

POLITECNICO DI MILANO

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



Analisi di suscettività da incendio boschivo: un caso di studio in area transfrontaliera

Relatore: Prof. Giovanni Menduni

Correlatore: Prof. Daniele Fabrizio Bignami

Tesi di laurea di:

Chiara Fasciani

Matr. 897821

Marta Mastroieni

Matr. 905752

Anno Accademico 2019/2020

Ringraziamenti

Un sincero ringraziamento è rivolto al prof. Giovanni Menduni per la sua disponibilità, il suo supporto e i suggerimenti che hanno consentito lo sviluppo e la stesura di questo lavoro di tesi. Ci ha ricordato il valore e le potenzialità del lavoro di squadra, grazie alla collaborazione con il prof. Daniele Bignami, co-relatore di questo elaborato, Federica, Ilaria, Manuel e Michele.

La nostra gratitudine viene estesa anche alla Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI), partner del progetto Gestisco, ed ERSAF (Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste) per averci fornito il materiale ticinese e lombardo riguardante gli incendi boschivi. Grazie alle loro risposte tempestive e alle loro indicazioni è stato possibile procedere allo svolgimento della nostra tesi.

Ai nostri amici e compagni di università è volto un ulteriore ringraziamento. A partire da Francesca, sempre presente, sin dal primo giorno: se non fosse stata lei a rompere il ghiaccio tra di noi probabilmente questa amicizia non sarebbe mai nata. A Irene, la persona che è la vera scoperta di questo percorso: con i nostri tempi abbiamo consolidato un'amicizia rara, siamo come *three peas in pod*. A Nikolas, con cui è nata una simpatia a prima vista, amico paziente che sopporta e supporta tutte noi quattro. E infine grazie agli amici che si sono rivelati una costante durante gli anni di magistrale: Alessandro, Chiara, Luca e Mara e tutti gli altri (non ce ne vogliate se non vi citiamo uno per uno).

Chiara e Marta

Un primo ringraziamento va ai miei genitori, Valentina e Valerio, e a mio fratello Stefano, che in questi anni di università sono stati un'incredibile fonte di supporto nonostante la distanza. Grazie per essere stati sempre dalla mia parte e per aver creduto incondizionatamente in me. Colgo l'occasione per ringraziare tutte le persone che hanno condiviso con me questo percorso, facendomi sentire a casa anche in una città per me nuova. Ringrazio i miei amici, coinquilini e compagni di quarantena Flavio, Domenico e in particolare Agostina, che in questi anni milanesi è stata per me come una sorella.

Grazie ad Alessia, amica da una vita, che con le sue risate e parole è sempre stata in grado di bilanciare la mia esagerata serietà.

Un ulteriore ringraziamento va a Sebastiano, che negli ultimi anni ha pazientemente ascoltato ogni mia singola paranoia. Il suo sostegno e la sua presenza sono stati fondamentali.

Un profondo ringraziamento va a Marta: non c'è esame, appunto o evidenziatore che non abbiamo condiviso in questo percorso. Non avrei potuto sperare in una migliore compagna di università, di tesi e amica.

Chiara

Grazie ai miei genitori, Marina e Orazio, che più di tutti hanno contribuito, economicamente e moralmente, affinché raggiungessi questo importante traguardo. Grazie per avermi sempre sostenuto e supportato nelle mie scelte; mi avete trasmesso il coraggio di affrontare quegli ostacoli che mi sembravano insormontabili, credendo in me. Spero siate fieri di me.

Grazie a mia sorella Miriam, sei stata e sei tuttora il mio esempio da seguire. Grazie per tutto quello che hai fatto per me. Grazie a mio cognato Giovanni, per le tue premure. Sono felice che fai parte della nostra famiglia.

Grazie a tutti quelli che sono stati al mio fianco e mi hanno sempre incoraggiata con affetto, dai miei zii e cugini alle persone che mi hanno visto nascere, in particolare Rosella e Alberto.

Grazie alle mie amicizie, vicine e lontane, coltivate negli anni: grazie per il vostro sostegno e per aver animato la mia vita, ormai diventata color “blu Politecnico”.

Infine, ultima non per importanza, grazie a Chiara, co-autrice di questa tesi e compagna di studio insostituibile. Solo noi sappiamo cosa abbiamo condiviso negli ultimi anni, dalle gioie che questo percorso ci ha riservato ai momenti più difficili e stressanti, superati l'una con il supporto dell'altra.

Marta

Sommario

Il lavoro riguarda la gestione delle calamità naturali nel contesto transfrontaliero del Ticino italo-svizzero. I territori di confine sono generalmente soggetti ad una organizzazione non sempre integrata delle risorse in caso di emergenza: nasce, quindi, la proposta di individuare strumenti interpretativi comuni a supporto delle decisioni. Si propone l'applicazione di una analisi di suscettività da incendio boschivo al fine di ottenere una carta tematica comune ai due stati e in grado di individuare così le aree più o meno predisposte all'innescò e alla propagazione ai fini della pianificazione di protezione civile. Si tratta di un metodo che considera le relazioni tra i dati di eventi storici ed un certo numero di fattori predisponenti e determinanti. Attraverso l'implementazione di un modello statistico di letteratura, la tesi propone appunto la mappa di suscettività. Si sono scelte fonti di dati per quanto possibile indipendenti dai due Stati, notoriamente non omogenei in termini di direttive sul dato geografico. In ogni caso è bene ricordare che, per questa classe di fenomeni, la componente antropica ha un notevole impatto in termini di innescò degli incendi: si tratta di uno dei possibili limiti del metodo utilizzato, la cui modellazione può costituire una delle più promettenti linee di sviluppo.

Abstract

The thesis concerns the natural disasters management in the cross-border context of the Italian-Swiss Ticino. Border territories are generally subject to a not always integrated resources organization in case of emergency: hence, the proposal of identifying common interpretative tools to support decisions. This work proposes the application of a forest fires susceptibility analysis, in order to obtain a thematic map common to both States, which is able to identify areas more or less predisposed to ignition and propagation for civil protection planning purposes. This method considers relations between historical events data and a certain number of predisposing and determining drivers. Indeed, through the implementation of a literature statistical model, the thesis suggests the susceptibility map. This thesis uses data sources as much as possible independent from the two States, since they are notoriously not-homogeneous in terms of guidelines about geographic data. In any case it is important to remember that, for this class of phenomena, the anthropic component has a remarkable impact in terms of fires ignition: this is one of the possible limits of the applied method, which modeling can represent one of the most promising development lines.

