidato:

Gennaro Mattei

Matricola: s250234

Anno Accademico 2019/2020



## Abstract

Il presente progetto di tesi propone la valutazione della vulnerabilità di infrastrutture viarie al rischio idraulico, attraverso l'uso di un metodo speditivo basato su parametri geomorfologici. Tale valutazione verrà eseguita su un'area a Nord Ovest del territorio Italiano ed in particolare riguarderà la rete stradale di competenza della Città Metropolitana di Torino. La rete di trasporto in esame si estende per circa 3000 km attraverso un territorio estremamente vario, si passa da un territorio montano caratterizzato da forti pendenze e quote alte ad uno di pianura con pendenze quasi nulle e quote molto basse. Questa valutazione si basa sull'idea di creare un modello di semplice attuazione che possa riapplicarsi in altri contesti e che possa portare ad una riduzione dell'esposizione al rischio, da parte degli utenti dell'infrastruttura. I dati utilizzati in questo progetto sono stati ricavati completamente da sorgenti opensource reperibili online.

Una parte di questo lavoro è caratterizzata dall'analisi sull'elevata influenza delle precipitazioni negli incidenti stradali, questo è reso possibile grazie alla presenza di un database di incidenti avvenuti lungo le strade in esame, avendo inoltre a disposizione i dati di precipitazione in determinate fasce temporali.

# Indice

Abstract .....	3
<b>1. Introduzione .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Caso di Studio .....</b>	<b>10</b>
2.1. <i>Caratteristiche geomorfologiche</i> .....	11
2.1.1. La Catena Alpina .....	12
2.1.2. La pianura .....	12
2.2. <i>Caratteristiche geomorfologiche a scala di Bacino</i> .....	13
2.2.1. Il Bacino della Dora Baltea .....	13
2.2.2. Il bacino del fiume Chiusella .....	14
2.2.3. Il bacino delle Valli di Lanzo.....	14
2.2.4. I bacini del Ceronda e Casternone .....	15
2.2.5. I bacini della Dora Riparia, Chisone, Sangone, Lemina. ....	16
2.2.6. Il bacino del Chisola .....	17
2.2.7. Il bacino del Pellice.....	18
2.2.8. I bacini dell'Orco e Soana.....	18
2.2.9. Il bacino del Malone .....	19
2.2.10. I bacini delle Colline di Torino e del Chierese.....	19
2.3. <i>Rete stradale di riferimento</i> .....	21
2.4. <i>Caratteristiche climatiche</i> .....	23
<b>3. Concetto di vulnerabilità della rete stradale e valutazione</b> .....	<b>24</b>
3.1. <i>Definizioni di vulnerabilità</i> .....	24
3.2. <i>Valutazione della vulnerabilità</i> .....	26
3.3. <i>Cause della vulnerabilità</i> .....	29
3.4. <i>Valutazione della pericolosità</i> .....	32
<b>4. Valutazione della suscettibilità idraulica dei tronchi stradali</b> .....	<b>33</b>
4.1. <i>Individuazione dei tronchi stradali</i> .....	33
4.2. <i>Individuazione dei parametri geomorfologici</i> .....	35

4.2.1.	Quota media del tronco stradale.....	36
4.2.2.	Pendenza media del tratto stradale.....	38
4.2.3.	Area bacino .....	40
4.3.	<i>Classificazione della suscettibilità dei tronchi</i> .....	41
4.4.	<i>Validazione dei risultati</i> .....	46
	<b>5. Analisi delle piogge ed incidentalità</b> .....	49
5.1.	<i>Metodologia ed analisi</i> .....	50
	<b>6. Conclusioni</b> .....	54
	<b>7. Bibliografia</b> .....	55



# 1. Introduzione

Nel 1968 la commissione di Vienna definiva un incidente stradale o sinistro (dal latino “sinister” per i romani sinistro lato debole, tutto ciò proveniente da sinistra era funesto e negativo) come un “evento in cui sono coinvolti veicoli, esseri umani o animali, fermi o in movimento, dal quale derivano lesioni a cose animali o persone”. L’esegesi legislativa, giurisprudenziale ha ampliato tale nozione definendo sinistro stradale come quell’avvenimento inatteso che determina un danno più o meno grave che turba un andamento previsto nella circolazione. In Italia, il fenomeno dell’incidentalità stradale è oggetto di studio da parte di enti statali, regionali e provinciali, in quanto rappresenta un problema correlato a caratteristiche proprie dell’infrastruttura ma rappresenta anche un problema per la sanità. Come riportato da un rapporto dell’ISTAT del 2018, dal 2001 al 2018 il numero di incidenti è diminuito del 34%, il numero di vittime del 53% ed il numero di feriti è sceso del 34,9%.

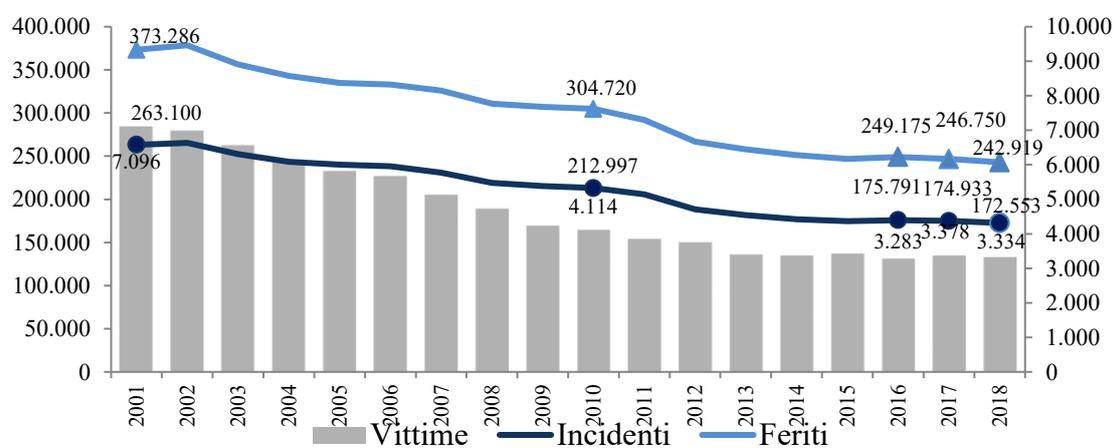


Figura 1: andamento incidenti, morti e feriti dal 2001 al 2018 - ISTAT (2019)

Dallo stesso rapporto si evince che le strade con il più alto numero di incidenti sono le “strade urbane”, in esse comprese le strade provinciali, le quali saranno oggetto di studio in questo lavoro di tesi.

Gli incidenti stradali possono verificarsi a causa di diversi fattori divisi in tre macro-categorie:

- Incidenti dovuti alle condizioni della strada o soggettive
- Incidenti dovuti alle condizioni ambientali

- Incidenti dovuti alla struttura della strada

Quanto riporta uno studio effettuato dall' ANAS (Azienda Nazionale Autonoma delle Strade) le principali cause di tali eventi sono strettamente legate alla condizione soggettive del guidatore, come distrazione, stanchezza, uso di sostanze alcoliche-stupefacenti, tutti effetti che potrebbero essere controllati. Secondo la stessa azienda e come dimostrato da numerosi studi, le condizioni del fondo stradale e condizioni meteorologiche avverse incrementano il rischio di incidenti. Le condizioni meteorologiche invece come il gelo, velocità del vento, riduzione della visibilità a causa di nebbia sono state esaminate e recenti studi si stanno concentrando sull'analisi degli incidenti in condizioni di pioggia.

Il numero di eventi incidentali che avvengono in condizioni di pioggia, stando a quanto confermato dall'ISTAT, rappresentano solo una piccola percentuale (nel 2017 6,6% in condizione di pioggia, 88,6% condizioni di meteo sereno) rispetto a quelli avvenuti in condizioni di meteo sereno ma analisi effettuate nel Regno Unito, Canada e stati Uniti sulle condizioni meteo correlate agli incidenti mostrano come la pioggia porta ad un incremento dal 31% al 111% del tasso di incidenti automobilistici. È necessario però affermare che non è l'evento di pioggia ad essere il fattore di aumento del rischio incidenti, ma una serie di fattori ad esso correlati. L'intensità di pioggia (Hambly et al. 2013), accumulo di pioggia giornaliero (Eisenberg 2004), e il tempo che intercorre tra due eventi di pioggia sono stati dimostrati essere fattori di rischio. Anche fattori non strettamente correlati all'evento meteorologico, come l'esperienza del guidatore, la condizione di visibilità, limiti di velocità, volume di traffico e la configurazione del tracciato stradale possono contribuire al rischio di incidente. Causa più importante e strettamente correlata alla condizione del fondo stradale a seguito di eventi di pioggia è rappresentata dalla perdita di aderenza da parte dello pneumatico per la presenza di acqua sulla pavimentazione. L'interazione pneumatico-pavimentazione può essere rappresentata da tre zone di contatto, Sinkage Zone, Transition Zone e Tractive Zone, la dimensione di queste aree di contatto dipende da diversi fattori quali: il modello di battistrada, pressione dello pneumatico, caratteristiche della pavimentazione, velocità di percorrenza e lo spessore del film di acqua che ricopre il fondo stradale. Quando la zona di contatto diventa nulla si ha la completa perdita di aderenza e si creano le condizioni per il fenomeno dell'acquaplaning.

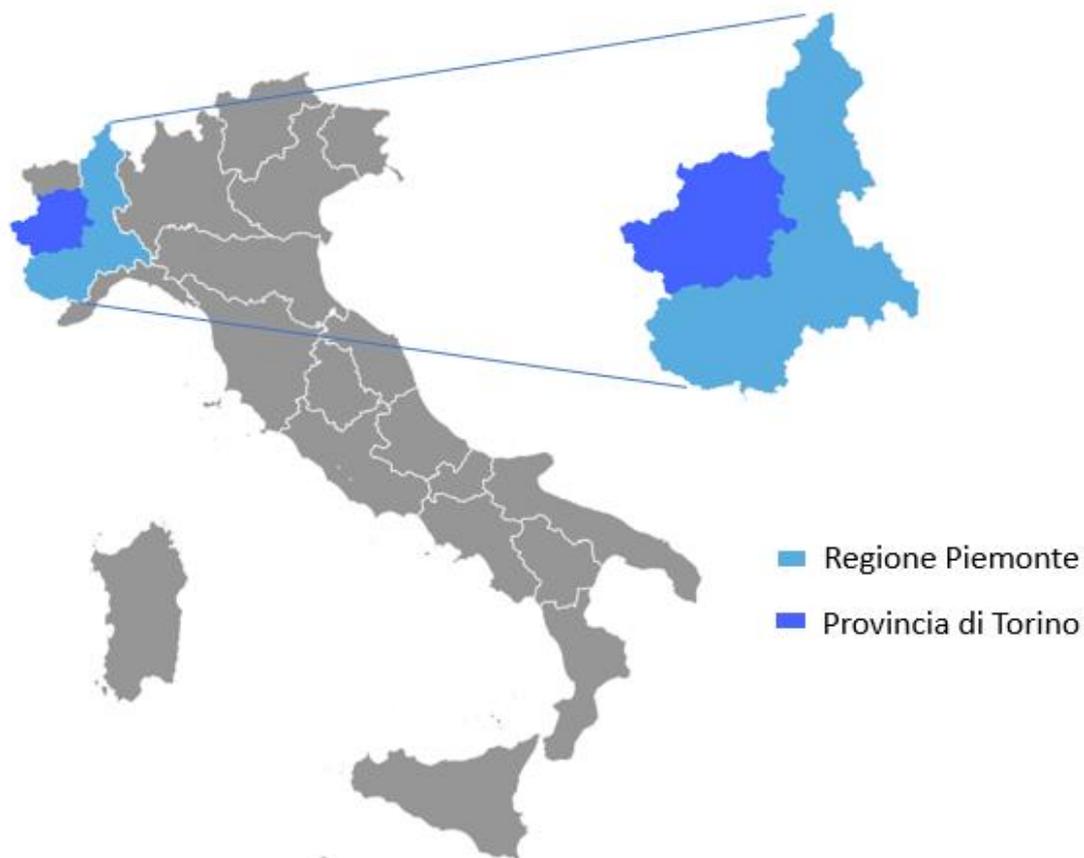
La pendenza di un tratto stradale, caratteristica strettamente legata ad aspetti geomorfologici del terreno, se correlata a fenomeni di deflusso d'acqua piovana può influenzare in negativo la stabilità dei veicoli, in quanto una corrente d'acqua potrebbe investire il veicolo in modo più o meno veloce provocandone l'instabilità.

Molti sono stati i ricercatori che durante gli ultimi anni hanno cercato di trovare dei modelli di correlazione tra fattori climatici ed incidenti stradali, la maggior parte però, mira a trovare quelli che possono essere i fattori che possono aumentare o diminuire il rischio, tutti infatti hanno dimostrato come la pioggia porta ad un incremento del rischio a causa, ad esempio, della riduzione di aderenza e della diminuzione di visibilità.

In questo lavoro di tesi, basandosi sulle cause di incidenti in condizione di pioggia, si vuole ricercare quello che è stato il ruolo reale delle precipitazioni correlandolo ad altri fattori che contribuiscono al rischio di sinistro stradale come velocità, pendenza ecc.

## 2. Caso di Studio

L'area di studio oggetto di questo lavoro di tesi è situata a nord-Ovest del Territorio Italiano nello specifico è rappresentata da un'area di di 6830 Km<sup>2</sup> compresa all'interno dei Confini Della Città Metropolitana di Torino, Regione Piemonte. Confina a nord con la Valle d'Aosta, ad est con le provincie di Biella, Vercelli, Alessandria e Asti, a Sud con la Provincia di Cuneo, ad Ovest con la Francia. La provincia di Torino è la provincia Italiana con il più alto numero di Comuni (315), tra le più estese territorialmente, tra le più popolate (2820000 Abitanti nel 2016) ed ha una densità demografica che supera di due volte la media italiana. Si tratta di un sistema territoriale e sociale molto disomogeneo, in cui si passa da quasi 1000 abitanti/Km<sup>2</sup> in pianura a soli 314 Abitanti/Km<sup>2</sup> in montagna.



6

*Figura 2: Inquadramento generale area di studio-Territorio Italiano-Regione Piemonte-Città Metropolitana di Torino*

## 2.1. *Caratteristiche geomorfologiche*

Da un punto di vista geomorfologico l'area oggetto di studio può essere suddivisa in un settore di montagna, uno di pianura ed una parte di territorio più interna di collina.

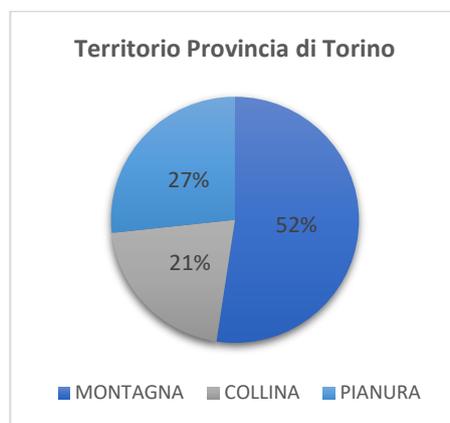


Figura 3: caratteristiche geomorfologiche Provincia di Torino (2011)

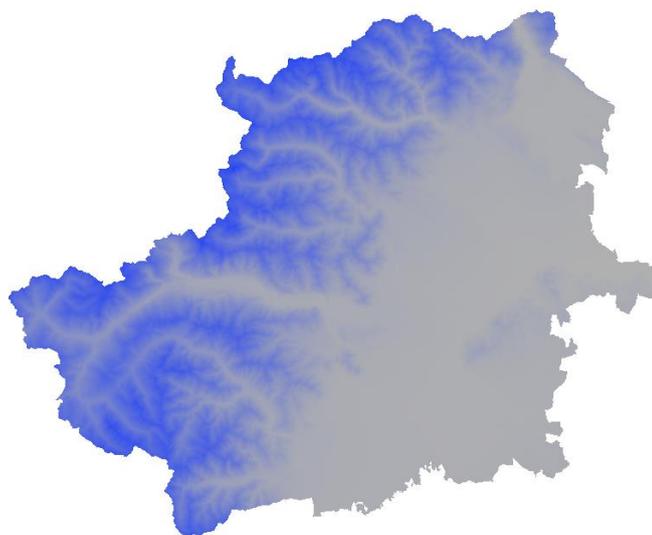


Figura 4: Digital Terrain Model 5x5 area di studio - Geoportale Piemonte

Il territorio delle Provincia di Torino è caratterizzato da ambienti e paesaggi estremamente diversi tra loro; troviamo rilievi e valli alpine, grandi conoidi alluvionali in corrispondenza dello sbocco dei principali corsi d'acqua nella pianura del Po, anfiteatri morenici della Dora Baltea e della Dora Riparia, pianura solcata dal Po (in cui confluiscono, nelle aree più intensamente antropizzate, i corsi d'acqua alpini) e rilievi collinari di Torino e del Basso Monferrato, delimitati dall'attuale corso del Fiume Po. Il

corso d'acqua principale è rappresentato dal suddetto fiume che funziona da livello base per tutto il reticolo idrografico.