Indice dei contenuti

Indice delle figure.....	11
Indice delle tabelle	17
1. Introduzione	19
2. Obiettivo della tesi	21
3. Il rischio incendio e la sua gestione	23
3.1 Fenomenologia dell'evento	23
3.2 Metodi di mappatura	26
3.3 La gestione del rischio incendio.....	28
3.3.1 Brevi considerazioni sull'ordinamento italiano e svizzero in materia di incendi boschivi	28
3.3.2 Lombardia	30
3.3.3 Canton Ticino.....	34
4. Un modello di suscettività per gli incendi boschivi	41
4.1 L'analisi di suscettività.....	41
4.1.1 Stato dell'arte sulla suscettività da incendio boschivo: aree di interesse, fattori di influenza e modelli applicativi	42
4.2 Caso di studio	45
4.3 Dati a disposizione	47
4.3.1 Dati storici degli incendi	47
4.3.2 Dati morfologici	54
4.3.3 Dati di copertura del suolo	61
4.3.4 Grafo stradale	71
4.4 Motore statistico.....	87
4.5 Implementazione del modello	89
4.5.1 Analisi di correlazione	89

4.5.2 Fase di calibrazione e produzione della mappa di suscettività.....	90
4.5.3 Fase di validazione	100
5. Discussione dei risultati	103
5.1 Confronto con la mappatura esistente	113
6. Conclusioni e Sviluppi futuri	115
Bibliografia e Sitografia	119

Indice delle figure

Figura 1: Tipologie di incendio a) sotterraneo, b) radente, c) di chioma.....	24
Figura 2: Rappresentazione delle parti di un fronte di fiamma.....	25
Figura 3: Classe di rischio incendi boschivi per i comuni della regione Lombardia (Regione Lombardia, 2020).....	27
Figura 4: Mappe di rischio incendio invernale (a sinistra) ed estivo (a destra) per il Cantone Ticino (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016).....	28
Figura 5: Numero degli incendi per anno tra il 1975 e il 2018 (Regione Lombardia, 2020)...	32
Figura 6: Superficie annua percorsa da incendi per il decennio 2009-2018 (Regione Lombardia, 2020).....	32
Figura 7: Superficie media degli incendi per anno in ettari (Regione Lombardia, 2020).....	33
Figura 8: Frequenze medie mensili (Regione Lombardia, 2020).....	33
Figura 9: Frequenza degli incendi per causa per il decennio 2009-2018 (Regione Lombardia, 2020).....	34
Figura 10: Incidenza delle cause sulla superficie percorsa da incendi per il decennio 2009-2018 (Regione Lombardia, 2020)	34
Figura 11: Andamento della frequenza annuale degli incendi boschivi registrati nel Canton Ticino per il periodo 1900-2003 (Conedera & Pezzatti, 2005).....	35
Figura 12: Andamento della superficie annuale bruciata [ha] negli incendi boschivi in Canton Ticino per il periodo 1900-2003 (Conedera & Pezzatti, 2005).....	36
Figura 13: Numero di incendi boschivi mensili registrati nei singoli comprensori dei centri di soccorso ticinesi (a sinistra) e superficie bruciata [ha] (a destra mensilmente) in ogni centro di soccorso nei periodi 1970-1990 e 1991-2013 (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016)	38
Figura 14: Rappresentazione delle principali cause di incendi boschivi registrati nel Cantoni Ticino per i periodi 1970-1990 e 1991-2013 (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016)	39
Figura 15: Rappresentazione dell'area di studio.....	46

Figura 16: Rappresentazione degli incendi boschivi registrati nell'area di studio per decennio 2009-2018.....	49
Figura 17: Andamento annuale del numero di incendi boschivi registrati nel periodo 2009-2018 nella porzione lombarda (in verde) e ticinese (in rosso) dell'area di studio.....	51
Figura 18: Andamento annuale delle aree percorse dal fuoco relativo al periodo 2009-2018 nella porzione lombarda (in verde) e ticinese (in rosso) dell'area di studio.....	51
Figura 19: Distribuzione mensile del numero di incendi boschivi registrati nel periodo 2009-2018 nella porzione lombarda (in verde) e ticinese (in rosso) dell'area di studio.....	53
Figura 20: Andamento mensile dell'area percorsa dal fuoco relativo al periodo 2009-2018 nella porzione lombarda (in verde) e ticinese (in rosso) dell'area di studio.....	53
Figura 21: Rappresentazione del modello digitale del terreno (DTM) dell'area di studio.....	56
Figura 22: Percentuali riferite ai pixel presenti sul territorio e per le aree bruciate per classe di quota.....	57
Figura 23: Percentuali riferite ai pixel presenti sul territorio e per le aree bruciate per classe di pendenza.....	58
Figura 24: Rappresentazione del fattore predisponente di pendenza (Slope) dell'area di studio.....	59
Figura 25: Rappresentazione del fattore predisponente di esposizione (Aspect) dell'area di studio.....	60
Figura 26: Percentuali riferite ai pixel presenti sul territorio e per le aree bruciate per classe di esposizione.....	61
Figura 27: Rappresentazione delle classi di copertura del suolo (Corine Land Cover 2018) dell'area di studio.....	65
Figura 28: Percentuale dei pixel bruciati sul territorio per classe di copertura del suolo (Corine Land Cover 2018) dell'area di studio.....	66
Figura 29: Rappresentazione percentuale degli incendi del periodo invernale (dal 1/10 al 31/3).....	67
Figura 30: Rappresentazione percentuale degli incendi del periodo estivo (1/4 al 30/9).....	67

Figura 31: Distribuzione delle zone boscate al variare della quota per l'area di studio e le superfici bruciate: bosco di latifoglie (a sinistra), bosco di conifere (al centro), bosco misto (a destra)	69
Figura 32: Distribuzione delle zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea al variare della quota per l'area di studio e le superfici bruciate: pascoli naturali e praterie (a sinistra), brughiere e cespuglieti (al centro), vegetazione in evoluzione (a destra)	70
Figura 33: Distribuzione delle zone aperte con vegetazione rada o assente al variare della quota per l'area di studio e per le superfici bruciate: aree a vegetazione rada	71
Figura 34: Grafo stradale per l'area di studio	74
Figura 35: Rappresentazione della distanza euclidea calcolata sull'area di studio per la valutazione della distanza di ciascun pixel dal grafo stradale.....	75
Figura 36: Rappresentazione della distanza euclidea ottenuta per le aree bruciate (BA) nell'area di studio per la valutazione della distanza dal grafo stradale; nel riquadro a destra, un dettaglio eseguito su un incendio	76
Figura 37: Andamento del rapporto tra pixel bruciati e bruciabili nell'area di studio, considerando la distanza del grafo stradale dagli incendi boschivi	77
Figura 38: Rappresentazione della rete stradale formata dai sentieri (a sinistra, in marrone) e dalle strade ad uso agricolo o forestale (a destra, in arancione).....	78
Figura 39: Andamento del rapporto tra pixel bruciabili e bruciati nell'area di studio, considerando la distanza da sentieri e strade agricole o forestali.....	79
Figura 40: Andamento del rapporto tra pixel bruciabili e bruciati nell'area di studio, considerando la distanza dai soli sentieri	79
Figura 41: Andamento del rapporto tra pixel bruciabili e bruciati nell'area di studio, considerando la distanza dalle sole strade agricole o forestali.....	80
Figura 42: Rappresentazione dei punti di innesco registrati per il periodo 2009-2018 nell'area di studio; in grigio è riportata la rete stradale.....	81
Figura 43: Distribuzione cumulata dei punti di innesco all'aumentare della distanza dal grafo stradale totale.....	82
Figura 44: Distribuzione cumulata dei punti di innesco all'aumentare della distanza da sentieri (path) e strade ad uso agricolo o forestale (track)	82