#### 2.1.1. La Catena Alpina

La catena alpina in questo territorio si suddivide in: Alpi Graie, dal confine con la valle D'Aosta sino alle Valli di Lanzo comprese, Alpi Cozie dalla valle di Susa sino alla Valle Pellice, queste due fanno da confine settentrionale con la Valle d'Aosta e confine occidentale con la Francia. I monti appartenenti sono caratterizzati da vette rocciose molto alte con assenza di vegetazione. Ad elevazioni inferiori invece è presente vegetazione. Le più importanti vette sono rappresentate dalla cima della Levanna (3619 m.s.l.m tra valle dell'Orco e le valli di Lanzo), l'Uia Bessanese (3064 m.s.l.m.) la Rocca d'Ambin (3378 m s.l.m. sul versante sinistro dell'alta Valle di Susa), la P.ta Pierre Menue (3505 m) in sinistra orografica della Dora di Bardonecchia, il Rocciamelone (3538 m.s.l.m.) tra Valle Cenischia e le Valli di Lanzo, il Monte Chaberton presso Cesana (alla testata della Valle di Susa, con i suoi 3130 m), la Punta Merciantaira in destra Val Chisone (3293 m s.l.m.). I pochi ghiacciai rimasti sono localizzati perlopiù alle testate della Valle Orco (zona del Passo di Galisia), area della Levanna, delle Valli di Lanzo (Uia di Ciamarella), sul versante nord del Rocciamelone.

#### 2.1.2. La pianura

La pianura torinese è compresa tra la catena alpina e la collina di Torino e rappresenta l'elemento di transizione tra la pianura Cuneese e la restante della pianura Padana. È composta sostanzialmente da accumuli di depositi dovuti ai corsi d'acqua affluenti del Po. Da un punto di vista geomorfologico è possibile distinguere quattro unità fondamentali: *Antichi terrazzi pedomontani* costituiti sostanzialmente da depositi ghiaiosi e cementati; *Alta pianura ghiaiosa, conoidi e apparati fluvioglaciali*, quest' area è caratterizzata da sedimenti grossolani con una elevata acclività superiore al 4%; *fasce di media pianura e di transizione alla bassa pianura* appartengono a questa area depositi ghiaioso-sabbiosi e sabbiosi-limosi ; *Piane di divagazione fluviale olocenica incassate*,

prevalentemente localizzate lungo i fiumi. La pianura Torinese mostra due situazioni sensibilmente diverse, a nord e a sud della cosiddetta “stretta di moncalieri” e la trasversale est-ovest dove la catena alpina si avvicina con più affioramento al rilievo delle colline di Torino. A nord di tale trasversale i depositi alluvionali appaiono terrazzati, cioè incastrati gli uni dentro gli altri. A sud ci sono diversi sistemi alluvionali, depositi fluviali, fluvio-glaciali, ghiaie, che hanno dato luogo ad un fenomeno di “sovralluvionamento”, per questo motivo l’area non è stata soggetta a fenomeni erosionali significativi.

## 2.2. *Caratteristiche geomorfologiche a scala di Bacino*

Il network idrografico della provincia di Torino si presenta molto vario e gerarchizzato. Ci sono molti corsi d’acqua con lunghezze e portate diverse tra loro. È caratterizzato da ruscelli di montagna e di pianura con acque permanenti alimentate da bacini molto piccoli fino ad arrivare a fiumi di maggiori dimensioni con portate grandi alimentate da bacini idrografici con dimensioni maggiori di 100 Km<sup>2</sup>. Il principale corso d’acqua, il Po, che a valle dei contributi del Varaita e del Maira raccoglie tutte le acque della provincia fino a diventare il fiume più grande del territorio e che a valle della confluenza con l’Orco raggiunge una portata annua di 200 m<sup>3</sup>/s.

### 2.2.1. Il Bacino della Dora Baltea

Il tratto di Dora Baltea nel territorio piemontese si estende dal confine con la Valle D’Aosta fino ad arrivare al comune di Brusasco, provincia di Vercelli, dove a questo punto confluisce nel fiume Po. La prima parte del corso d’acqua presenta una direzione del flusso da Nord-Ovest verso Sud-Est ed è caratterizzato da un ampio fondovalle in corrispondenza del quale si aprono a ventaglio numerosi conoidi alluvionali. Nella parte centrale la direzione è sostanzialmente da Nord a Sud fino a quando non si raggiunge il centro storico della città di Ivrea, dove il fiume compie una brusca deviazione verso Est inoltrandosi in una stretta gola che taglia gli affioramenti rocciosi. Dalla stretta di Ivrea la Dora Baltea raggiunge la pianura Eporediese, nella quale non ci condizionamenti naturali che modificano l’andamento dell’alveo e la direzione ritorna ad essere quella originale NO-SE. Nell’ultima parte, prima della confluenza con il fiume Po, il fiume

scorre attraverso un territorio prevalentemente ad uso agricolo e si interseca con arterie autostradali e ferroviarie importanti da un punto di vista dei trasporti in particolare intercetta la S.S. n.11 Padana superiore, l'autostrada Torino-Milano (A4), le tratte ferroviarie Torino-Milano, Torino-Casale, e la S.P. 31bis del Monferrato.

### 2.2.2. Il bacino del fiume Chiusella

Il Chiusella nasce dal Monte Marzo (2756 m.s.l.m.) e si sviluppa attraverso la Valchiusella per una lunghezza totale di 25 km. La Valchiusella si estende per un territorio di circa 143 km<sup>2</sup>, dalla bassa Valle D'Aosta a nord-Est fino alle valli dell'Orco e Soana a Sud-Ovest. È racchiusa a destra dalle vette del Monfandi (2820 m) e del monte Giavino (2766 m), e a sinistra dalla cima del Prel (2618 m) e il monte Debat (2622 m). Il T. Chiusella prima di sfociare nella Dora Baltea nei pressi del comune di Strambino (TO) riceve le acque del Torrente Bersella, affluente di sinistra orografica e dal Torrente Savenca, affluente di destra orografica. Il bacino del T. Chiusella, da un punto di vista idrografico, è caratterizzato da un corso d'acqua decisamente inciso nella parte di monte, a valle invece si alternano fenomeni di erosione e di deposito che portano ad avere un andamento morfologico a canali intrecciati. La parte conclusiva del Torrente appartiene al paleoalveo riattivabile della Dora Baltea, questa parte è quella del Rio Ribes.

### 2.2.3. Il bacino delle Valli di Lanzo

Il bacino del T. Stura di Lanzo è compreso tra quello del T. Dora Riparia a Sud e quello del T. Orco a Nord, mentre a Ovest è separato dal territorio francese dalla dorsale alpina. Questo bacino idrografico ha un'estensione di 885 km<sup>2</sup> e si sviluppa per una lunghezza di 43,184 km. Il tratto montano del bacino termina a Lanzo Torinese, si suddivide in tre sottobacini: quello della Valgrande, della Val d'Ala e della Valle di Viù. Il T. Stura di Valgrande ha origine dalla confluenza dei T. Sea e Gura, a Forno Alpi Graie, scende poi fino alla confluenza con il T. Stura di Ala con pendenza costante, il torrente scorre piuttosto incassato in un fondovalle ristretto, ricevendo il contributo del vallone di Mezzenile; il tratto terminale a monte di Lanzo Torinese presenta un allargamento in corrispondenza del bacino alluvionale di Germagnano, per restringersi infine in modo

decisivo in corrispondenza della forra del Diavolo. La valle mediana di Ala si origina dal Pian della Mussa a 1800 m s.l.m., le acque divaganti nel pianoro permeano le alluvioni che ricolmano il bacino della Mussa e alimentano una zona di risorgive. La valle di Viù è la più meridionale delle tre valli, e si origina dai due rami di Malciaussia e di Arnas. A valle di Viù il T. Stura ha un alveo assai sinuoso, scavato entro pareti rocciose acclivi. Dopo un percorso di circa 40 km confluisce nel T. Stura di Lanzo a Traves.

#### 2.2.4. I bacini del Ceronda e Casternone

a fisiografia dei bacini nella zona di testata è quella propria di un ambiente di media montagna, con ersanti ripidi e copertura boscosa intervallata ad aree sterili per coltri detritiche e roccia affiorante. Il settore allo sbocco vallivo è caratterizzato da una morfologia articolata, riconducibile alla presenza di più corpi alluvionali terrazzati. I bacini dei T. Ceronda e Casternone sono compresi tra le dorsali della Bassa Val di Susa e della Valle di Lanzo. Si estendono complessivamente su un'area di circa 177 km<sup>2</sup>. Il T. Ceronda ha origine dalla confluenza di alcuni impluvi alimentati da diverse sorgenti allineate ad una quota altimetrica di circa 1200 m e poste lungo le pendici del M. Driuna, M. Colombano e M. Lera, le cui linee di cresta delimitano il sottobacino. Si sviluppa per 23,4 km, sottendendo un bacino idrografico di 111 km<sup>2</sup>. Il T. Casternone nasce alle pendici meridionali del M. Arpone, a quote comprese tra 1100 m e 1300 m. circa. Si sviluppa per 15 km, e sottende un bacino idrografico di 56 km<sup>2</sup>. Sia il T. Ceronda che il T. Casternone sono caratterizzati da un alveo con morfologia unicursale, in cui tratti sub rettilinei si alternano ad altri sinuoso-irregolari. In alcuni tratti la notevole quantità di deposito alluvionale determina la formazione di barre, con creazione di rami multipli la cui attivazione è legata ad occasionali aumenti di portata. Durante le piene più significative si verifica con facilità l'asportazione delle barre pre-esistenti, con formazione di nuove strutture di deposito che modificano il locale aspetto dell'alveo ma non ne variano le caratteristiche complessive. Nella parte medio-terminale i torrenti incidono costantemente i propri depositi alluvionali.

#### 2.2.5. I bacini della Dora Riparia, Chisone, Sangone, Lemina.

Il fiume Dora Riparia percorre tutta l'asta valliva della Valle di Susa fino allo sbocco nella pianura torinese. Il bacino della Dora Riparia ricade per il 90% della sua superficie in territorio italiano circa 1.251 km<sup>2</sup> (1,7% del bacino del Po), il resto in territorio francese. Di questi, l'87% ricade a sua volta in ambito montano. Il corso d'acqua trae origine da due rami: la Dora di Cesana e la Dora di Bardonecchia. I due rami confluiscono nella piana di Oulx, dove il corso d'acqua tende a divagare nella grande massa di detriti trasportati e depositati. Dopo Susa la valle assume la forma caratteristica ad U, propria della sua origine glaciale, e si sviluppa in modo rettilineo in direzione est-ovest. Nel bacino sono presenti serbatoi di regolazione dei deflussi finalizzata alla produzione di energia idroelettrica.

Il bacino del T. Chisone si sviluppa nel settore centrale dell'arco alpino occidentale ed è delimitato verso Nord della cresta spartiacque dalla Valle Susa e verso Sud dalla vallata del T. Pellice in cui confluisce poco a sud-est di Pinerolo. La vallata principale, percorsa dal T. Chisone, si sviluppa per circa 50 km dal M. Appenna allo sbocco in pianura, dapprima con andamento da Sud a Nord (Val Troncea e Valle del T. Chisonetto) quindi da Sud-Est a Nord-Ovest fino ad Usseaux, poi da Nord-Ovest a Sud-Est fino al gomito di Malanaggio e, infine, nel breve tronco terminale da Ovest verso Sud-Est.

La valle principale del Chisone può essere suddivisa in due tronconi:

- il primo, occidentale, va dalla testata della Val Troncea fino a Villaretto con andamento dapprima Sud-Ovest, Nord-Est e quindi Nord-Ovest, Sud-Est.
- il secondo, orientale, va da Villaretto allo sbocco in pianura con andamenti inizialmente da Nord-Ovest a Sud-Est e quindi, dopo il gomito di Malanaggio, da Nord-Ovest verso Sud-Est.

Il fondovalle si presenta relativamente ampio, particolarmente a valle di Fenestrelle, e risulta in gran parte occupato da conoidi alluvionali. Sul fondovalle sono conservati, soprattutto in sinistra idrografica, lembi più o meno continui di superfici terrazzate e conoidi di dimensioni rilevanti. Il reticolato idrografico secondario è asimmetrico con un maggior sviluppo in lunghezza degli affluenti di sinistra, alle testate dei quali sono conservate forme di modellamento glaciale e periglaciale. In alcune zone della Val

Chisone i rilievi sono caratterizzati da versanti molto acclivi caratterizzati dalla presenza di pareti subverticali.

Il bacino del T. Sangone ha un'estensione di circa 268 km<sup>2</sup> e si sviluppa per una lunghezza di 48,195 km. Il settore di valle è caratterizzato da una morfologia tipica da conoide di pianura, con andamento a unghia e frequenti irregolarità delle curve di livello, a evidenziare antichi alvei e rami secondari non più attivi. Attualmente il corso d'acqua percorre il settore destro del conoide, a ridosso dei cordoni morenici dell'anfiteatro di Avigliana - Rivoli. Il settore montano del bacino inizia con una gola stretta e profonda individuabile all'altezza di Trana. Il bacino della Val Sangone mostra di avere ospitato un piccolo ghiacciaio locale, alla cui alimentazione concorrevano una serie di ghiacciai laterali. La loro evoluzione ha portato alla formazione di un piccolo anfiteatro intravallivo, attualmente in parte sepolto, in parte smantellato dall'erosione; pertanto si può affermare che il ghiacciaio della Val Sangone non giungeva fino allo sbocco in pianura e non ha interferito con il grande ghiacciaio segusino.

Il bacino del T. Lemina è compreso tra la Val Chisone, a sud, la Val Noce e il Rio Torto a nord, tributari di destra del T. Chisola. Dal punto di vista geomorfologico la valle presenta un profilo trasversale marcatamente asimmetrico, infatti, il versante idrografico destro è decisamente più esteso rispetto al sinistro. Inoltre, la dorsale che costituisce la linea di spartiacque destra si colloca a quote decisamente maggiori rispetto a quelle della linea di displuvio che delimita il versante sinistro. Esso si estende su una superficie complessiva di 79,39 km<sup>2</sup>, mantenendo un andamento Nord-Sud dalla testata fino a Pinerolo, dove un'ampia curva verso sinistra determina un deciso cambiamento di direzione, che diventa Est-Ovest lungo tutta la parte di pianura. Nella parte alta del bacino montano, generalmente, i versanti sono piuttosto ripidi. Di norma in questo settore il fondovalle è piuttosto stretto ed incassato; costituiscono un'eccezione alcuni brevi tratti in corrispondenza dei quali il fondovalle si amplia sensibilmente.

#### 2.2.6. Il bacino del Chisola

Il bacino del T. Chisola ha un'estensione di circa 360 Km<sup>2</sup> ed è modellato quasi interamente su formazioni superficiali di età quaternaria, costituite prevalentemente da depositi alluvionali; solo nei settori posti a nord-ovest di Piovascò e di Cumiana affiora

il basamento cristallino costituito da ortogneiss e micascisti riferibili alla Zona del Dora Maira e da metabasiti associate a metaultramafiti riconducibili alla Zona Piemontese. Dal punto di vista geomorfologico si distinguono tre settori: a) il settore di affioramento del basamento cristallino, caratterizzato da valori di acclività superiori al 20%; b) il settore di fondovalle, caratterizzato da valori di pendenza molto bassi; c) il settore di raccordo tra il fondovalle alluvionale ed i 73 rilievi pedemontani, con valori di acclività moderati e costanti, compresi tra il 10 ed il 20%. Il reticolo idrografico secondario è costituito, da canali irrigui e bealere, molti dei quali traggono origine da opere di derivazione dallo stesso T. Chisola.

#### 2.2.7. Il bacino del Pellice

Il bacino del T. Pellice ha un'estensione di circa 960,5 km<sup>2</sup> e si sviluppa da una quota di 3280 m s.l.m. in corrispondenza del Monte Rognosa, a circa 240 m s.l.m. alla confluenza con il Fiume Po. Il bacino del T. Pellice occupa il settore Sud Ovest della Provincia di Torino; la parte occidentale, che ha carattere prettamente montuoso, coincide con il segmento settentrionale delle Alpi Cozie, mentre quella orientale con la pianura pinerolese e parte di quella torinese. Esso ha origine dalle pendici del Monte Granero (2387 m s.l.m.) e attraversa con direzione Sud-Nord il pianoro del Pra alla fine del quale, dopo una brusca svolta, discende verso valle assumendo una direzione Est-Ovest, che mantiene costante fino alla confluenza nel Po. E' caratterizzato da un tratto montano a forte acclività, contraddistinto da un'asta fluviale a regime torrentizio e da una dinamica fluviale che si esplica principalmente attraverso l'attività erosiva di fondo e di sponda. Si distingue poi un tratto intermedio, a minor pendenza, che presenta alveo ristretto, ed in cui l'attività prettamente erosiva e di trasporto si alterna ad un'attività deposizionale. E' presente un tratto di pianura, caratterizzato da una sensibile diminuzione della pendenza e, quindi, da un notevole aumento dell'attività deposizionale.