Figura 45: Distribuzione cumulata dei punti di innesco all'aumentare della distanza dai sentieri (path)	83
Figura 46: Distribuzione cumulata dei punti di innesco all'aumentare della distanza dalle strade ad uso agricolo o forestale (track)	83
Figura 47: Rappresentazione dei punti di innesco distinti per causa registrati nel periodo 2009-2018 nell'area di studio	84
Figura 48: Percentuali riferite alle cause di innesco per gli eventi registrati nell'area analizzata per il periodo 2009-2018	85
Figura 49: Percentuale di inneschi registrati nell'area di studio nel periodo 2009-2018 per eventi involontari (in alto in blu) e volontari (in basso in azzurro), valutati rispetto alle classi di distanza dai sentieri	86
Figura 50: Distribuzione cumulata degli inneschi registrati nell'area di studio nel periodo 2009-2018 per eventi involontari (in alto in blu) e volontari (in basso in azzurro), valutata in base alla distanza dai sentieri	86
Figura 51: Matrice di diagrammi a dispersione delle variabili in gioco	90
Figura 52: Pesi ottenuti dal modello WoE per il fattore predisponente dell'elevazione	94
Figura 53: Pesi ottenuti dal modello WoE per il fattore predisponente della pendenza	94
Figura 54: Pesi ottenuti dal modello WoE per il fattore predisponente dell'esposizione	95
Figura 55: Pesi ottenuti dal modello WoE per il fattore predisponente della prossimità alla strada	95
Figura 56: Pesi dal modello WoE per il fattore predisponente della prossimità alla strada aggiornati	95
Figura 57: Pesi ottenuti dal modello WoE per il fattore predisponente della copertura del suolo (CLC 2018)	96
Figura 58: Rappresentazione dell'indice di suscettività per l'area di studio	97
Figura 59: Distribuzione dei pixel bruciati nelle dieci classi di suscettività	98
Figura 60: Distribuzione percentuale dei pixel di calibrazione nelle quattro classi di suscettività	99
Figura 61: Mappa di suscettività su quattro livelli per l'area di studio	99

Figura 62: Distribuzione percentuale nelle quattro classi di suscettività dei pixel dell'area di studio, del dataset di calibrazione e di validazione	101
Figura 63: Distribuzione percentuale dei pixel dell'area di studio nelle quattro classi di suscettività.....	103
Figura 64: Distribuzione degli incendi boschivi per il decennio 2009-2018 sulla mappa di suscettività.....	104
Figura 65: Esempio di un incendio boschivo in area classificata ad alto livello di suscettività	105
Figura 66: Incendio di Peglio (CO): dettaglio della quota (a), pendenza (b), esposizione (c), Corine Land Cover 2018 (d), punto di innesco e sentieri (e), suscettività (f).....	106
Figura 67: Esempio di un incendio boschivo in area classificata a basso livello di suscettività	108
Figura 68: Incendio nel territorio di Lugano (quartiere Barbengo): dettaglio della quota (a), pendenza (b), esposizione (c), Corine Land Cover 2018 (d), punto di innesco e sentieri (e), suscettività (f).....	109
Figura 69: Esempio di un incendio boschivo transfrontaliero	111
Figura 70: Dettaglio del territorio interessato dall'incendio transfrontaliero	112
Figura 71: Dettaglio della mappa di suscettività per l'incendio boschivo transfrontaliero	112
Figura 72: Mappa di suscettività prodotta per l'area di studio	113
Figura 73:Carta di rischio incendio boschivo della regione Lombardia - zoom sulla porzione italiana dell'area di studio (Regione Lombardia, 2020)	114
Figura 74: Carta di rischio incendio invernale (a sinistra) ed estivo (a destra) per il Canton Ticino – zoom sulla porzione svizzera dell’area di studio (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016)	114

Indice delle tabelle

Tabella 1: Numero di incendi boschivi registrati nell'area di studio nel decennio 2009-2018	50
Tabella 2: Numero di incendi boschivi registrati annualmente e relativa area bruciata rilevati nel territorio di progetto nel decennio 2009-2018.....	50
Tabella 3: Distribuzione mensile del numero di incendi boschivi e della relativa area bruciata rilevati nell'area di studio nel decennio 2009-2018.....	52
Tabella 4: Percentuali di pixel per ciascuna classe di quota sul territorio in esame e sulle aree bruciate	56
Tabella 5: Percentuali di pixel per ciascuna classe di pendenza sul territorio in esame e sulle aree bruciate	58
Tabella 6: Percentuali di pixel per ciascuna classe di esposizione sul territorio in esame e sulle aree bruciate	61
Tabella 7: Codici utilizzati per descrivere la copertura del suolo (Corine Land Cover 2018)	63
Tabella 8: Percentuale di esistenza sul territorio in esame delle classi di copertura del suolo (CLC 2018)	64
Tabella 9: Memorandum della descrizione delle classi di copertura del suolo della terza categoria	68
Tabella 10: Tag definiti dallo standard di OpenStreetMap considerati per l'analisi di prossimità degli incendi boschivi alla rete stradale	73
Tabella 11; Risultati ottenuti dalla distanza euclidea calcolata sulla totalità del grafo stradale	76
Tabella 12: Risultati ottenuti dalla distanza euclidea calcolata su sentieri e strade ad uso agricolo o forestale (a), solo sentieri (b), solo strade ad uso agricolo o forestale (c).....	78
Tabella 13: Distribuzione dei punti di innesco rispetto alla massima estensione del grafo stradale, alla rete formata da sentieri e strade ad uso agricolo o forestale, ai soli sentieri ed alle sole strade ad uso agricolo o forestale.....	82
Tabella 14: Cause di innesco per gli eventi registrati nell'area analizzata per il periodo 2009-2018.....	85
Tabella 15: Matrice di correlazione dei fattori predisponenti e determinanti	90

Tabella 16: Pesi delle classi per fattore predisponente ottenuti con il modello WoE.....	91
Tabella 17: Suddivisione in dieci intervalli.....	98

1. Introduzione

I rischi naturali comprendono tutti quei processi che, per l'irregolarità e le dimensioni delle loro manifestazioni, minacciano le attività dell'uomo, nonché la sua esistenza, limitando la fruizione delle risorse ambientali a causa di azioni negative sui sistemi ecologici (Magnani, et al., 2005/2006). A questa categoria appartengono i rischi legati a fattori geologici, risorse idriche, clima e fuoco.

Gli incendi boschivi sono una delle principali fonti di disturbo del territorio, in grado di procurare danni all'ambiente, all'economia ed alla salute (Oulad Sayad, Mousannif, & Al Moatassime, 2019) (Pourtaghi, Pourghasemi, Aretano, & Semeraro, 2016).

Gli effetti più evidenti dovuti al passaggio del fuoco si riscontrano nell'eliminazione della biomassa, la messa a nudo del suolo e la formazione di uno strato di cenere. Queste ultime generano cambiamenti nelle proprietà del suolo, soprattutto in termini di regime idraulico superficiale e di erosione del terreno dovuti all'azione delle acque meteoriche. Inoltre, un incendio boschivo determina delle variazioni nella vegetazione erbacea e/o arbustiva e negli habitat a disposizione della fauna (Moretti & Conedera, 2005). A questi aspetti si aggiunge l'emissione in atmosfera di anidride carbonica e il legame causa-effetto con i cambiamenti climatici.

La gestione dei rischi naturali costituisce una delle principali attività strategiche per la protezione civile, attraverso le azioni di previsione, prevenzione e lotta attiva ai fenomeni naturali. La costruzione di un quadro conoscitivo completo e integrato del territorio e delle calamità a cui è esposto è fondamentale per la pianificazione del territorio, tramite la produzione di carte tematiche che ne mostrino le criticità. Questo si rivela un ottimo strumento di supporto nell'attuazione di procedure di intervento, garantendone la tempestività e l'organizzazione ottimale delle risorse sul territorio.

Ogni Paese segue la propria metodologia di analisi e rappresentazione cartografica per produrre le mappe tematiche. Queste sono disparate e variano da rischio a rischio: diverse in generale nella scala, nelle legende, nel tipo di sfondo e quant'altro. D'altra parte, questa modalità può generare delle criticità nei territori in cui il confine è politico e non fisico, come accade per il caso transfrontaliero italo-svizzero.

Queste difformità possono essere superate attraverso due validi percorsi di intervento. La prima opzione consiste nella "unificazione delle legende": attraverso una analisi dettagliata dei

rispettivi processi di origine dell'informazione, si abbinano le carte avendo cura di trovare una adeguata equivalenza delle classi.

La seconda alternativa è quella che prevede l'utilizzo di una cartografia transfrontaliera "nativa", cioè pensata, progettata ed eseguita per essere usata da ambedue le comunità. La questione diventa più complessa quando si trattano Paesi come l'Italia e la Svizzera, considerando che non appartengono entrambi alla Comunità Europea. Quest'ultima, infatti, impartisce direttive che omogeneizzano i modi di presentare le mappe, la raccolta e la gestione dei dati di base a supporto delle elaborazioni.

Al fine di superare i limiti posti dalla diversa organizzazione in caso di eventi calamitosi, vengono proposti programmi di cooperazione interregionale come il progetto "GESTI.S.CO", nato per rafforzare la Governance Transfrontaliera tra l'Italia e la Svizzera. Il nome stesso esplica molto bene i suoi propositi: "GESTI.S.CO" infatti è l'acronimo di "GESTione e coordinamento delle emergenze e delle catastrofi senza Confini". Il progetto Gestisco si fonda sull'idea che le istituzioni dei due territori coinvolti debbano avere una gestione e un coordinamento integrati per fronteggiare emergenze e catastrofi, come se i confini politici non esistessero. Le organizzazioni, ad oggi differenti, le informazioni disomogenee e non sempre condivise, le procedure di intervento indipendenti e gli strumenti non integrati devono essere superati attraverso collaborazioni e azioni di governance per predisporre una rete di conoscenze su cui fondare supporto e mutuo soccorso tra le istituzioni in caso di emergenza. Questo permette di trasferire regole, risorse e azioni formative agli enti locali e ai cittadini, in quanto primi operatori di protezione civile.

2. Obiettivo della tesi

L'obiettivo di questo progetto di tesi consiste nello sviluppo di una mappa di suscettività da incendio boschivo, come strumento di supporto alle istituzioni nella fase di pianificazione del territorio e di gestione dell'emergenza.

La mappatura della suscettività da incendio boschivo nasce con l'obiettivo di indicare le porzioni del territorio nelle quali la propensione al fuoco è maggiore o minore. Una procedura di questo tipo consente di eseguire un'analisi di prima approssimazione, utile in termini di rapidità di risposta e di facile impiego.

L'analisi di suscettività prevede l'implementazione di un modello statistico, addestrato sulla base delle relazioni esistenti tra i dati storici disponibili e i fattori predisponenti e determinanti che caratterizzano il territorio per il fenomeno in esame. Questi elementi devono essere in grado di descrivere adeguatamente il contesto di applicazione, rappresentando quegli aspetti che possono facilitare l'innescio e lo sviluppo di un incendio.

Le prime variabili scelte in questa sede sono di tipo geomorfologico, come l'elevazione, la pendenza, l'esposizione e di copertura e uso del suolo. Inoltre, è importante considerare che il fenomeno in esame può avere origine naturale, colposa o dolosa. È fondamentale includere nel modello una variabile associata all'effetto della presenza dell'uomo sul territorio: di conseguenza, si esamina il legame esistente tra gli incendi e la loro distanza dalla rete stradale.

Il progetto di tesi prevede l'applicazione dell'analisi di suscettività in ambito transfrontaliero, nei territori di confine tra le province lombarde di Como e Varese e il Cantone svizzero del Ticino. L'area di studio si inserisce quindi in un contesto in cui i soggetti coinvolti sono sottoposti a normative e organizzazioni differenti che definiscono diverse procedure di intervento in caso di calamità.

I pericoli naturali dei territori transfrontalieri, per la maggior parte dei casi, rimangono confinati, nella loro dinamica, da una parte o dall'altra del confine e i problemi ad essi collegati non risultano avere rilevanza comune. L'area di studio considerata, invece, è interessata da fenomeni naturali che causano effetti su entrambi i territori in quanto questa è separata da un confine amministrativo che non ha significato fisico: il territorio risulta continuo dal punto di vista topografico, morfologico, climatico ed idraulico.

Il lavoro qui presentato consiste nella realizzazione di uno strumento interpretativo comune per i due Paesi dell'area transfrontaliera, proponendo una mappa di suscettività nativa del territorio,

al fine di agevolare le procedure da applicare in caso di calamità, per garantire aiuto reciproco nelle regioni di confine e un'ottimizzazione dell'organizzazione.

In primo luogo, è necessario predisporre un dataset nativo per l'area di studio, attraverso l'unione delle informazioni disponibili per la porzione italiana e svizzera. Questa fase risulta essere particolarmente delicata in quanto i dati originari vengono prelevati da due Paesi diversi, che hanno metodologie di raccolta, gradi di dettaglio e accuratezza differenti.

Per quanto riguarda gli incendi boschivi, gli Stati mettono a disposizione diversi intervalli temporali di registrazione del fenomeno in esame, per cui è necessario effettuare la scelta di un arco temporale comune per studiare il fenomeno in esame. Successivamente, l'inventario realizzato prevede la standardizzazione degli attributi degli incendi storici, quali la data, le cause e le coordinate dei punti di innesco e la loro fusione nello stesso sistema di riferimento. In riferimento ai fattori predisponenti e determinanti per gli incendi boschivi, viene svolta un'analisi della letteratura esistente per la selezione delle variabili influenti nell'area di studio, per cui vengono scelte fonti per quanto possibile indipendenti dai due Stati, al fine di garantire omogeneità del dato.

La fase successiva prevede l'applicazione del modello di suscettività calibrato e validato sulla base dei dati storici a disposizione. Questa procedura richiede la suddivisione in classi delle variabili selezionate, alle quali viene assegnato un peso sulla base della loro influenza sugli incendi attraverso la metodologia proposta dal modello statistico dei pesi dell'evidenza.

In seguito, viene prodotta la mappa di suscettività da incendio boschivo per il territorio in esame definendo quattro livelli di suscettività (trascurabile-basso-medio-alto), attraverso la sovrapposizione dei diversi strati informativi selezionati. Questa tipologia di carta tematica mostra le aree dove la predisposizione al fuoco è maggiore o minore.

In conclusione, si esegue una valutazione critica del risultato ottenuto, evidenziando le potenzialità e i limiti del modello proposto.

3. Il rischio incendio e la sua gestione

3.1 Fenomenologia dell'evento

L'incendio è un fenomeno di combustione che, per innescarsi e alimentarsi nel tempo, ha bisogno di tre elementi fondamentali: il combustibile, il comburente e l'energia di accensione. Nel caso di incendio boschivo il combustibile è costituito dall'insieme dei materiali legnosi che formano (o hanno formato) le piante e gli altri vegetali presenti nell'area di interesse; il comburente è l'ossigeno atmosferico mentre l'energia di accensione è di tipo esterno, generalmente una fiamma (Regione Lombardia, 2017). L'incendio ha inizio con la combustione delle sostanze più leggere e di piccole dimensioni che incrementa l'energia fino a raggiungere la quantità necessaria a bruciare la biomassa di grandi dimensioni (Direzione Regionale Foreste ed Economia Montana - Servizio Antincendio Boschivi, 2009).

Focalizzandosi sul primo fattore indispensabile, il combustibile può essere descritto secondo due caratteri pirologici: l'infiammabilità e la combustibilità. La prima è determinata dalla prontezza a sprigionare le fiamme, mentre la seconda dipende dall'attitudine a sopportare un processo di combustione più o meno veloce e durevole nel tempo. Queste caratteristiche dipendono dai fattori biologici, come la copertura vegetazionale, e da fattori ambientali, quali le condizioni meteorologiche e geomorfologiche dell'area di studio (Regione Lombardia, 2017).