#### 2.2.8. I bacini dell'Orco e Soana

Il torrente Orco scorre sul versante meridionale del massiccio del Gran Paradiso, di cui raccoglie i deflussi; esso trae origine dal Lago Rossett e ha un percorso vallivo di circa 50 km, profondamente inciso tra pareti rocciose. Quindi il percorso si sviluppa nella

pianura canavesana per circa 40 km, fino alla confluenza nel Po in prossimità di Chivasso. Il bacino dell'Orco ha una superficie complessiva di circa 910 km<sup>2</sup>, di cui il 78% in ambito montano e il 22% in pianura; circa 11 km<sup>2</sup> sono occupati da ghiacciai. In pianura, nella regione fluviale, nel tratto compreso tra Cuornè e la confluenza in Po a Chivasso, va rilevato il caratteristico assetto insediativo, distribuito a una certa distanza dall'asta fluviale, con i vari centri attestati al di sopra del marcato orlo di terrazzo, motivato anche dal carattere fortemente torrentizio del corso d'acqua, connotato da pericolose piene autunnali e primaverili e da un alveo poco inciso rispetto ai territori circostanti.

La valle Soana ha un assetto morfologico che la vede snodarsi tra versanti montuosi ripidi fino alla sommità presso Campiglia e Piamprato dove le prospettive si aprono in corrispondenza a pianori e conche posti sotto il massiccio del Monte Rosa dei Banchi. Ambedue le vallate hanno sviluppato nei secoli una ridotta attività estrattiva, per nulla paragonabile a quella che si sviluppò sul versante valdostano.

#### 2.2.9. Il bacino del Malone

La testata del bacino del T. Malone è impostata all'interno della Zona Sesia-Lanzo, dove affiorano i micascisti eclogitici; spostandosi verso sud-est, nei pressi dell'abitato di Levone, affiorano invece i litotipi riferibili alla Zona del Canavese, che comprendono scisti arenacei, calcari grigi, breccie granitiche e calcari dolomitici. I settori pianeggianti del bacino del T. Malone sono interposti tra le estese conoidi fluvioglaciali del T. Orco (in sinistra idrografica) e del T. Stura (in destra idrografica); si tratta di aree caratterizzate da modeste ondulazioni che si sviluppano parallelamente al reticolo idrografico attuale. Dal punto di vista stratigrafico questi depositi presentano, in superficie, materiali limoso-sabbiosi con subordinato scheletro ciottoloso, che diventa predominante poco oltre il metro di profondità dal piano campagna.

#### 2.2.10. I bacini delle Colline di Torino e del Chierese

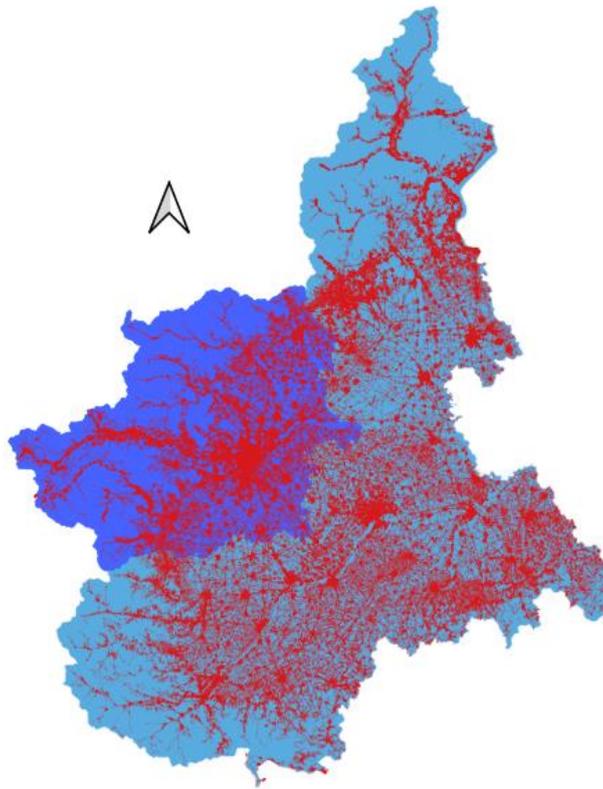
La rete idrografica dell'area in oggetto presenta marcate differenze in funzione delle caratteristiche del bacino. Sono distinguibili due direzioni principali di drenaggio secondo

l'asse Nord-Sud con collettori finali di raccordo al Po in direzione Est-Ovest. Lo spartiacque principale delle colline inizia dal Po e attraversa la città di Moncalieri, secondo la sua maggiore lunghezza, poi si innalza regolarmente fino a formare un'ampia e poco profonda sella tra Moncalvo e il Bric della Maddalena (715 m s.l.m.), da qui lo spartiacque si mantiene elevato e raggiunge il Bric della Croce (712 m s.l.m.) per abbassarsi poi gradualmente lungo la sella dell'Eremo di Pecetto (621 m s.l.m.). Per quanto riguarda la geomorfologia l'aspetto più caratteristico è rappresentato dalla notevole diversità dei due versanti maggiori: quello a Nord-Ovest verso Torino e quello a Sud-Est verso Chieri. La differenza principale nel reticolo idrografico collinare è la pendenza, ma spesso entrano in gioco motivi geologici. La disposizione degli strati è particolarmente significativa per la stabilità del terreno. Gli strati a reggipoggio, caratteristici del versante Sud, resistendo maggiormente, conferiscono al percorso dei torrenti un caratteristico andamento a piccole dighe e ciò limita la velocità di flusso e la conseguente erosione. Nonostante la relativa maturità, i corsi d'acqua del versante settentrionale presentano un regime più spiccatamente torrentizio con capacità erosiva maggiore (generalmente nel periodo delle piene). I corsi d'acqua che scorrono sul cosiddetto Altopiano di Poirino, individuato da un'area ai cui vertici sono situati gli abitati di Moncalieri, Chieri, Buttigliera, Montà, Ceresole e Carmagnola, sono "nati", geologicamente parlando, pochissimo tempo fa e questa circostanza fa sì che gli stessi non abbiano ancora raggiunto una condizione di equilibrio dinamico con il territorio di cui raccolgono e drenano le acque. La conformazione stessa del bacino comporta una concentrazione di portate lungo il torrente Banna, il maggiore corso d'acqua dell'area che nasce in Provincia di Asti e confluisce nel Po in Comune di Moncalieri. La progressiva evoluzione del rilievo che ha coinvolto le Colline di Torino e il Monferrato, determinata dalla neotettonica quaternaria, è responsabile della graduale evoluzione del reticolo idrografico fino alla configurazione odierna, con un bacino di alimentazione assai più modesto che corrisponde solo a parte del settore collinare.

### 2.3. *Rete stradale di riferimento*

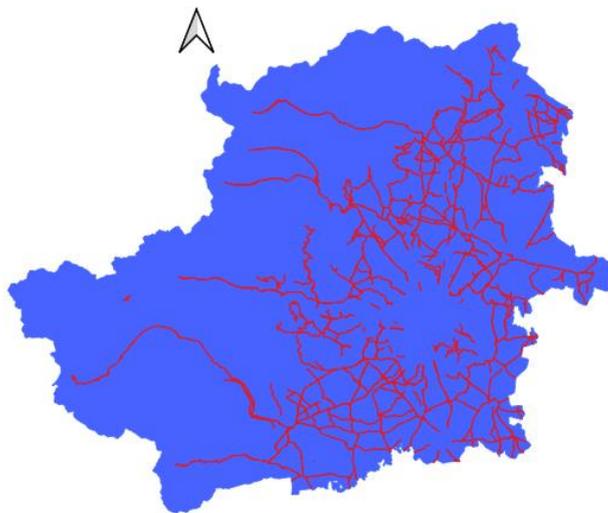
L'area di studio è sede di infrastrutture stradali e ferroviarie di notevole importanza non solo per la regione Piemonte ma per l'intero territorio nazionale. Le infrastrutture più importanti sono ad esempio l'autostrada A32 Torino-Bardonecchia, un'arteria che consente il collegamento con la Francia, l'autostrada A5 che collega Torino con il traforo del monte Bianco, l'autostrada A4 Torino-Milano, di fondamentale importanza per i collegamenti lavorativi tra i due capoluoghi. Questo studio si basa sull'analisi, in ambiente GIS, della rete stradale della Città metropolitana di Torino. Tale rete ha un'estensione complessiva di circa 3000 km e si estende attraverso tutto il territorio provinciale fino ai confini con la Francia e la Valle D'Aosta. Il Geoportale della regione Piemonte mette a disposizione un grafo stradale a libera consultazione, il quale però permette solo di conoscere la classe funzionale della strada, singolo elemento non utile ai fini dell'analisi. Per giungere ad un'analisi maggiormente accurata sono stati richiesti dati agli uffici della regione, i quali hanno fornito un grafo dove è presente una descrizione delle strade con più attributi. Questi ultimi a disposizione sono:

- Traffico giornaliero Medio (mfw), ovvero il numero di veicoli che mediamente in un giorno transitano sull'elemento stradale ed è distinto per tipologia di mezzi, leggeri (mfwl) o pesanti (mfwp) ed è espresso in veicoli/giorno;
- Velocità con flusso nullo (sped);
- Media delle velocità rilevate (asped).



*Figura 5: grafo stradale tutte le strade della Regione Piemonte - CSI Piemonte*

Il grafo stradale in questione, come osservabile dalla figura 5, comprende tutte le strade della regione Piemonte, ma per l'analisi in oggetto si analizzano le strade di competenza della Città Metropolitana di Torino, in ambiente Gis, avendo a disposizione l'elenco di tali strade è stato possibile ottenere il grafo di riferimento.



*Figura 6: grafo stradale città Metropolitana di Torino utilizzato per l'analisi.*

Molte di queste strade hanno interazioni con i corsi d'acqua dell'area e per questo motivo molti di questi appartengono a zone di pericolosità idraulica elevata come indicato dalle mappe di pericolosità PAI.

#### 2.4. *Caratteristiche climatiche*

Le condizioni climatiche della Provincia di Torino sono fortemente influenzate dalla presenza delle Alpi, la cui orografia è in grado di deviare e sbarrare il flusso dei venti che le raggiungono. Si trovano luoghi in cui la temperatura media annua è di 13.1 °C (Torino centro) e altri dove la temperatura media annua è di - 2.0 °C. Il rilievo alpino è il più importante fattore di modificazione del clima locale, influisce in particolar modo sul regime dei venti e delle precipitazioni. La barriera alpina può infatti ridurre le precipitazioni sul versante torinese (effetto *föhn* sul versante sottovento, quando le correnti in quota soffiano tra Ovest e Nord), oppure intensificarle (sbarramento dell'aria umida marittima trasportata dai venti meridionali, specialmente lo scirocco). Nella serie di misura delle precipitazioni di Torino, continua dal 1803 a oggi, una delle più lunghe al mondo, non si intravedono per il momento rilevanti segnali di cambiamento, ma soltanto una *leggera tendenza alla diminuzione degli apporti annuali* rispetto al XIX secolo. Negli ultimi 18 anni si è registrata una riduzione nella piovosità annuale pari al 4%. Una diminuzione più marcata riguarda i mesi di febbraio, marzo e luglio (-33%), mentre per il momento sono aumentati gli apporti di settembre e novembre (+ 34,5%), rispetto al periodo 1961-1989. Nel settore alpino della Provincia, l'evoluzione della quantità di precipitazione degli ultimi anni non mostra segnali univoci. Il pluviometro di Balme (Valli di Lanzo) presenta una recente riduzione degli apporti nei mesi da gennaio a settembre ma poi recupera in autunno. Così come per le temperature anche per le precipitazioni si evidenziano luoghi più asciutti a luoghi più piovosi; il più asciutto è Oulx (Valle di Susa), **612 mm/anno** (siccità intralpina), il più piovoso è Succinto (Valchiusella) **2000mm/anno** (esposizione a venti umidi da Sud). Nei tempi recenti, tuttavia, appare una maggior frequenza di anni piuttosto asciutti.

### 3. Concetto di vulnerabilità della rete stradale e valutazione

Le reti stradali costituiscono una componente importante della struttura di un paese, per questo motivo è necessario studiarle in modo approfondito soprattutto nel caso in cui possano manifestarsi eventi che ne metterebbero in discussione la funzionalità.

#### 3.1. *Definizioni di vulnerabilità*

Il concetto di vulnerabilità non è univocamente definito nella letteratura specialistica, ma piuttosto espresso e conseguentemente valutato in modo diverso a seconda dei contesti applicativi. La vulnerabilità di un dato elemento può essere associata al grado di perdita che questo subisce in seguito al verificarsi di un evento dannoso. La vulnerabilità può essere quindi innanzitutto considerata da un punto di vista funzionale, intendendo i danni che derivano dalla mancata funzionalità di alcuni elementi del sistema. Essa valuta quindi la propensione degli elementi o dei sistemi complessi a subire danni in relazione alle proprie caratteristiche intrinseche. Autori come D'Andrea e Condorelli (2006) distinguono la:

- vulnerabilità differita: in riferimento agli effetti che si manifestano in una fase successiva all'evento, che creano disagi dovuti all'impossibilità di usufruire di alcune infrastrutture, delle proprie abitazioni, o ancora dall'interruzione di diverse attività produttive e lavorative dell'area;
- vulnerabilità funzionale: che si riferisce ai danni, valutabili anche nel lungo periodo, che derivano dalla mancata funzionalità di alcuni elementi; Altri autori, sempre in riferimento agli eventi sismici, differenziano tra:
  - vulnerabilità intrinseca: si riferisce a valori caratteristici degli elementi che costituiscono l'infrastruttura;
  - vulnerabilità estrinseca: valuta la vulnerabilità di elementi che non fanno parte del solido stradale, ma il cui collasso, data la vicinanza a quest'ultimo, può compromettere la stabilità della strada, o causarne la chiusura. Entrambe le tipologie sono relative ad una vulnerabilità strutturale, perché riferite alle caratteristiche strutturali del solido stradale e dei manufatti prospicienti ad esso.

Un altro notevole autore, Husdal (2004), identifica tre tipologie di vulnerabilità a cui può essere soggetta una rete stradale:

- vulnerabilità strutturale: si riferisce alla strada in sé stessa e quindi alle sue caratteristiche costruttive, in termini, ad esempio, di larghezza, di caratteristiche geometriche e di progetto, di presenza e caratteristiche delle opere d'arte (ponti, gallerie, ecc.);
- vulnerabilità naturale: si riferisce alle caratteristiche del territorio attraversato dalla strada e ai rischi naturali che lo contrassegnano;
- vulnerabilità relativa al traffico o generata dal traffico: si riferisce alle caratteristiche che descrivono il flusso di traffico e le condizioni risultanti al variare di quest'ultimo in particolari situazioni (ore di punta, particolari giorni della settimana, durante le operazioni di manutenzione, ecc.)

Secondo l'autore il concetto di vulnerabilità deve identificare tre aspetti: il tipo di rischio rispetto al quale la rete è vulnerabile, gli elementi più vulnerabili e le modalità con cui si manifesta la vulnerabilità. Da sottolineare è la differenziazione che viene fatta tra vulnerabilità e affidabilità della rete, infatti la prima è legata al malfunzionamento e al collasso di un elemento, mentre la seconda attiene solo al suo funzionamento.

Una rete stradale può essere soggetta ed esposta contemporaneamente a queste tre tipologie di vulnerabilità che possono interagire tra di loro, e aumentare conseguentemente il livello di vulnerabilità globale. In particolare, Husdal differenzia il concetto di vulnerabilità da quello di affidabilità: se infatti l'affidabilità attiene al funzionamento degli archi che compongono la rete, e può essere vista come una misura del grado di stabilità della rete stessa, la vulnerabilità invece è legata alle conseguenze date dal collasso o dal malfunzionamento di un arco; in questo senso la vulnerabilità viene vista come una semplice misura delle conseguenze.

Riassumendo, esistono diverse interpretazioni del concetto di vulnerabilità. In particolare, se consideriamo una scala di analisi decrescente si può parlare di vulnerabilità di una regione, di vulnerabilità di un'intera rete, di vulnerabilità di elementi che costituiscono la rete (archi, nodi) e di vulnerabilità dovuta alle caratteristiche progettuali di un particolare manufatto (ponti, gallerie, rilevati, etc).