Gli incendi boschivi sono caratterizzati da diversi stadi di sviluppo, ben riconoscibili, che segnano la loro evoluzione nel tempo. Nella fase iniziale, il combustibile si riscalda e subisce un processo di perdita della componente volatile (pirolisi) e d'acqua (disidratazione), fino a quando la temperatura o il contenuto energetico dei gas che si sviluppano è sufficiente a innescare l'accensione. La reazione è di tipo esotermico, cioè una trasformazione che implica il trasferimento di calore dal sistema all'ambiente. Le particelle di combustibile possono bruciare lentamente (senza fiamma) o con combustione viva ma nella fase di accensione si assume che avvenga un processo autosostenibile senza fiamma. A seguire si sviluppa la fase di crescita iniziale, la quale corrisponde al passaggio dalla combustione lenta senza fiamma ad una combustione con fiamma. Segue poi una fase di crescita secondaria, in cui la reazione di combustione si evolve passando dal materiale di superficie a quello di chioma (Regione Lombardia, 2017).

Sulla base dello strato vegetale coinvolto nel processo di combustione è possibile distinguere diverse tipologie di incendio: fuoco sotterraneo, radente, di chioma o di barriera (in cui un incendio radente e di chioma formano un unico fronte di fiamma) (Figura 1). Analizzandoli singolarmente è possibile descriverli come segue:

- fuoco sotterraneo: sviluppo senza fiamma nello strato organico al di sotto delle foglie cadute a terra, penetrando qualche centimetro sottoterra e avanzando intaccando le radici degli alberi;
- fuoco radente (o di superficie): fiamma bassa che, avanzando lentamente, brucia lo strato superficiale formato da residui vegetali non decomposti, strati erbacei e arbustivi;
- fuoco di chioma: fiamme alte che interessano la chioma, bruciandola velocemente. Può essere un proseguo di un incendio radente con il passaggio della fiamma dal terreno alla chioma oppure è indipendente.

L'evoluzione del fuoco può avvenire con diverse modalità: può perdere energia fino ad estinguersi, oppure decadere e propagarsi come fuoco radente con un fronte di fiamma, oppure ancora può propagarsi come fuoco sotterraneo fino ad estinguersi nello stadio finale. Il processo descritto non è chiuso, infatti un fuoco sotterraneo in decadimento può crescere e diffondersi nuovamente con una combustione viva o evolvere nella fase di crescita secondaria e svilupparsi come incendio di chioma.

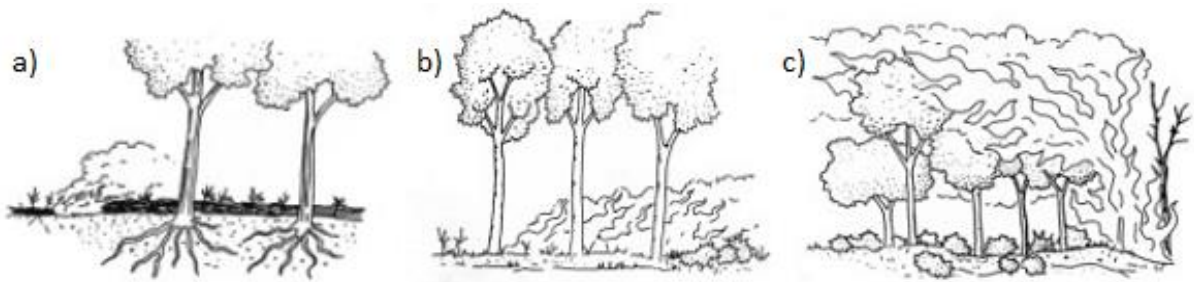


Figura 1: Tipologie di incendio a) sotterraneo, b) radente, c) di chioma

È inoltre necessario considerare la possibilità di evoluzione tra le diverse tipologie elencate e i diversi danni che possono causare al sistema bosco. Durante le fasi temporali di un incendio boschivo, è possibile distinguere differenti parti nell'ambito spaziale da esso coinvolto: il fronte di fiamma si modifica nello spazio, assumendo diverse configurazioni a seconda dei fattori di propagazione (Figura 2). Negli istanti iniziali la combustione si propaga in tutte le direzioni, a causa delle disomogeneità del territorio, a cui succede una fase di formazione della testa del fronte. Essa avanza più velocemente all'aumentare dell'intensità del vento o della pendenza (in salita). Dove il fronte è parallelo a questi elementi prende il nome di fianco. La zona di fronte

che si propaga in direzione opposta al vento e in discesa è detta coda (Blasi, Bovio, Corona, Marchetti, & Maturani, 2004).



Figura 2: Rappresentazione delle parti di un fronte di fiamma

La diffusione del fuoco sul territorio dipende da diversi fattori fisici che influiscono sull'accensione e lo sviluppo di un incendio. Il primo aspetto da considerare riguarda la topografia, cioè la configurazione del territorio in termini di elevazione, pendenza ed esposizione. Questi aspetti determinano il tipo di clima, la vegetazione e il regime dei venti per un territorio. Il secondo fattore è la vegetazione, la quale rappresenta il combustibile del processo, ed è caratterizzata da diversa tipologia, struttura e distribuzione spaziale. L'ultimo aspetto riguarda la meteorologia che rappresenta il fattore più variabile nel processo di propagazione del fuoco (Regione Lombardia, 2017) (Blasi, Bovio, Corona, Marchetti, & Maturani, 2004).

Infine, è importante trattare delle conseguenze degli eventi di incendio boschivo in quanto i danni causati dal passaggio di un incendio nell'ecosistema forestale sono dei più disparati: dai danni più evidenti a quelli più difficilmente individuabili e quantificabili.

Gli effetti sono osservabili nel deterioramento, totale o parziale, del soprassuolo arboreo che comporta modificazioni profonde alla vegetazione erbacea e arbustiva, nella fauna, alle proprietà del suolo, alla fruizione del bosco e al suo inserimento nel paesaggio.

Uno dei segni più evidenti del passaggio del fuoco è visibile in superficie, la quale è interessata dall'eliminazione della biomassa, la messa a nudo del suolo e la formazione di uno strato di cenere. La superficie assume temporaneamente caratteristiche di idrorepellenza dovute all'azione combinata della cenere che sigilla i pori del suolo e del veloce disseccamento del materiale superficiale (Letey, 2001). A seguito del passaggio del fuoco si osserva quindi la mancanza di copertura della vegetazione al suolo e di quella assicurata dalle chiome degli

alberi, modificando così il deflusso superficiale. Le gocce di pioggia impattano direttamente sul terreno, intaccando la sua struttura e innescando fenomeni erosivi e di ruscellamento, in particolare nel corso del primo anno post incendio (Moretti & Conedera, 2005).

Fra le azioni dirette si riscontrano la rapida rimozione dall'ecosistema di biomassa viva e morta, animale e vegetale, la scissione dei composti chimici complessi nel suolo, il riscaldamento dell'ambiente e l'immissione di anidride carbonica in atmosfera. Queste implicano delle ripercussioni sulle proprietà chimiche e fisiche del suolo e dell'atmosfera, degli habitat, sull'insediamento e sviluppo di popolazioni animali e vegetali e sull'adattamento genetico delle specie (Regione Lombardia, 2017).

3.2 Metodi di mappatura

Una corretta pianificazione del territorio deve necessariamente considerare quali eventi calamitosi possono verificarsi al suo interno. Ad oggi, l'individuazione delle aree potenzialmente interessate da fenomeni naturali è effettuata tramite l'applicazione di vari metodi, tra cui la realizzazione di mappe di rischio e di pericolosità.