### 3.2. *Valutazione della vulnerabilità*

In letteratura sono state proposte parecchie definizioni e metodologie per il calcolo della vulnerabilità. La vulnerabilità di una rete può essere associata al livello di accessibilità: in questo modo le misure di accessibilità possono fornire una valutazione della vulnerabilità. Le procedure analitiche proposte individuano così l'affidabilità delle connessioni e i punti di debolezza della rete.

L'analisi del rischio alluvionale viene generalmente attuata tramite l'utilizzo di modelli idrologici e idraulici che possano simulare l'estensione dell'inondazione, l'altezza dei battenti e la velocità del flusso tramite modellazione monodimensionale o bidimensionale. Uno degli aspetti maggiormente affrontati riguardo al rischio idraulico delle infrastrutture è legato all'interruzione dei collegamenti causato dall'inagibilità delle sedi stradali alluvionate. La valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture al rischio idraulico basata su analisi GIS (Geographic Information Systems) è in grado di superare i limiti imposti dalla tradizionale modellazione idrologica fornendo uno strumento in grado di integrare diversi tipi di dati. Combinando l'analisi in ambiente GIS con dei modelli di analisi statistica è possibile valutare a larga scala la vulnerabilità al rischio alluvionale. Il modello applicato si basa su informazioni geografiche. Tale modello è stato proposto da P-A. Versini, E. Gaume, ed H. Andrieu in "Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information – test in a flash flood prone area (the Gard region, France)", pubblicato nel 2010 su *Natural Hazard and Earth System Sciences*. L'analisi parte dal presupposto che, per una previsione attendibile del rischio alluvionale per le infrastrutture viarie, sia necessaria una valutazione della suscettibilità delle sezioni stradali. Lo scopo dell'analisi condotta da E. Gaume, P-A. Versini ed H. Andrieu è quello di caratterizzare sistematicamente a scala regionale la vulnerabilità delle infrastrutture stradali al rischio idraulico. L'analisi è applicata agli attraversamenti della regione del Gard, Francia, zona soggetta a frequenti inondazioni repentine causate da piogge intense. Si ha a disposizione un dataset per l'area in esame che costa di un vasto inventario delle sezioni stradali sommerse nei 40 anni precedenti alla compilazione del suddetto set. Il modello analitico prevede l'identificazione di una serie di caratteristiche geografiche. Il dataset delle sezioni sommerse è denominato PICH (Plan d'Intervention aux Crises Hydrologiques). Gli attraversamenti elencati nel PICH costituiscono una piccola parte degli attraversamenti individuati tramite un'analisi in ambiente Gis (il 20%

sul totale). I dati si dividono in due gruppi: i punti non-PICH e i punti PICH. I primi, costituiti dagli attraversamenti non inventariati ed aventi, quindi, un tempo di ritorno empirico maggiore di 40 anni, i secondi costituiti dagli attraversamenti riportati nel dataset, e caratterizzati conseguentemente da un periodo di ritorno inferiore a 40 anni. E' possibile definire la solidità del modello, testando la robustezza e la validità dello stesso calibrandolo su un campione di elementi e validarlo su un campione diverso, confrontando così la coerenza dei risultati ottenuti. Il primo passo dell'analisi discriminante consiste nell'individuazione di fattori (fattori discriminanti) legati alla suscettibilità al rischio idraulico. I suddetti fattori considerati sono gli unici tra numerosi indicatori geografici per i quali emerge una differenza significativa tra le distribuzioni di punti PICH e non PICH secondo il test Wilcoxon-Mann Whitney e sono:

- Altitudine
- Pendenza locale nell'intorno della sezione stradale
- Area del bacino idrografico a monte.

A questi indicatori va aggiunto il coefficiente di deflusso dato dal rapporto tra la capacità teorica massima di deflusso della superficie libera attraverso la struttura e il deflusso teorico del bacino a monte considerato un tempo di ritorno di 10 anni. Il test Wilcoxon-Mann Whitney è un test non parametrico utilizzato per verificare, in presenza di valori ordinali provenienti da una distribuzione continua, se due campioni provengono dalla stessa popolazione. I risultati del test evidenziano che la distribuzione delle quote normalizzate delle sezioni stradali PICH nelle quattro regioni di calibrazione differisce significativamente da una distribuzione uniforme. Tramite il test emerge, infine, che le sezioni PICH sono caratterizzate da bacini idrografici a monte più ampi rispetto a quelli che drenano verso tratti non PICH. Il potere discriminatorio dei fattori viene valutato anche attraverso un altro test di ordinamento; i valori di soglia per ciascun indicatore considerato individuano quattro classi di vulnerabilità:

- Classe di vulnerabilità 1: contiene il 20% dei punti PICH e il minor numero possibile di punti non PICH.
- Classe di vulnerabilità 2: contiene un ulteriore 30% dei punti PICH.
- Classe di vulnerabilità 3: contiene il 50% dei punti PICH rimanenti.
- Classe di vulnerabilità 4: contiene solo punti non PICH. La proporzione dei punti non PICH nelle prime tre classi dovrebbe essere zero se il fattore discriminante fosse efficiente

al 100%. Per poter confrontare i risultati ottenuti dalle aree di calibrazione e poterli riportare alle zone di validazione è necessario normalizzarli, il metodo di normalizzazione applicato si basa su un indice corrispondente ad una probabilità di superamento (Formula A e B):

(A)

$$Ind = i - 0,5 n + 0,5$$

(B)

$$Ind = 1 - i - 0,5 n + 0,5$$

Dove  $i$  è il rango del valore nell'area in cui tutti i valori sono stati ordinati in ordine crescente ed  $n$  è il numero degli elementi analizzati, ovvero il numero degli attraversamenti. L'indice assume valori minori al crescere della concentrazione dei punti PICH: se i punti PICH sono concentrati su valori bassi di un parametro, al crescere di tali valori cresceranno anche quelli assunti dall'indice, viceversa se i punti PICH sono concentrati su valori alti del parametro. La Formula A è applicata ai parametri per i quali i punti PICH sono concentrati tra i valori più bassi, quindi alla pendenza massima locale e alla quota, la Formula B a quelli per i quali i punti PICH hanno densità maggiore tra i valori più alti, quindi alle aree dei bacini a monte. Gli indici assumono valori compresi tra 0 e 1, per cui valori prossimi allo zero rappresentano una suscettibilità alta e valori prossimi ad uno rappresentano una suscettibilità bassa. Tale metodo di normalizzazione risulta robusto soprattutto per valori estremi. La struttura del set di dati presenta una combinazione non lineare basata sui connettori logici "and" e "or" è più adatta della tradizionale combinazione lineare per raggiungere la migliore efficienza di classificazione. Troviamo classi delimitate da valori di soglia che, per uno stesso elemento, devono essere contemporaneamente superati da tutti e tre i fattori (connettivo "and") o superate da almeno un fattore (connettivo "or"). Le soglie sono individuate in base alla percentuale di punti alluvionati in ciascuna classe (20%, 30%, 50%). Dalle distribuzioni cumulative di superamento delle combinazioni dei tre indicatori si ha: il connettore AND più adatto a definire le classi ad alta vulnerabilità mentre il connettore OR ha prestazioni più elevate per le classi a bassa vulnerabilità. Per semplificare viene

considerato un unico valore di soglia per ciascuno dei tre fattori. La soglia che separa la prima classe dalla seconda è il valore minimo per cui la prima classe contiene un 20% di punti PICH i cui fattori non superano tale valore: la prima classe contiene il 20% delle sezioni alluvionate i cui tre indici relativi ai tre fattori discriminanti assumono valori minori o uguali a 0.3. La soglia relativa alla seconda classe è individuata come quella che la separa dalla prima considerando una percentuale di punti PICH del 50% (il 20% appartenente alla prima classe più un ulteriore 30%). La soglia invece che delimita la terza classe dalla quarta, è ottenuta considerando il valore per cui il 100% dei punti PICH ha un fattore minore o uguale a 0.57. La fase di convalida del modello ha prodotto dei risultati soddisfacenti dai quali si deduce la robustezza della procedura. Da queste analisi si evincono, nonostante le variabilità dovute a situazioni locali alcune tendenze generali riguardanti la dimensione delle strutture di attraversamento la quale non è l'unica grandezza che influenza la vulnerabilità stradale alle inondazioni; i tratti stradali sommersi spesso tendono a trovarsi in aree pianeggianti a bassa quota, a valle di bacini idrografici estesi. Indagini sul campo indicano che non necessariamente è la struttura di attraversamento ad essere sommersa ma piuttosto un punto sulla strada di accesso a questa struttura situata nella pianura alluvionale. Concludendo si afferma che i punti più frequentemente sommersi della rete stradale sono effettivamente concentrati nelle classi di sensibilità più elevate. Quasi tutti gli elementi appartenenti alla terza classe sono caratterizzati da periodi di ritorno empirici superiori a 10 anni, mentre quasi tutti i punti appartenenti alla prima classe hanno periodi di ritorno empirici inferiori ad un anno.

### *3.3 Cause della vulnerabilità*

Lo studio dei rischi ai quali può essere esposta un'infrastruttura è uno strumento utile per garantire un adeguato livello di servizio sulla rete in diverse condizioni di esercizio. I rischi possono essere classificati in modo diverso a seconda degli attributi che si vanno a considerare. Andando a considerare le cause, è possibile distinguere tra:

- eventi naturali, legati a fattori che non possono essere controllati (terremoti, alluvioni pluviali e fluviali, frane, ecc.);
- eventi antropici, causati dall'attività umana (guasti a centrali nucleari o industrie chimiche).
- In base alla probabilità di accadimento possiamo avere:

- eventi ordinari, come ad esempio l'allagamento di una strada;
- eventi eccezionali, come ad esempio alluvioni.
- Ancora gli eventi possono essere:
- prevedibili, se, attraverso l'uso di tecnologie, è possibile prevedere l'evento, a volte con largo anticipo. Per questo tipo eventi è possibile realizzare interventi attivi di incremento del livello di sicurezza, agendo sulla mitigazione del rischio o scongiurandone del tutto le conseguenze (come avviene ad esempio nel caso di stabilizzazione dei versanti). Eventi prevedibili possono essere manifestazioni meteorologiche intense;
- imprevedibili, se l'evento è difficilmente prevedibile e di conseguenza non è possibile mettere in moto misure di soccorso con largo anticipo. In questo caso è possibile parlare di interventi passivi di incremento del livello di sicurezza, che agiscono riducendo la gravità dell'evento o le sue conseguenze (ad esempio la realizzazione di sistemi di previsione ed allerta, o l'elaborazione di modelli di gestione delle reti). Eventi imprevedibili sono i fenomeni legati al movimento della crosta terrestre o le eruzioni vulcaniche.

Sofferriamo l'attenzione sugli eventi naturali nello specifico alluvioni. Si presentano alluvioni fluviali dati luogo dalla trasformazione degli afflussi in deflussi, e alluvioni pluviali provenienti dallo smaltimento delle acque meteoriche che ricadono sulla piattaforma stradale. Per acque meteoriche si intende la parte delle acque di una precipitazione atmosferica che dilava le superfici scolanti. La composizione di tali acque, le rende particolarmente pericolose per l'ambiente. Le alluvioni fluviali si verificano quando la portata di un corso d'acqua non può essere contenuta nell'alveo e quindi esonda allagando il territorio circostante. Questo scenario ha luogo solitamente a seguito di piogge intense e di lunga durata che si riversano sul bacino idrografico del corso d'acqua; l'apporto di acqua piovana determina una risposta del bacino che si traduce in una variazione della portata. La significatività e la rapidità della variazione della portata dipendono dalla magnitudo e dalla durata dell'evento meteorologico e dalle caratteristiche del bacino idrografico. L'afflusso può essere diretto, ovvero quella quota di precipitazione che cade direttamente sulle superfici liquide, o dato da deflusso superficiale, ovvero quella parte di precipitazione che si riversa sul bacino e che, non soggetta ad evapotraspirazione o infiltrazione nel terreno, si dirige superficialmente verso

la sezione di chiusura e quindi verso l'asta principale. C'è poi una parte di afflusso dovuta a deflussi sotterranei o profondi dati dalla quota di acqua piovana che si è infiltrata. A parità di intensità di pioggia l'entità della portata di piena in corrispondenza della sezione di chiusura di un bacino idrografico dipende dalla durata dell'evento pluviometrico e dal tempo di corrivazione del bacino, che a sua volta è funzione di caratteristiche topografiche, geologiche e litologiche del bacino stesso, nonché dall'uso del suolo. Anche l'area del bacino influisce sulla magnitudo della portata, più è estesa maggiori saranno i contributi di portata che fluiscono verso l'asta principale. Non dobbiamo trascurare però la situazione di valle, ovvero quando la portata di colmo generatasi a seguito di un evento meteorologico arriva a transitare a fondovalle dove generalmente si ha una densità insediativa maggiore. Il fenomeno dell'urbanizzazione condiziona fortemente le caratteristiche morfologiche e idrauliche dei corsi d'acqua; anche la presenza di una rete di infrastrutture viarie anche in ambito extraurbano rappresenta generalmente vincolo di non poca importanza per il naturale tragitto delle aste fluviali. Influenzare queste caratteristiche di un corso d'acqua comporta un aumento del rischio idraulico e una maggiore probabilità che l'onda di piena non venga contenuta dall'alveo ed esondi. Tra le alluvioni fluviali più frequenti si presentano le "flash floods" letteralmente "alluvioni lampo" quindi si parla di alluvioni improvvise e istantanee. Queste alluvioni coinvolgono piccoli bacini e si sviluppano in tempi molto rapidi, sono causate da precipitazioni intense che comportano il rapido aumento del livello dell'acqua di aste fluviali aventi bacini poco estesi e pendenze relativamente elevate. Una soluzione alle acque meteoriche potrebbe essere una corretta gestione delle stesse finalizzata a ridurre l'apporto contenendo di conseguenza allagamenti ed esondazioni. Le piene pluviali si sviluppano indipendentemente dai corpi idrici superficiali quando il sistema di smaltimento delle acque meteoriche risulta insufficiente al drenaggio e si satura a causa di precipitazioni intense con conseguente allagamento delle infrastrutture. Le alluvioni pluviali si verificano anche quando il terreno è incapace di assorbire le acque meteoriche (terreni saturi o affetti da recenti incendi boschivi) a causa di una bassa permeabilità.

### *3.4 Valutazione della pericolosità*

La pericolosità è una misura capace di valutare la probabilità che un determinato evento possa accadere. La valutazione della pericolosità può essere fatta per diversi tipi di evento (sisma, frane, inondazioni, valanghe, alluvioni ecc.), utilizzando dati ed elaborazioni distinti per ciascuno di essi. Ovviamente maggiori saranno i dati e maggiore sarà il livello di dettaglio e di affidabilità ottenuto dall'analisi, mentre la scala di rappresentazione delle carte sarà determinata in base all'ampiezza del territorio in esame e al grado di dettaglio richiesto.

La valutazione della pericolosità può essere fatta seguendo uno degli approcci qui riportati:

- **Approccio di zona.** Si identificano i rischi potenziali in una regione e si valutano gli effetti indotti sulla rete stradale, individuando i punti in cui la rete è soggetta ad un evento rischioso;
- **Approccio locale.** Si considera il singolo elemento della rete e si elencano tutti i possibili eventi a cui può essere soggetto. Anche per la redazione delle carte di pericolosità sono possibili due approcci:
- **Approccio probabilistico:** si costruisce un modello fisico che rappresenta il fenomeno attraverso un certo numero di equazioni;
- **Approccio deterministico:** la pericolosità viene ricostruita attraverso i dati storici relativi agli eventi che si sono verificati nella zona in passato.

## 4. Valutazione della suscettibilità idraulica dei tronchi stradali

Come discusso nel paragrafo 3.3 le infrastrutture possiedono una elevata suscettibilità al rischio idraulico dovuto ad alluvioni e allo smaltimento delle acque meteoriche.

In questo capitolo si andrà a valutare la suscettibilità delle strade di competenza della Città Metropolitana di Torino attraverso l'applicazione del metodo esposto precedentemente nel paragrafo 3.2. Tale metodo, era stato applicato e validato per gli attraversamenti fluviali, ma ora verranno valutati i tronchi stradali in modo da ricercare anche per essi un metodo di quotazione e classificazione speditivo.

Innanzitutto si individuano i tronchi stradali da sottoporre all'analisi, si valutano i parametri geomorfologici e si cerca una correlazione di pericolosità attraverso l'attribuzione di incidenti stradali avvenuti su di essi.

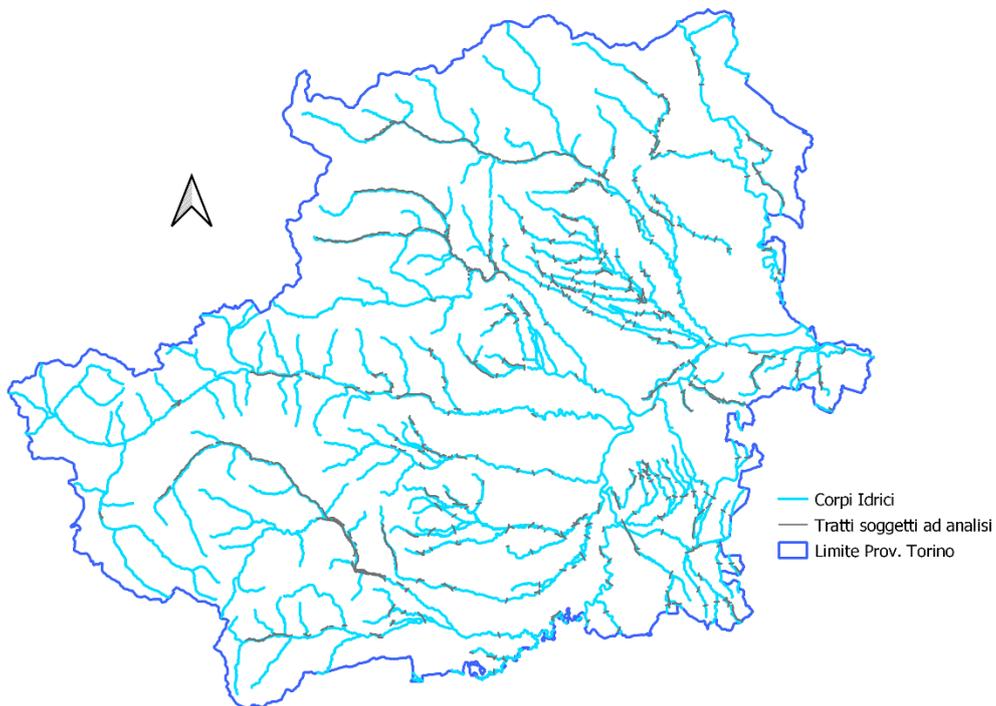
Gli strati informativi che verranno utilizzati in questa analisi saranno trattati esclusivamente in ambiente GIS e sono:

- Digital terrain Model, con estensione provinciale ed una maglia di 5 metri;
- File lineare (.shp) degli elementi stradali.

### 4.1. *Individuazione dei tronchi stradali*

Il primo step di questa analisi è quello di scegliere la lunghezza dei tronchi stradali da sottoporre all'analisi, e a tal proposito per avere un numero consistente di elementi e per una maggiore attinenza con il metodo di valutazione espresso al paragrafo 3.2 valutiamo una lunghezza di 100 metri, cioè una lunghezza non molto elevata in modo da poter paragonare i tratti stradali agli attraversamenti.

Si è proseguito poi ad analizzare i tratti stradali in prossimità dei corsi d'acqua per analizzare la suscettibilità al rischio idraulico e i suddetti sono maggiormente soggetti al rischio di alluvioni (figura 7).



*Figura 7: localizzazione tratti stradali utilizzati per l'analisi.*

Analizziamo ora un Database di incidenti avvenuti dal 2011 al 2017 lungo le strade Provinciali di Torino. Questo set di dati riporta per ogni incidente una serie di attributi:

- Data ed ora;
- Posizione in coordinate Nord-Est;
- Denominazione della strada;
- Condizione Meteorologica;
- Modalità di accadimento.

Attraverso queste informazioni è possibile isolare gli incidenti avvenuti in condizioni di pioggia e in seguito alla loro posizione si individuano i tratti stradali oggetti d'analisi che risultano essere almeno una volta incidentati (figura 8).

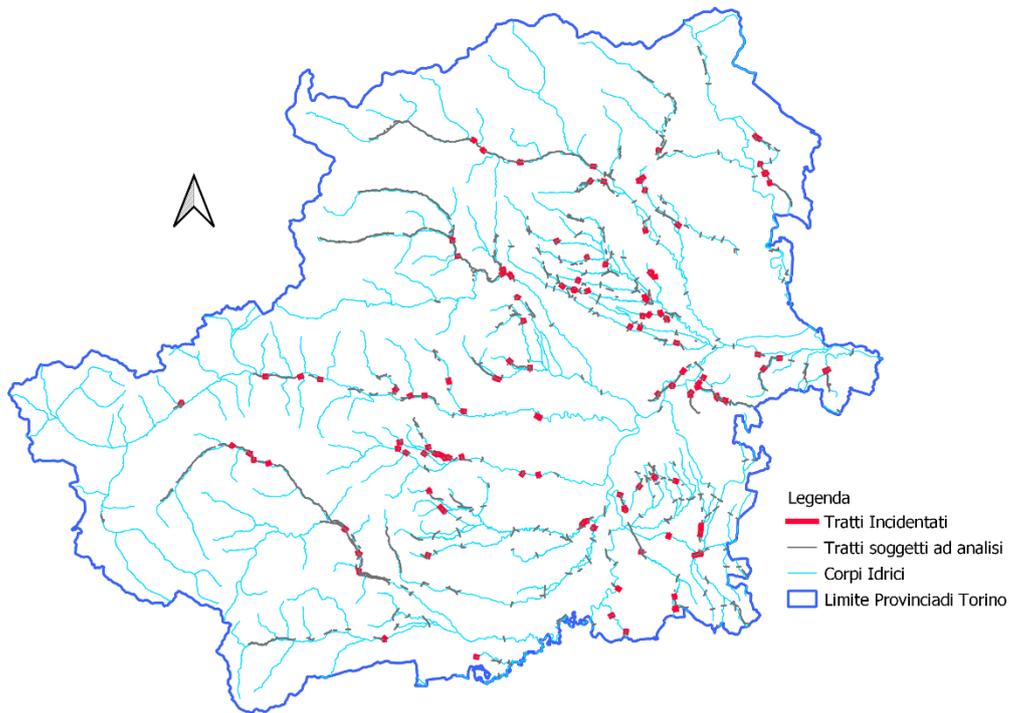


Figura 8: localizzazione tratti incidentati oggetto di analisi.

Al termine di queste fasi di analisi in ambiente GIS si passa ad una verifica manuale attraverso Excel dei tratti stradali scelti per l'analisi. Il set di dati finali è costituito da un numero complessivo di tronchi stradali pari a 9364 dei quali 218 risultano essere incidentati e 9146 no.

<b>Incidentati</b>	218
<b>Non incidentati</b>	9146
<b>Totale</b>	9364

Tabella 1: riepilogo del numero di tratti soggetti ad analisi.

#### 4.2. Individuazione dei parametri geomorfologici

Come detto in precedenza la suscettibilità idraulica di questi tronchi stradali, è valutata attraverso il metodo descritto nel paragrafo 3.2. Tale procedura prevede la caratterizzazione di questi elementi attraverso tre parametri morfologici che sono:

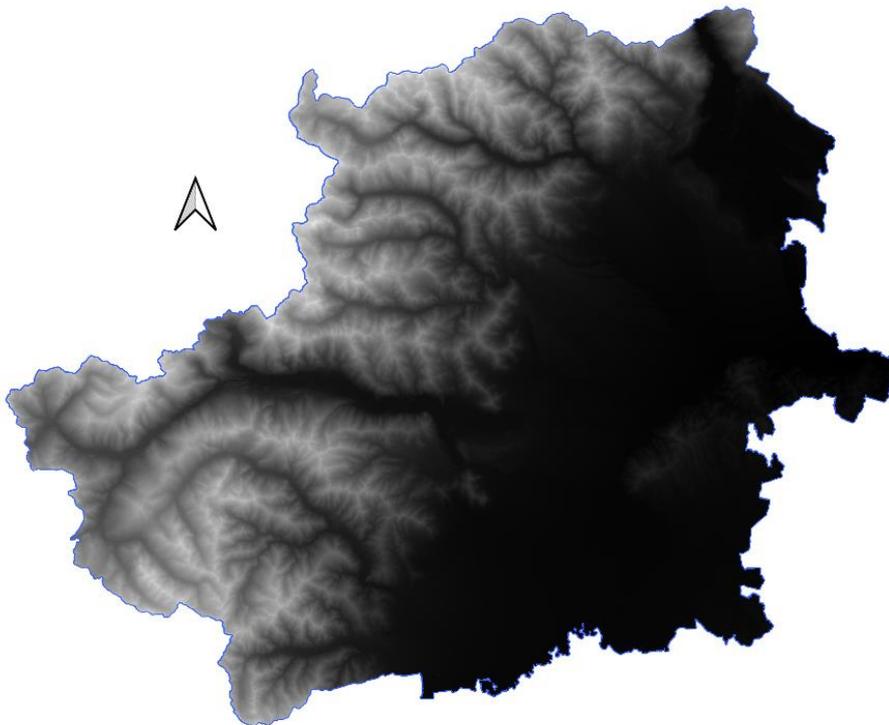
- *Quota media sul livello del mare;*
- *Pendenza;*
- *Area di Bacino.*

La stima di questi fattori è stata fatta completamente attraverso l'uso di un software GIS, in particolare è stato utilizzato Qgis, un software Opensource che permette di editare ed analizzare dati geografici.

In particolare, in questo progetto, l'attribuzione di questi parametri e la relativa analisi verrà diversificata tra tratti stradali incidentati e tratti non incidentati.

#### 4.2.1. Quota media del tronco stradale

Il valore della quota è attribuito attraverso Qgis, assegnando il valore medio del raster delle quote per ogni tratto. Il raster delle quote è stato ottenuto attraverso il Digital Terrain model della regione Piemonte con maglia 5 x 5.



*Figura 9: Digital Terrain model maglia 5x5 - Provincia di Torino, Geoportale Piemonte*

A seguito di questa attribuzione di valore medio della quota sia ai tratti incidentati che a quelli non incidentati, i valori sono stati normalizzati attraverso la formula (A) espressa nel paragrafo 3.2 e sono stati suddivisi in 10 classi con passo 0.1.

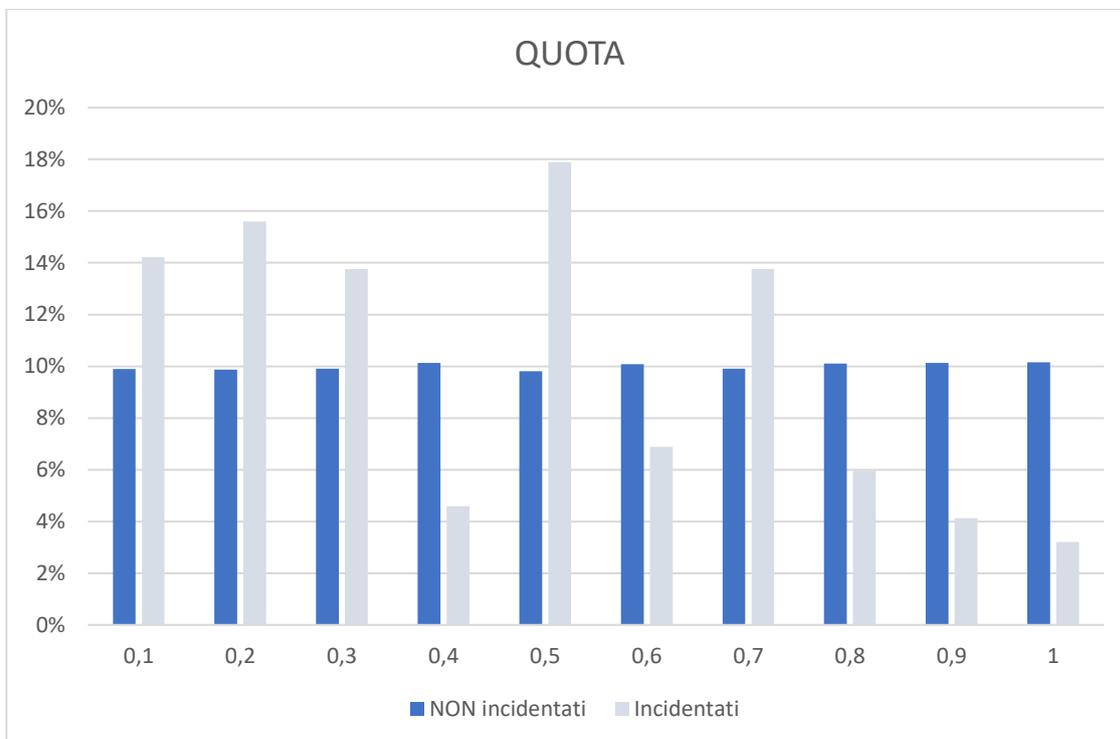


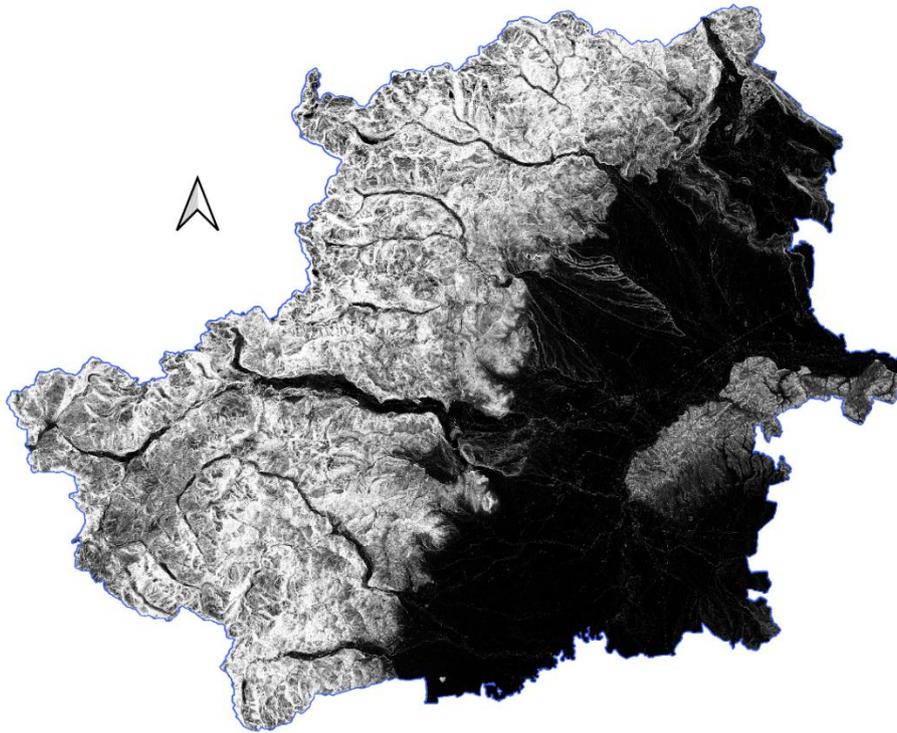
Figura 10: Distribuzione dei valori di quota media normalizzati dei tronchi stradali incidentati e non. Le colonne in blu rappresentano i tronchi non incidentati mentre le colonne in grigio i tronchi incidentati.

Da questo grafico (figura 10) è possibile osservare come la distribuzione dei tratti non incidentati risulta omogenea e stabilizzata intorno al 10% per le diverse classi. È importante ricordare che il valore 1 in questa classificazione rappresenta le quote medie più alte tra tutti i tronchi analizzati, ovvero, l'indice di normalizzazione è direttamente proporzionale alla quota.

Per quanto riguarda i tratti di strada incidentati è possibile osservare come la maggior parte di essi sono localizzati in tratti con quote medie basse, il 66% dei 218 tratti incidentati è avvenuto in tronchi di strada con una quota media massima di 368 m.

#### 4.2.2. Pendenza media del tratto stradale

Il valore della pendenza al tronco di strada è stato attribuito mediante ambiente GIS ottenendo così il raster delle pendenze a partire dal DTM, attraverso l'utilizzo dell'algoritmo fornito nella Directory di Qgis, GDAL-SLOPE. Tale stima è stata assegnata alla pendenza stessa del tronco stradale e confrontando i dati di incidentalità questo parametro è il medesimo ad influenzare maggiormente la stabilità dei veicoli.



*Figura 11: Raster delle pendenze utilizzato per l'analisi. Il colore nero rappresenta pendenze tendenti a zero mentre il bianco rappresenta la massima pendenza*

Nel seguente caso con ogni valore delle pendenze assegnato all'elemento considerato viene applicato il fattore di normalizzazione (A), in quanto a valori crescenti di pendenza gli elementi sono valutati maggiormente suscettibili al rischio idraulico.