In generale, il rischio (R) può essere espresso attraverso la sua formula semplificata come

$$R = P \cdot V \cdot E$$

dove:

- P indica la pericolosità, ovvero la probabilità di accadimento di un evento di una data intensità, in un'area specifica e in un intervallo temporale definito;
- V definisce la vulnerabilità, ossia la predisposizione di un elemento a subire un danneggiamento dovuto al verificarsi di un dato fenomeno;
- E rappresenta l'esposto, cioè il valore economico dei beni presenti sul territorio.

È possibile affermare che pericolosità e rischio sono fattori complementari: essendo la prima legata alla probabilità che il fenomeno si verifichi, il rischio ne è una diretta conseguenza, in quanto esprime l'effetto che tale evento avrà sulla vita umana, sui beni, sulle risorse economiche e ambientali (ISPRA) (Rizzolo, et al., 2020).

Le mappe di pericolosità e rischio incendio boschivo vengono realizzate dai vari Paesi con procedure differenti, utilizzando anche metodi di classificazione delle aree interessate non omogenei.

La probabilità di accadimento di un incendio boschivo viene valutata dalla Regione Lombardia sulla base di fattori in grado di influenzare gli eventi, come la geomorfologia, l'uso del suolo, la meteorologia e la presenza antropica. È da precisare che le variabili scelte sono state

selezionate anche in relazione alla disponibilità delle informazioni a scala regionale (Regione Lombardia, 2020).

La vulnerabilità del territorio invece è definita analizzando la predisposizione al danno di tre componenti: forestale, urbana ed antropica. La prima esprime la propensione al danneggiamento della superficie boscata, assegnando un valore diverso di resilienza e resistenza in base al tipo di vegetazione. La seconda è riferita alla lontananza di aree urbane e infrastrutture dall' area bruciabile, attribuendo un valore di vulnerabilità decrescente all'aumentare della distanza. Nel caso della componente antropica, la predisposizione al danno è definita assegnando valori decrescenti in base alla densità abitativa. Si ottiene quindi una mappa a scala regionale, associando al territorio un grado di vulnerabilità variabile da un minimo di 0 ad un massimo di 10 (Regione Lombardia, 2020).

Sulla base del prodotto tra pericolosità e vulnerabilità, si ottiene la carta del rischio incendio boschivo a livello comunale.

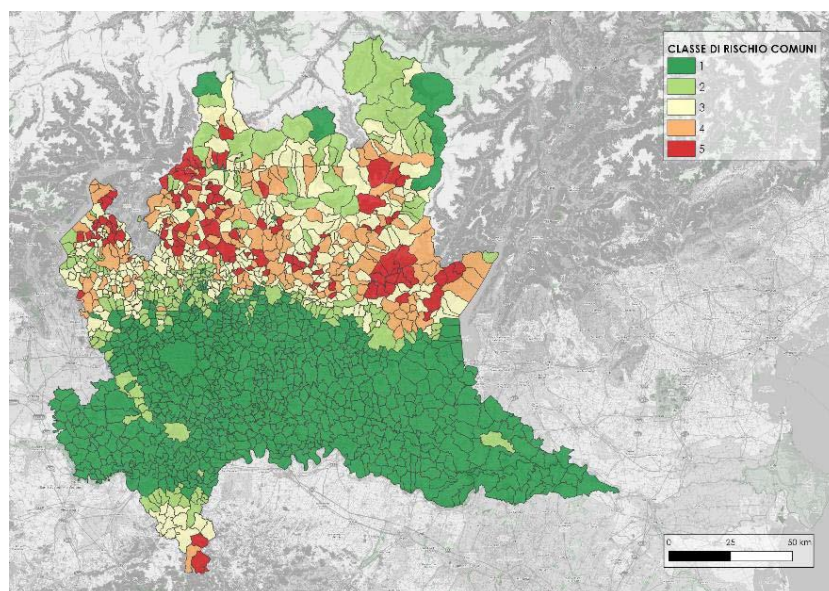


Figura 3: Classe di rischio incendi boschivi per i comuni della regione Lombardia (Regione Lombardia, 2020)

La mappa riportata in Figura 3 specifica, per ciascun comune lombardo, la classe di rischio incendio boschivo: viene adottata una suddivisione in cinque categorie, associando il valore 1 ai territori meno interessati dal fenomeno e 5 a quelli più coinvolti.

Una metodologia diversa viene utilizzata per la realizzazione della mappa del rischio incendio boschivo per il Canton Ticino. In primo luogo, è necessario considerare che il territorio è interessato da incendi principalmente nel periodo invernale; tuttavia, nei mesi estivi tendono a concentrarsi ulteriori eventi, anche se in numero ed estensione molto minori. Per tenere in considerazione questo aspetto, la mappa del rischio complessivo è ottenuta dalla somma del

rischio invernale e del rischio estivo ponderato: ad oggi, quest'ultimo è valutato come l'11.1% del primo (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016).

La mappatura richiede l'assegnazione di un punteggio relativo al rischio: per valori pari o superiori a 25, si parla di rischio da medio a molto alto.

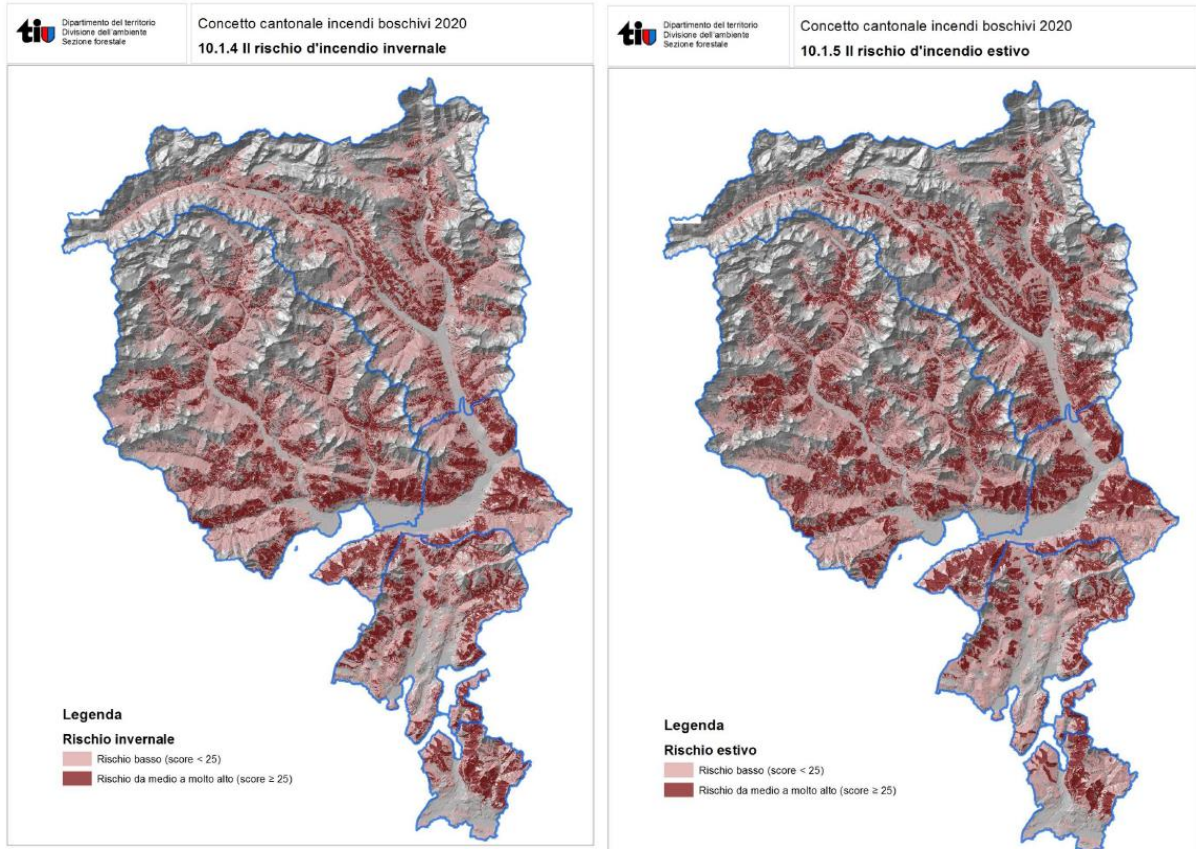


Figura 4: Mappe di rischio incendio invernale (a sinistra) ed estivo (a destra) per il Cantone Ticino (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016)