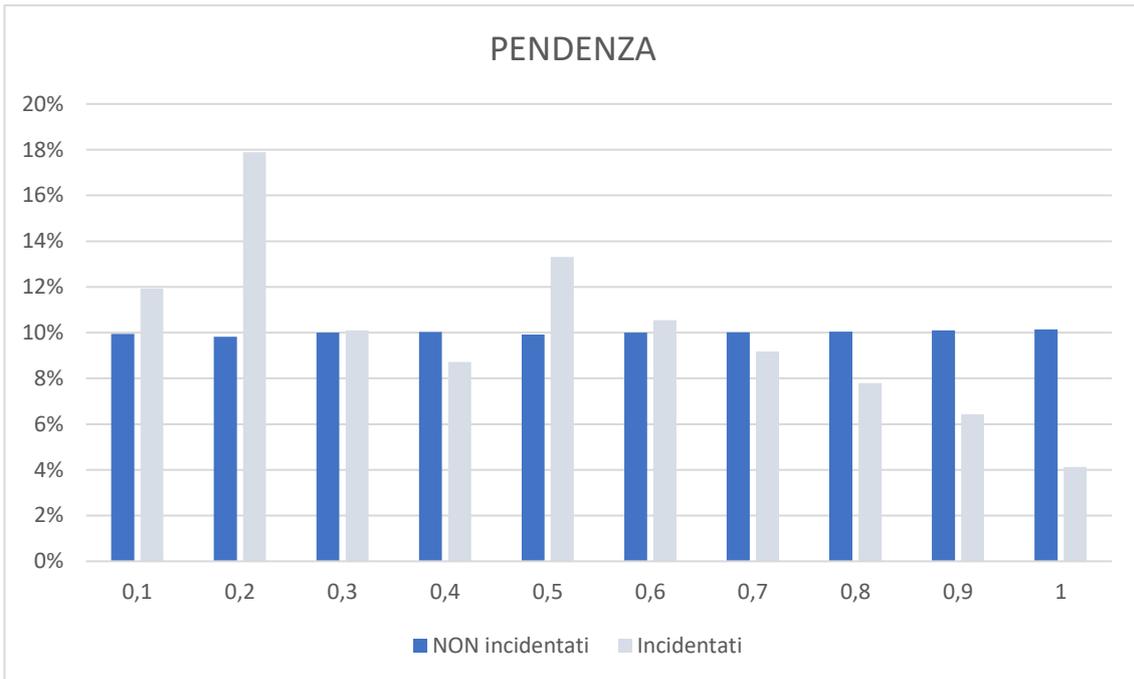


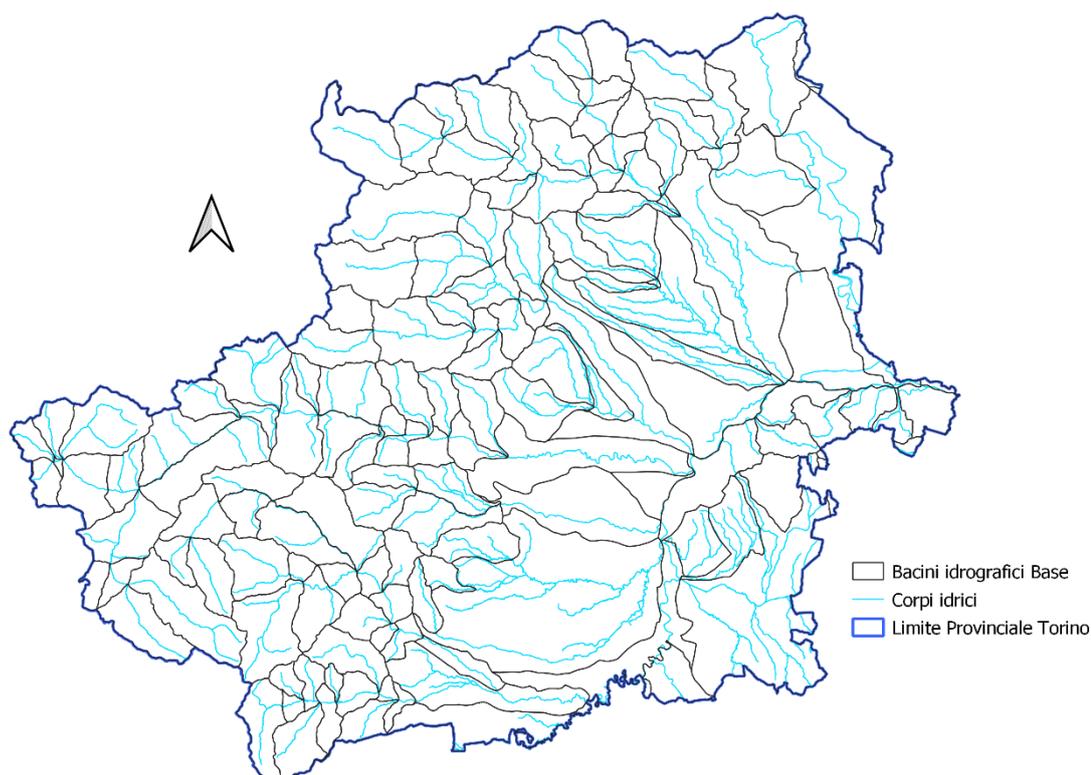
Figura 12: Distribuzione dei valori di pendenza media normalizzati dei tronchi stradali incidentati e non. Le colonne in blu rappresentano i tronchi non incidentati mentre le colonne in grigio i tronchi incidentati.

Analizzando questa distribuzione è possibile osservare come per i tratti non incidentati la distribuzione è uniforme ed assestata nell'intorno del 10% per ogni classe di normalizzazione. I tratti incidentati tendono ad essere localizzati nei gruppi di normalizzazione con importanti pendenze maggiori.

Si deduce quindi che correlando il rischio idraulico all'incidentalità la suscettibilità aumenta all'aumentare della pendenza del tratto.

#### 4.2.3. Area bacino

Punto d'interesse ora sono i bacini idrografici, consideriamo questa volta tratti stradali e non attraversamenti fluviali, come è illustrato dal metodo di valutazione (paragrafo 3.2.), attribuiamo ai seguenti tronchi stradali l'area dei bacini base poiché possiedono un minore tempo di corrivazione e quindi potenzialmente più pericolosi.



*Figura 13: Bacini idrografici base ai tronchi stradali analizzati.*

La normalizzazione è stata effettuata con l'utilizzo della formula (B), in questo caso la suscettibilità al rischio idraulico è inversamente proporzionale alla grandezza dell'area del bacino idrografico, per questo motivo ad un indice di normalizzazione basso corrisponde un'area di bacino ampia.

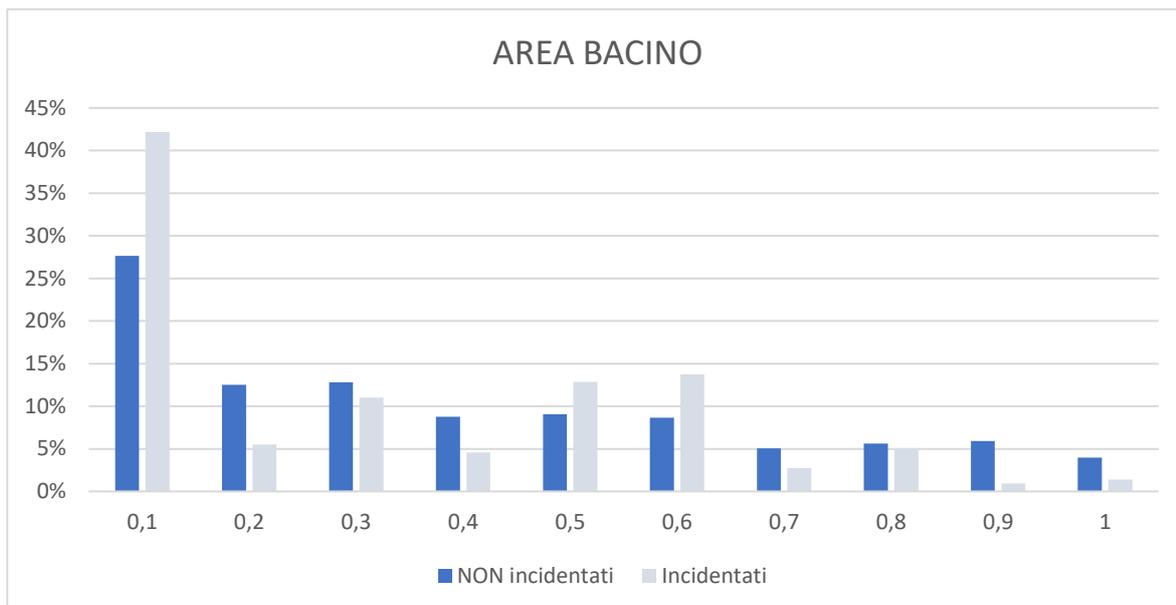


Figura 14: Distribuzione dei valori di area di bacino normalizzati dei tronchi stradali incidentati e non. Le colonne in blu rappresentano i tronchi non incidentati mentre le colonne in grigio i tronchi incidentati.

Contrariamente ai due fattori precedenti, ora si ha un aumento della suscettibilità al rischio idraulico anche per i tratti non incidentati, infatti circa il 30 % del totale degli elementi ricade nella prima classe di normalizzazione. Per quanto concerne i tratti incidentati anche questi risultano distribuiti per il 45% nella prima classe di normalizzazione.

#### 4.3. *Classificazione della suscettibilità dei tronchi*

Per poter classificare i tronchi stradali analizzati è necessario individuare dei valori di soglia, i quali, contrariamente a quanto esposto nel paragrafo 3.2, sono stati scelti andando ad analizzare quelle che sono le distribuzioni di probabilità del numero di tronchi incidentati rispetto ai valori normalizzati dei parametri caratterizzanti (Quota, Pendenza, Area Bacino). Viene dunque analizzato in quale intervallo di parametri normalizzati vanno a concentrarsi i tronchi incidentati

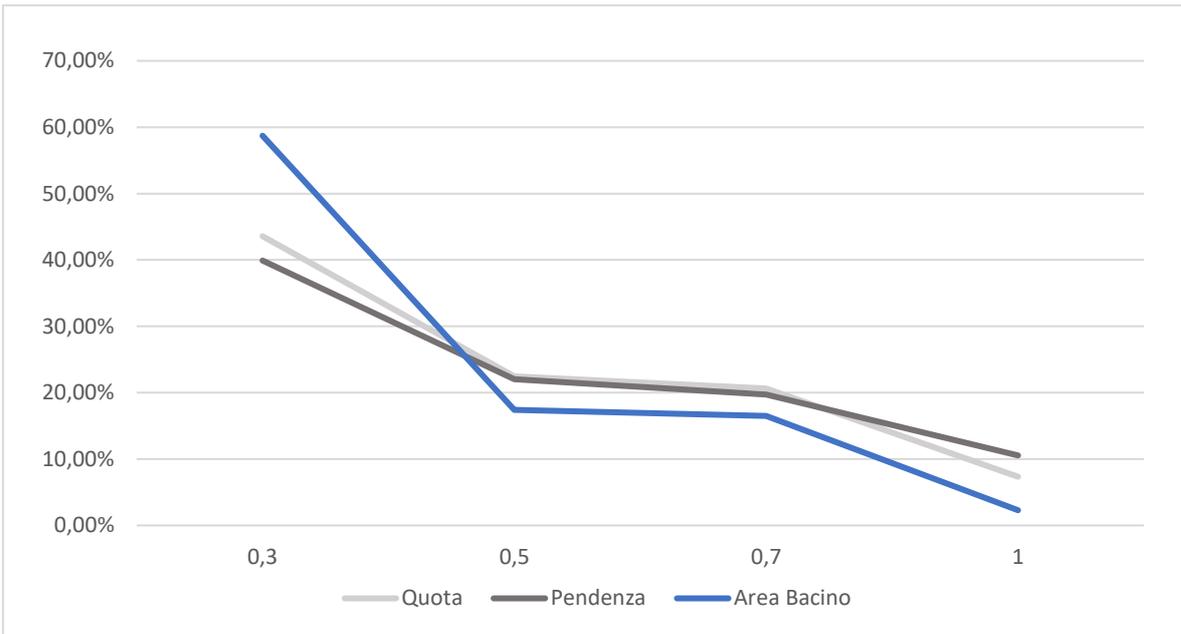


Figura 15: Andamento distribuzione di probabilità dei tronchi incidentati rispetto ai valori di soglia.

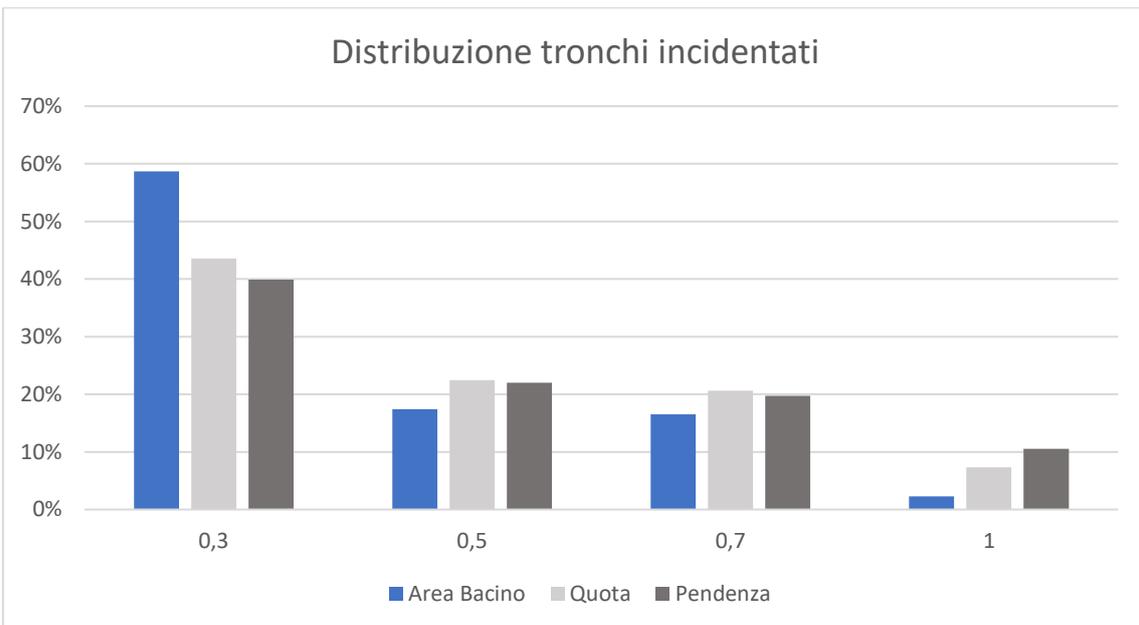


Figura 16: distribuzione di probabilità dei tronchi incidentati suddivisi per valori di soglia. Le colonne in blu rappresentano i valori normalizzati delle aree di bacino attribuiti ai tronchi stradali, le colonne in grigio chiaro rappresentano i valori normalizzati della quota media sul livello del mare attribuiti ai tronchi e le colonne in grigio scuro rappresentano i valori di pendenza media normalizzati dei tronchi.

Da queste due figure (15\_16) è possibile osservare come la maggior parte degli incidenti sia concentrata nell'intervallo da 0 a 0,3, successivamente si ha un andamento decrescente

fino al valore 0.5 e poi di nuovo un flesso fino a scendere al valore unitario dei parametri normalizzati.

In base all'analisi che è stata fatta nei paragrafi precedenti, ricordiamo che più è basso il valore normalizzato maggiore sarà la suscettibilità del tronco al rischio idraulico.

I valori di soglia quindi scelti per la classificazione risultano essere 3 e sono rispettivamente, in ordine di decremento della suscettibilità, 0.3,0.5 e 0.7.

Valori di Soglia	Quota [m.s.l.m]	Pendenza [%]	Area Bacino [m <sup>2</sup> ]
0.3	265	4	54439072
0.5	369	6.4	37723889
0.7	492	11.8	23673244

*Tabella 2: valori dei fattori discriminanti corrispondenti ai valori normalizzati di soglia.*

Dopo aver individuato i valori di soglia si procede ad una combinazione logica di questi valori attraverso i connettivi logici “And” e “or”. In particolare, il connettivo “and” si applica quando due valori soddisfano la stessa condizione, ad esempio quando tutti gli indici di normalizzazione relativi ai tre fattori discriminanti risultano essere inferiori di un valore di soglia, il connettivo “or” invece si applica quando un solo parametro discriminante non rispetta la condizione imposta per la valutazione della classe di suscettibilità.

Alla base di queste valutazioni sono state individuate quattro classi di suscettibilità:

- **Classe di suscettibilità 1**, ricadono in questa classe gli elementi con i fattori discriminanti tutti inferiori al primo valore di soglia e per questo motivo questi sono gli elementi con la maggiore suscettibilità al rischio idraulico.
- **Classe di suscettibilità 2**, in questa classe troviamo quei tronchi dove almeno un valore risulta essere maggiore del valore di soglia 0,3.
- **Classe di suscettibilità 3**, gli elementi appartenenti a questa classe risultano meno suscettibili al rischio idraulico, si ha che almeno uno dei fattori discriminanti normalizzati risulta maggiore del secondo valore di soglia 0,5.
- **Classe di suscettibilità 4**, sono i tronchi stradali a minore suscettibilità idraulica e si ha quando i parametri discriminanti risultano essere maggiori del terzo valore di soglia, cioè in quell'intervallo di normalizzazione dove i tronchi stradali risultano essere non incidentati.

Alla base di queste valutazioni, fatte considerando i tronchi incidentati come quelli maggiormente suscettibili al rischio idraulico, classifichiamo anche i tronchi stradali non incidentati. I risultati ottenuti sono stati riassunti nelle tabelle successive.

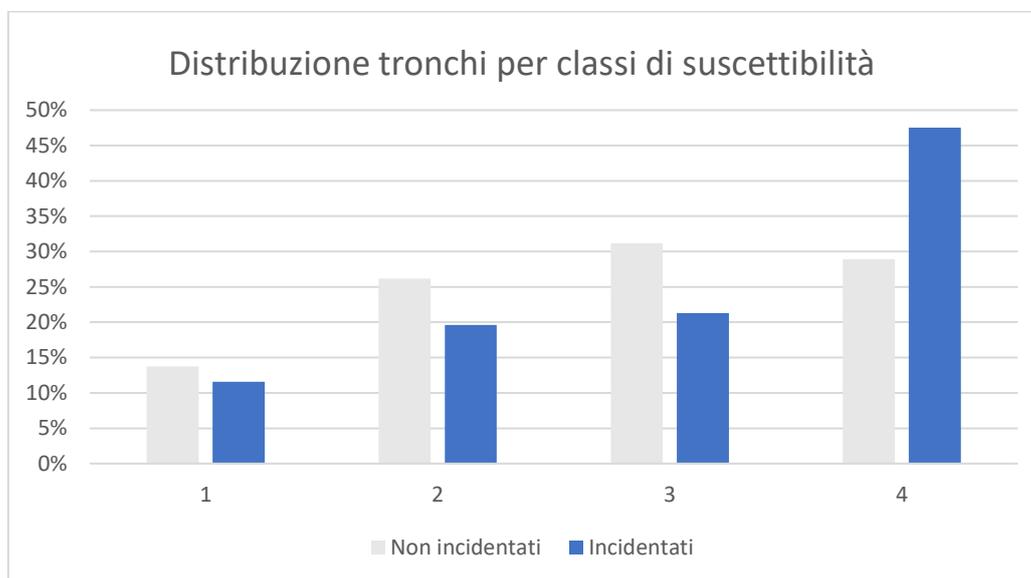


Figura 17: Distribuzione dei tronchi stradali suddivisi per classe di suscettibilità. Le colonne in grigio rappresentano la distribuzione per classi di suscettibilità dei tronchi non incidentati e le colonne in blu rappresentano la distribuzione dei tronchi incidentati.

Analizzando nel dettaglio la Fig.17 notiamo che nelle prime tre classi di suscettibilità troviamo basse percentuali di tronchi non incidentati rispetto a quelli incidentati, mentre circa il 50% dei tronchi non incidentati è situato nella classe di rischio minore, è possibile quindi affermare che con questo metodo di valutazione la maggior parte dei tronchi stradali ricade in una classe di bassa suscettibilità al rischio idraulico.

CLASSE	N° elementi incidentati	N° elementi non incidentati
1	30	1059
2	57	1794
3	68	1947
4	63	4346

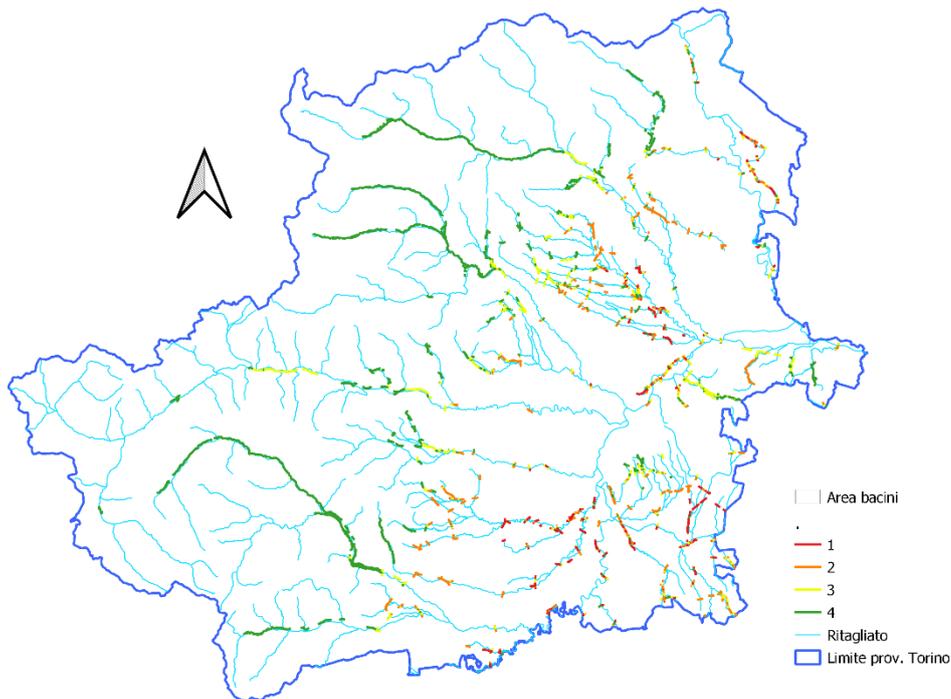
Tabella 3: numero di tronchi stradali analizzati per classi di suscettibilità suddivisi in incidentati e non incidentati.

CLASSE	N° elementi incidentati	N° elementi non incidentati
1	13,76%	11,58%
2	26,15%	19,62%
3	31,19%	21,29%
4	28,90%	47,52%

Tabella 4: percentuale di tronchi stradali analizzati per classi di suscettibilità suddivisi in incidentati e non incidentati.

Riassumendo i dati analizzati possiamo dedurre che il numero di elementi incidentati è maggiore nelle prime 3 classi di suscettibilità, per gli elementi non incidentati la situazione è opposta.

Attraverso l'uso di Qgis è possibile riportare la classificazione degli elementi sulla mappa in modo da poter osservare meglio la distribuzione spaziale dei tronchi stradali analizzati.



*Figura 18: risultati classificazione della suscettibilità al rischio idraulico dei tronchi stradali. In rosso sono rappresentati i tronchi appartenenti alla classe di suscettibilità 1, in arancione i tronchi appartenenti alla classe di suscettibilità 2, in giallo i tronchi appartenenti alla classe di suscettibilità 3 ed i verde quelli appartenenti alla quarta classe di suscettibilità..*

Inserendo il Digital Terrain Model è possibile osservare come tutti i tronchi di classe di suscettibilità 1, molto alta, appartengono a zone con una quota altimetrica bassa e questo risulta essere in accordo con il modello utilizzato.

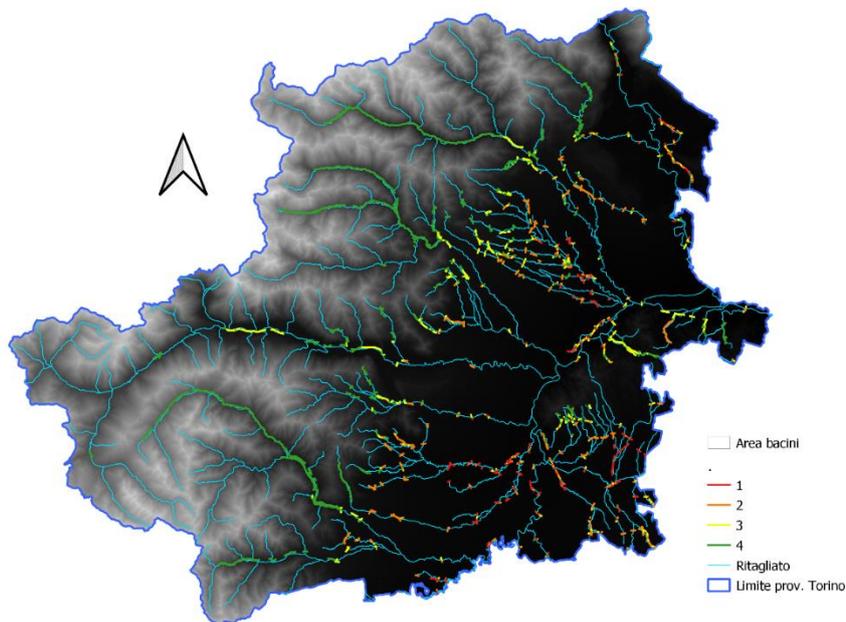


Figura 19: distribuzione spaziale tronchi stradali classificati in classi di suscettibilità con sfondo di riferimento DTM.

È possibile fare la stessa valutazione inserendo il raster delle pendenze e il file lineare delle aree di bacino, anche in questo caso è possibile osservare l'adeguatezza del modello. Si rimanda agli allegati per la consultazione delle Mappe.

#### 4.4. Validazione dei risultati

Per poter validare il metodo di classificazione utilizzato, si confrontano i risultati ottenuti con le mappe di pericolosità da alluvione da parte dell'autorità del bacino del Po.

Tali mappe derivano da una direttiva Europea del 2007 la quale sanciva che gli stati membri dovevano disporre di mappe di pericolosità che mostrino le aree a rischio potenziale di alluvione in tre scenari diversi:

- Scarsa probabilità o scenari di eventi estremi;
- Media probabilità di alluvioni;
- Elevata probabilità di alluvioni.

L'autorità di bacino del Po nella modellazione degli scenari di rischi ha considerato alluvioni di tipo marino e di tipo fluviale. Questa situazione avrebbe portato ad una sovrapposizione degli effetti nello scenario finale, a tal proposito la modellazione della pericolosità viene effettuata in modo diverso per diversi ambiti territoriali:

- Reticolo principale: costituito dall'asta del fiume Po e dai suoi principali affluenti;
- Reticolo secondario collinare e montano: formato da corsi d'acqua secondari nei bacini collinari e montani;
- Reticolo secondario di Pianura: comprendente corsi d'acqua di pianura.

Per quanto riguarda gli scenari di probabilità delle alluvioni di tipo fluviale, l'Autorità di Bacino del Po, tenendo conto delle caratteristiche idromorfologiche e idrodinamiche associate alla formazione dei deflussi e alla propagazione in alveo, ha utilizzato nella modellazione tempi di ritorno che variano tra 10 anni e 50 anni per lo scenario P3, tra 100 anni e 200 anni per lo scenario P2 e tra 200 anni e 500 anni per P1.

Gli scenari individuati sono i seguenti:

- P3: scenario Frequente;
- P2: scenario poco frequente;
- P1: scenario Raro.

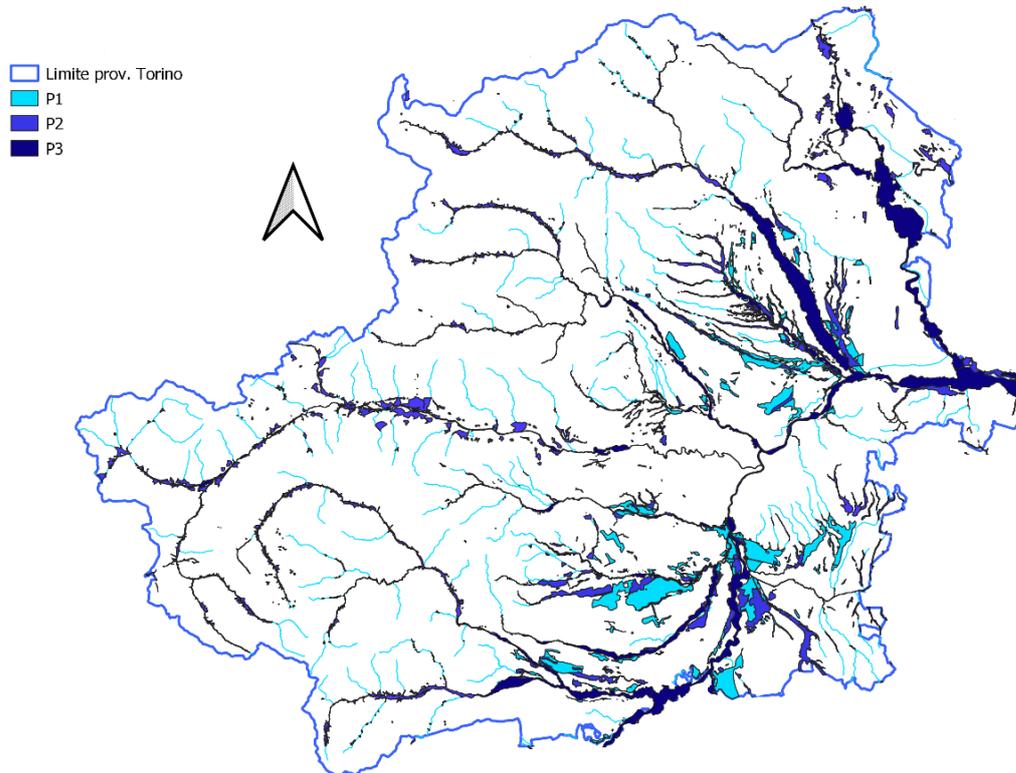


Figura 20: Mappe di pericolosità PAI del rischio alluvioni.

Considerando tali aree potenzialmente a rischio, attraverso un'analisi GIS è stato possibile analizzare quali dei tratti stradali classificati al paragrafo precedente

appartenessero o meno a tali aree. Se il numero di elementi classificati come elementi ad alto rischio appartengono a tali aree allora si afferma che il metodo di valutazione utilizzato è affidabile.

La validazione dei risultati è stata fatta per i tronchi stradali appartenenti alle classi di suscettibilità 1 e 2 ovvero i tronchi con un'alta suscettibilità al rischio idraulico.

Suscettibilità 1		
P3	117	10,74%
P2	326	29,94%
P1	659	60,51%
Punti totali	1089	100,00%

Tabella 5: numero dei tronchi stradali appartenenti alla classe di suscettibilità 1 appartenenti alle classi di pericolosità al rischio alluvione PAI.

Suscettibilità 2		
P3	71	3,84%
P2	419	22,64%
P1	725	39,17%
Punti totali	1851	100,00%

Tabella 6: numero dei tronchi stradali appartenenti alla classe di suscettibilità 2 appartenenti alle classi di pericolosità al rischio alluvione PAI.

Nelle tabelle 5 e 6 si nota qual è la distribuzione dei suddetti tronchi nelle tre classi di pericolosità osservando che la percentuale più alta si trova nella classe P1, quella di scenario raro.

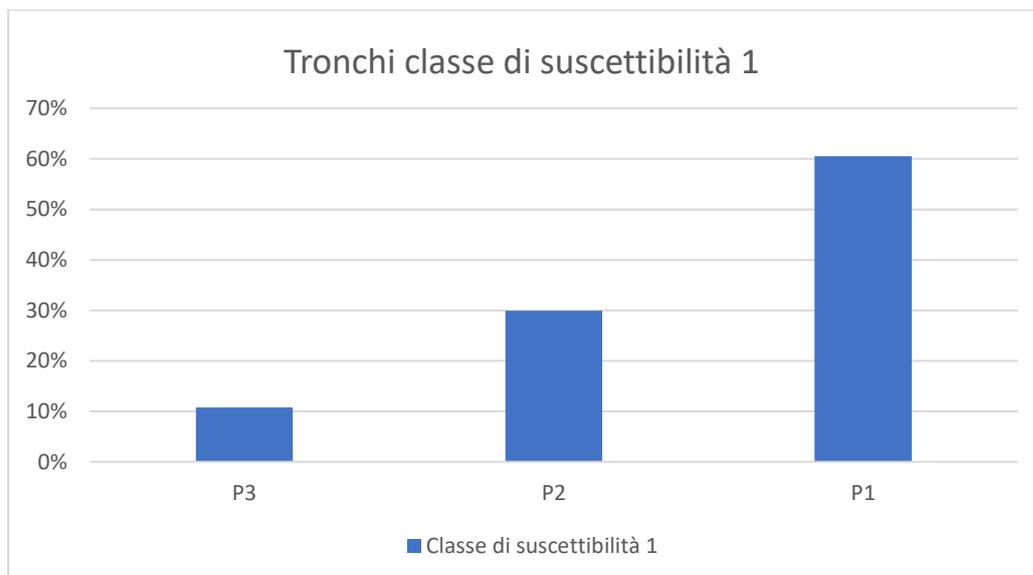


Figura 21: Distribuzione di probabilità dei tronchi stradali classificati in classe di suscettibilità 1 suddivisi in classi di pericolosità PAI.