3.3 La gestione del rischio incendio

3.3.1 Brevi considerazioni sull'ordinamento italiano e svizzero in materia di incendi boschivi

La “Legge-quadro in materia di incendi boschivi” (L. n. 353/2000) ha come obiettivo primario la conservazione e la difesa del patrimonio boschivo italiano, quale “bene insostituibile per la qualità della vita” (art. 1) e le sue disposizioni assumono rango di principi fondamentali dell'ordinamento ai sensi dell'art. 117 della Costituzione.

Considerato che, in Italia, lo Stato ha legislazione esclusiva in materia di tutela dell'ambiente e dell'ecosistema, le prescrizioni stabilite dalla Legge n. 353/2000 non possono essere modificate dalle regioni. Tuttavia, la predetta legge affida ad esse il compito di uniformare i propri ordinamenti ai principi e alle disposizioni in essa contenute.

Pertanto, è evidente che la menzionata Legge – quadro statale costituisce, da un lato, “materia esclusiva” ai sensi dell’art. 117 Cost. e, dall’altro lato, principio fondamentale per gli ambiti di competenza residuali facenti capo alla sfera di cognizione delle regioni.

L’art. 2 della L. 353/2000, definisce l’incendio boschivo come un “fuoco con suscettività ad espandersi su aree boscate, cespugliate o arborate, nonché su terreni coltivati o incolti e pascoli limitrofi a dette aree”. Tale definizione viene recepita non solo dalla normativa pubblicistica e amministrativa, nazionale e regionale, ma anche dall’ordinamento penale italiano, come si evince dall’art. 11 della predetta normativa. Infatti, questo stabilisce le sanzioni penali per l’incendio boschivo, inserendo una nuova fattispecie di reato all’art. 423 bis c.p. che in precedenza, era disciplinata come una circostanza aggravante del reato di “Incendio”.

Con particolare riguardo all’art. 423 bis c.p., rubricato “Incendio boschivo”, si evidenzia che il primo comma disciplina l’ipotesi di incendio doloso (causato volontariamente), mentre il secondo comma quello colposo (ossia causato da una condotta negligente e/o imprudente). Il terzo e quarto comma, invece, disciplinano delle circostanze aggravanti che aumentano la pena di cui ai precedenti commi n. 1 e 2 nei casi in cui dall’incendio derivi un pericolo per gli edifici, un danno su aree protette oppure un danno grave, esteso e persistente all’ambiente.

L’introduzione, con la Legge-quadro del 2000, di una fattispecie autonoma di reato è stata fortemente voluta dal legislatore per fronteggiare in modo più rigoroso i danni prodotti dagli incendi dolosi. In riferimento alla lunga ondata delle devastazioni dei boschi italiani, venute in essere negli ultimi anni Novanta, la Legge n. 353/2000 definisce quindi una cornice organica degli interventi normativi che sono volti alla prevenzione ed alla lotta all’annoso problema degli incendi boschivi. Per cui le regioni hanno il dovere di approvare il piano regionale per la programmazione delle attività di previsione, prevenzione e lotta contro gli incendi boschivi, sulla base di linee guida e delle direttive deliberate.

L’ordinamento giuridico svizzero in materia di incendi boschivi risulta oltremodo simile a quello italiano. Infatti, la Costituzione federale della confederazione svizzera, nella sezione IV (artt. 73-80), conferisce alla Confederazione elvetica legislazione esclusiva in materia di protezione dell’uomo e del suo ambiente naturale da effetti nocivi o molesti, mentre ai Cantoni compete l’esecuzione delle relative prescrizioni (art. 74).

Con riferimento specifico alle foreste e ai boschi, la Confederazione, ai sensi per gli effetti dell’art. 77 della Costituzione elvetica, provvede affinché gli stessi “possano adempiere le loro funzioni protettive, economiche e ricreative” ed emana i principi relativi alla loro protezione nonché promuove provvedimenti per la loro conservazione.

Anche la legislazione nel campo del diritto penale e della procedura penale compete alla Confederazione e, avuto riguardo alla tutela penale del patrimonio boschivo elvetico, contrariamente a quanto avvenuto in Italia, il Codice penale svizzero non ha istituito uno specifico reato di incendio boschivo. Infatti, gli artt. 221 e 222 del Codice penale svizzero disciplinano rispettivamente l'ipotesi generale di "Incendio" doloso o colposo.

3.3.2 Lombardia

La regione Lombardia, a seguito delle indicazioni contenute nella Legge-quadro (L. n. 353/2000) nazionale e nelle "Linee guida relative ai Piani regionali per la programmazione delle attività di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi", approvate con Decreto del Ministero dell'Interno 20 dicembre 2001, si è dotata del primo strumento di pianificazione in tema di incendio boschivo nel 2003.

Il "Piano regionale delle attività di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi" (AIB) è stato approvato nel 2003 dalla Giunta Regionale e successivamente revisionato ed aggiornato negli anni 2006, 2009, 2013, 2016 e 2019.

Il Piano Antincendio Boschivo della regione Lombardia riporta dapprima la differenziazione tra l'incendio di vegetazione "boschivo" e "territoriale". Attraverso il termine "vegetazione" viene indicata la copertura del suolo da parte di piante (quindi ogni organismo vivente vegetale), la quale rappresenta il più abbondante elemento della biosfera. La vegetazione è descritta in termini scientifici all'interno del Piano Antincendio Boschivo lombardo nell'ambito delle categorie: "naturale" (non influenzata dall'uomo), "subnaturale" (influenzata dall'uomo ma conserva la struttura del tipo di formazione vegetale da cui deriva), "seminaturale" (spontanea dall'aspetto alterato) ed "antropogena". Per le finalità di questo elaborato, la definizione di "vegetazione" è utilizzata con accezione generale, non tenendo quindi conto del fatto che gli insiemi di piante e comunità vegetali presenti in un sito si siano sviluppati spontaneamente oppure siano stati piantati dall'uomo.

In materia di incendi boschivi, gli incendi "di vegetazione" interessano la componente agraria e forestale del territorio per cui sono identificati dal tipo di combustibile (componente che vegeta sul territorio) ma anche dalla capacità di espansione nell'area circostante in quanto il combustibile non è confinato come per altre tipologie di incendio.

Secondo la definizione già riportata, proposta dalla Legge n. 353/2000, all'art. 2, gli incendi boschivi sono descritti come "fuoco con suscettività ad espandersi su aree boscate, cespugliate o arborate, comprese eventuali strutture e infrastrutture antropizzate poste all'interno delle

predette aree, oppure su terreni coltivati o incolti e pascoli limitrofi a dette aree”. Nel caso, invece, in cui l’evento riguardi una vegetazione non limitrofa ad aree boscate, per la quale non si possa assegnare la definizione di incendio boschivo (come accade per oliveti, frutteti, vigneti, ecc.), si parla di incendio territoriale.