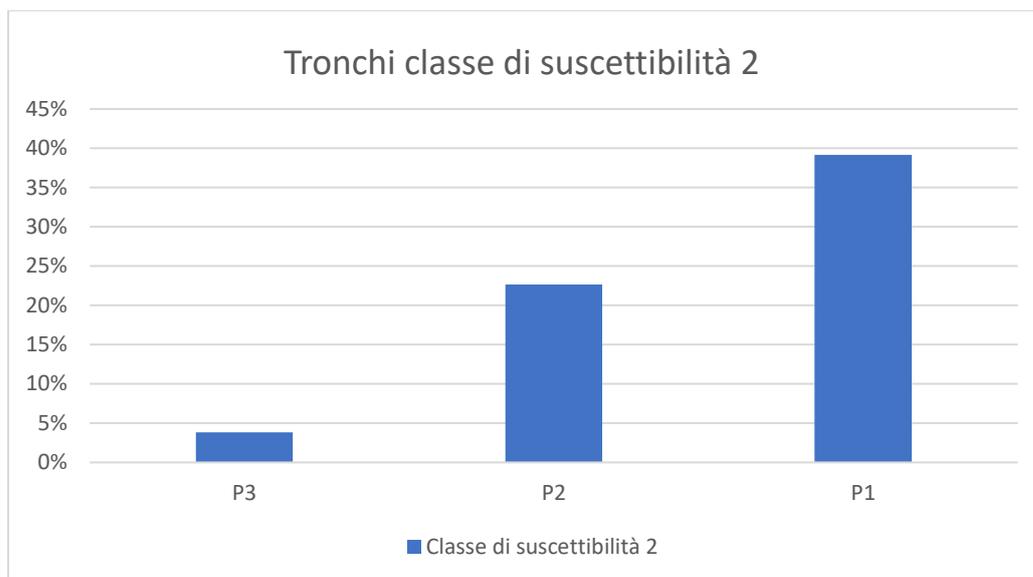


Figura 22: Distribuzione di probabilità dei tronchi stradali classificati in classe di suscettibilità 1 suddivisi in classi di pericolosità PAI.

I tronchi di suscettibilità appartenenti alle classi 1 e 2 sono in totale 2940 elementi, di questi elementi 1628 pari al 56% sono classificati come elementi a rischio da parte dell'autorità di Bacino del Po.

Alla base di questi risultati si attesta che il riscontro presente con le mappe di pericolosità non è totale ma più del 50% degli elementi risulta essere un fattore a rischio.

## 5. Analisi delle piogge ed incidentalità

Nel seguente capitolo si analizza la correlazione esistente tra incidenti stradali e intensità di pioggia. Sul fondamento di un database di incidenti avvenuti nel 2017 lungo le strade della Città Metropolitana di Torino i dati contenuti sono stati confrontati con un Database di immagini .tiff includenti informazioni riguardo l'intensità di precipitazione espressa in mm/h. L'obiettivo di questa analisi è quello di valutare la correlazione tra intensità di pioggia ed incidenti associando alcuni parametri intrinseci dell'infrastruttura che in caso di suolo bagnato potrebbero influenzare la stabilità del veicolo.

### 5.1. Metodologia ed analisi.

Mediante il Database di incidenti avvenuti nel 2017 lungo le strade provinciali di Torino, contenente:

- Data;
- Ora;
- Coordinate;
- Condizione Meteo;
- Condizioni del suolo;

è possibile, innanzitutto, andare ad individuare il punto esatto di dove è avvenuto, successivamente vengono isolati gli incidenti avvenuti in condizioni metereologiche di pioggia e quelli avvenuti in condizione di suolo bagnato.

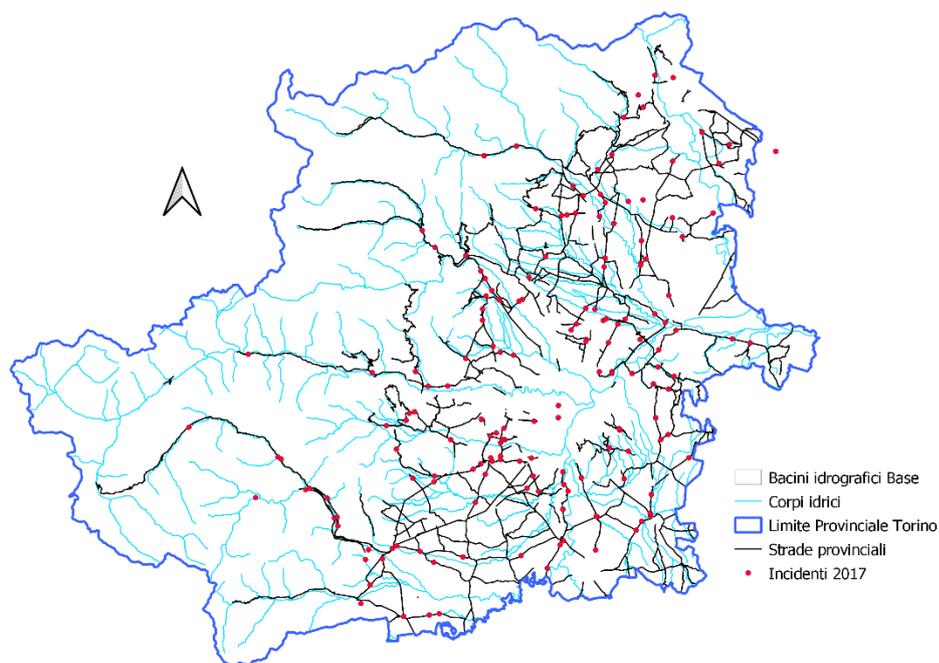


Figura 23: localizzazione incidenti avvenuti nel 2017 in condizione di pioggia ed in condizione di suolo bagnato.

	Numero Totale
<b>Condizione di Pioggia</b>	56
<b>Condizione di suolo bagnato</b>	123
<b>Totale</b>	179

Tabella 7: riepilogo del numero di incidenti analizzati durante la fase di localizzazione in ambiente GIS.

Dopo aver individuato il punto esatto dell'incidente, attraverso le immagini .tiff georeferenziate, si può attribuire ad ogni incidente i valori di intensità di precipitazione all'atto dell'accaduto e lo stesso valore durante le due ore precedenti.

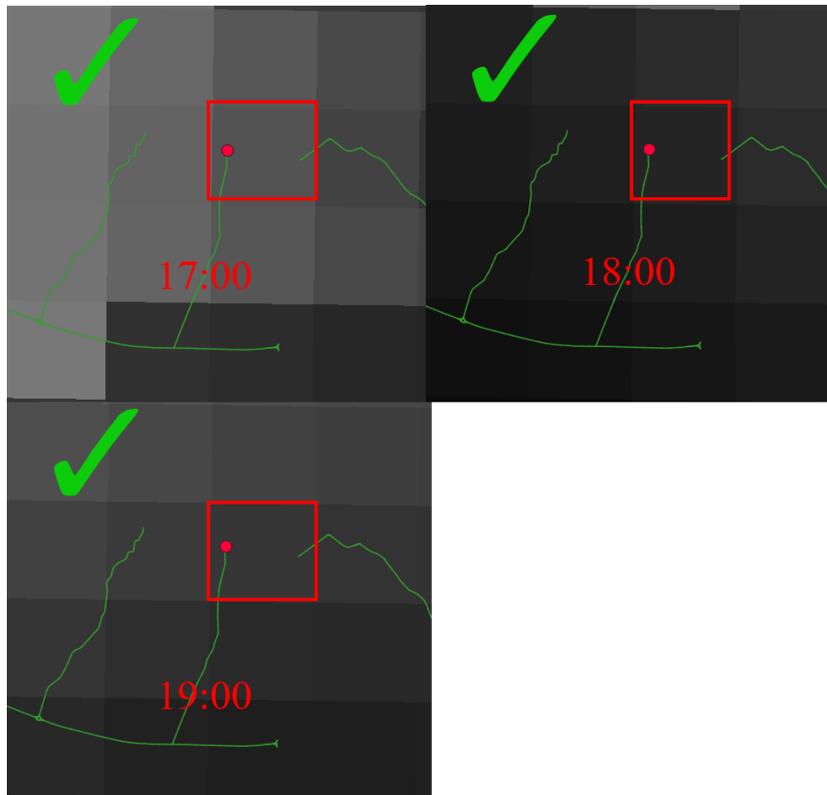


Figura 24: attribuzione dati di precipitazione, in ambiente GIS ad un incidente avvenuto alle ore 19:00.

Al termine di questo processo di attribuzione gli incidenti analizzati nella fase precedente vengono scorporati da quelli che non avevano nessuna corrispondenza di pioggia, questa mancanza è dovuta al fatto che il database di incidenti viene compilato da agenti di Polizia non al momento esatto dell'incidente ma in un secondo momento per questo motivo si basa esclusivamente su previsioni metereologiche e non su dati di fatto reali.

Il dataset finale, terminate le due fasi di localizzazione ed attribuzione, risulta composto da 33 incidenti cioè circa il 20% dei 179 totali acquisiti in fase di localizzazione.

	Numero Totale
<b>Condizione di Pioggia</b>	12
<b>Condizione di suolo bagnato</b>	21
<b>Totale</b>	33

Tabella 8: riepilogo del numero di incidenti avvenuti in condizioni metereologiche di pioggia sottoposti ad analisi.

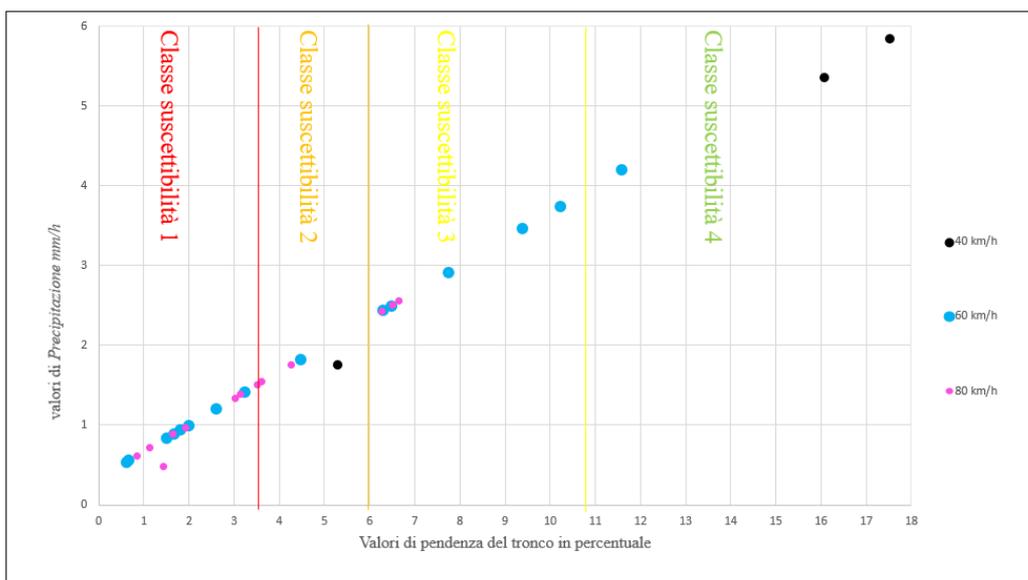
Alla base di questi risultati si afferma che gli incidenti che avvengono in condizione meteorologica di pioggia rappresentano solo una bassa percentuale rispetto al numero totale di incidenti avvenuti nel 2017, infatti si nota che su un totale di 840 sinistri stradali solo il 4% è avvenuto a seguito di un evento di pioggia.

A questo punto si procede a valutare la correlazione esistente tra l'incidentalità, i dati di precipitazione e la pendenza del tronco stradale valutata al paragrafo 4.2.2.

I risultati esposti in figura 25 suddividono i tronchi incidentati in 3 classi di velocità differenti:

- I punti in nero rappresentano i tronchi stradali con velocità di percorrenza media fino a 40 km/h;
- I punti in blu raffigurano i tronchi stradali con velocità di percorrenza media compresa tra 40 km/h e 60 km/h;
- I punti in rosa espongono i tronchi stradali con velocità di percorrenza media compresa tra 60 km/h e 80 km/h.

L'informazione relativa alla velocità viene ricavata dallo shapefile del grafo stradale utilizzato già nei paragrafi precedenti ed è stato considerato il valore di velocità media di percorrenza da parte dell'utenza. In figura 25 inoltre si osservano tre linee verticali che illustrano i valori di pendenza corrispondenti ai valori di soglia utilizzati al paragrafo 4.3 per la classificazione dei tronchi stradali in classi di suscettibilità al rischio idraulico.



**Figura 25:** rappresentazione dei tronchi stradali incidentati in funzione della pendenza del tronco e del valore in mm/h di precipitazione. I punti in nero rappresentano gli elementi con una velocità di percorrenza inferiore a 40 km/h, i punti in blu rappresentano quelli con una velocità di percorrenza media compresa tra 40km/h e 60 km/h ed infine i punti in rosa rappresentano gli elementi con velocità compresa tra 60 km/h e 80 km/h.

La stabilità di un veicolo subisce una forte influenza da parte della pendenza del tronco stradale in presenza di pavimentazione bagnata o sommersa; quando un veicolo su strada viene investito da una corrente d'acqua quest'ultimo può perdere stabilità e a parità di acqua e velocità della corrente ove la pendenza è elevata, maggiore sarà l'instabilità del veicolo. Rimanendo fermi sui risultati ottenuti da questa analisi la maggior parte degli incidenti è collocato in una classe di suscettibilità alta ovvero con pendenze del tronco basso e in una classe di intensità di precipitazione bassa; in questo caso pertanto dichiariamo che né la pendenza e tantomeno la condizione di pioggia abbiano influenzato questi incidenti.

## 6. Conclusioni

Il tema dell'affidabilità e della vulnerabilità delle infrastrutture stradali in condizioni di emergenza ha acquisito negli ultimi decenni un'importanza sempre maggiore. Le metodologie per la previsione del rischio proposte in letteratura però sono varie e spesso legate a un livello di conoscenza della rete difficilmente ottenibile. Molti degli indici topologici per la valutazione della vulnerabilità, ad esempio, hanno alla base l'enumerazione di tutti gli itinerari che collegano le coppie OD della rete in esame, problema questo difficilmente affrontabile, se non in reti di piccole dimensioni, ben diverse da quelle che si incontrano nei più frequenti casi di studio. In questa tesi invece è stata proposta una metodologia che ha il vantaggio di basarsi su tecniche di analisi convenzionali e risulta pertanto applicabile a reti reali. Il lavoro è stato sviluppato per fasi: in una parte si è introdotto il problema del rischio di incidentalità di tratti stradali attraverso l'analisi di dati accertati, mentre nella rimanente parte si è introdotta una metodologia e se ne è presentata una applicazione a un caso di studio reale in ogni caso la metodologia proposta ha fornito risultati soddisfacenti. L'analisi della suscettibilità al rischio idraulico delle infrastrutture stradali ha messo in evidenza che il modello proposto da E. Gaume, P-A. Versini ed H. Andrieu è solido per quanto riguarda la classificazione degli attraversamenti, in relazione all'efficienza di discriminazione delle soglie e per quanto concerne il confronto con le aree a pericolosità idraulica elevata. I dati finali hanno rimarcato che, nonostante le approssimazioni relative alle diverse condizioni morfologiche e idrogeologiche, nonché costruttive delle infrastrutture stradali e considerato che gli indici di normalizzazione e le relative soglie non sono proporzionali al range di valori assunti per ciascun parametro all'interno dell'area, è possibile comunque applicare una valutazione di tipo discriminatorio anche in assenza di dati relativi ad eventi alluvionali. Ponendo in primo piano invece il confronto tra suscettibilità e incidentalità, il modello ha portato alla luce elementi sulla base dei quali effettivamente si può affermare che la classificazione dei parametri di suscettibilità idraulica è correlata con le caratteristiche dei tronchi stradali incidentati in quanto la maggior parte degli elementi coinvolti in almeno un incidente è caratterizzato da valori coerenti con una suscettibilità idraulica elevata.

## 7. Bibliografia

- [1] Istituto Nazionale di Statistica, *Statistiche sull'incidentalità nei trasporti stradali*, Programmazione strategica 2019.
- [2] Alan W. Black and Gabriele Villarini (2016): *Effects of Rainfall on Vehicle Crashes in Six U.S. States*
- [3] D. Hambly, B. Mills, and S. Afrin, 2013: *Insights into driver adaptation to inclement weather in Canada*. J. Transp. Geogr., 28, 192-203
- [4] Eisenberg, D., 2004: The mixed effect of precipitation on traffic crashes. *Accid. Anal. Prev.*, 36, 637-647.
- [5] Provincia di Torino: *Assetto geologico e geomorfologico della Provincia di Torino* (2011)
- [8] J. HUSDAL, «2nd International Symposium on Transportation Network Reliability,» in *Reliability and vulnerability versus cost and benefits* - p. 180-186, Queeston and Christchurch, New Zealand, 2004.
- [6] Provincia di Torino: *Risorse idriche superficiali dei principali Bacini della Provincia di Torino* (2001)
- [7] A. D'ANDREA, A. CONDORELLI, G. BIONDI, S. CAFISO, «Metodologie di valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture viarie,» World road association, 2006.
- [9] Distretto del fiume Po: *Aggiornamento e revisione delle mappe di pericolosità e del rischio di alluvione* (2010).
- [10] Chiarini C., *Valutazione della suscettibilità al rischio idraulico di infrastrutture Viarie dell'entroterra Toscano*, Marzo 2020.