In definitiva, la classificazione di un incendio come boschivo o territoriale non dipende dalla tipologia di vegetali coinvolti ma da quelli verso i quali il fuoco si possa propagare, ovvero la sua suscettività ad espandersi. Tale condizione viene valutata da personale qualificato, quali i membri delle strutture operative, i Carabinieri Forestali e i Vigili del Fuoco.

In particolare, il Corpo nazionale dei Vigili del Fuoco, in caso di calamità come gli incendi boschivi, interviene quale componente fondamentale del Servizio nazionale di protezione civile assicurando interventi tecnici di propria competenza. A differenza dei Carabinieri Forestali, i quali agiscono in operazioni di spegnimento e nel coordinamento dei mezzi aerei nel caso in cui l’obiettivo sia la salvaguardia dell’ambiente, i Vigili del Fuoco intervengono per proteggere l’incolumità delle persone e dei beni (Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco) (Dipartimento della Protezione Civile). Nel caso in cui l’incendio rappresenti una minaccia sia per l’ambiente che per gli insediamenti civili, si assicura il coordinamento tra le parti, in modo da ottimizzare gli interventi di spegnimento.

Gli incendi boschivi vengono costantemente registrati nel Catasto delle aree percorse dal Fuoco ai fini dell’imposizione e attuazione dei vincoli ad essi legati, come l’inedificabilità, divieto di pascolo e di caccia previsti dalla Legge n. 353/2000, misure evidentemente connesse a scoraggiare l’azione dolosa.

Al contrario, gli incendi territoriali non rientrano nella statistica degli incendi boschivi e non subiscono i vincoli sopracitati ma possono comunque costituire reato. Questi incendi possono comportare rischi per l’incolumità pubblica a cui si aggiunge il procurato allarme e panico, provocare danni patrimoniali a seguito della distruzione di coltivazioni o danneggiamento delle strutture e infrastrutture e modificare il sistema di pronto intervento e di lotta contro il fuoco.

Gli incendi territoriali hanno una banca dati dedicata redatta dai Carabinieri Forestali, che contiene per ciascun evento le informazioni caratterizzanti, compresa la tipologia di uso del suolo interessata.

Dalle analisi del fenomeno svolte per la redazione del “Piano regionale delle attività di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi” (AIB) si evince che la regione Lombardia è interessata da un alto numero di incendi ma anche che essi sono in diminuzione

rispetto ai decenni precedenti. Nel grafico in Figura 5, infatti, si osserva un trend decrescente con forti oscillazioni annuali per il periodo tra il 1975 e il 2018.

Inoltre, è possibile affermare che c'è un aumento della superficie percorsa dal fuoco e della media bruciata per singolo evento per l'intera regione Lombardia (Figura 6 e Figura 7). Prendendo in considerazione questo ultimo aspetto, una analisi di dettaglio evidenzia che il decremento del numero di incendi si registra per eventi di dimensioni ridotte (superficie inferiori a 10 ettari), mentre aumenta il numero di incendi che interessano superfici maggiori. Infine, viene svolto uno studio dal punto di vista temporale valutando la distribuzione degli incendi per l'ultimo decennio, nei mesi dell'anno in cui si sono verificati. È possibile osservare che il maggior numero di incendi viene registrato in corrispondenza dei mesi invernali-primaverili mentre il minimo in autunno, confermando di conseguenza lo stesso comportamento già osservato per il decennio precedente (Figura 8).

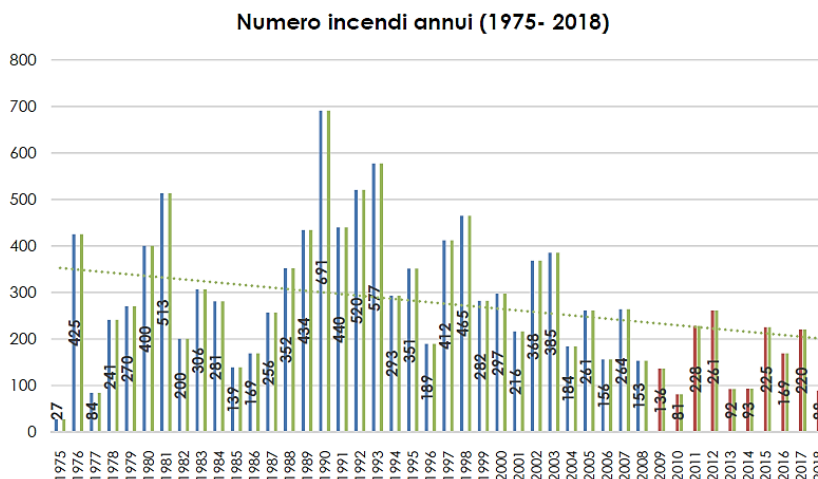


Figura 5: Numero degli incendi per anno tra il 1975 e il 2018 (Regione Lombardia, 2020)

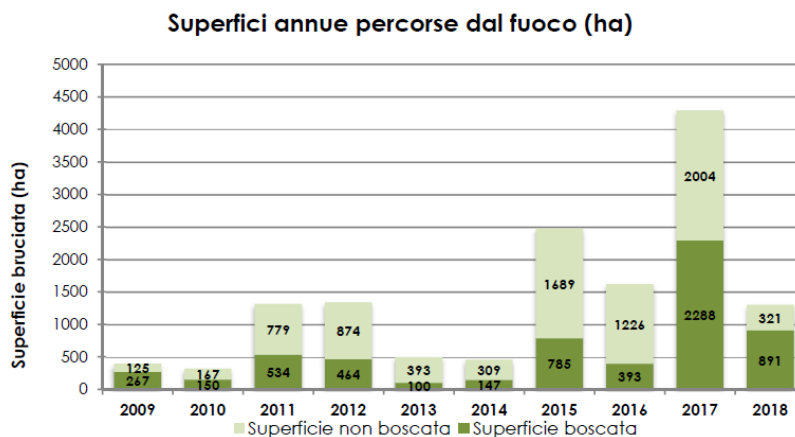


Figura 6: Superficie annua percorsa da incendi per il decennio 2009-2018 (Regione Lombardia, 2020)

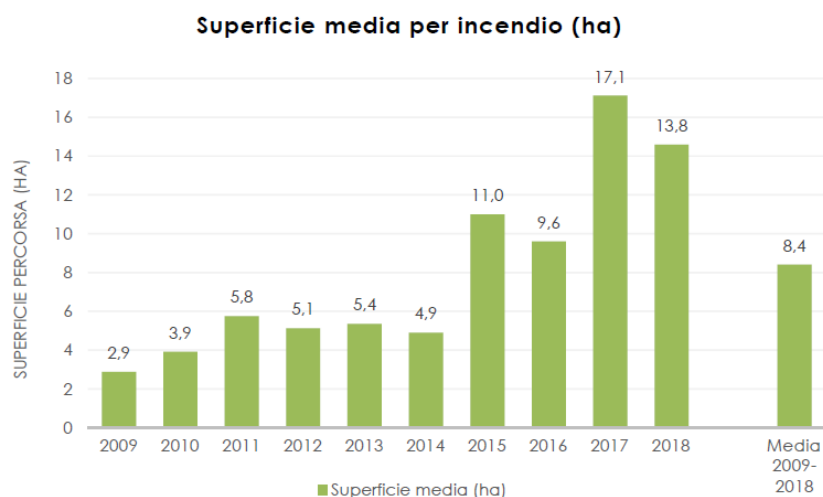


Figura 7: Superficie media degli incendi per anno in ettari (Regione Lombardia, 2020)

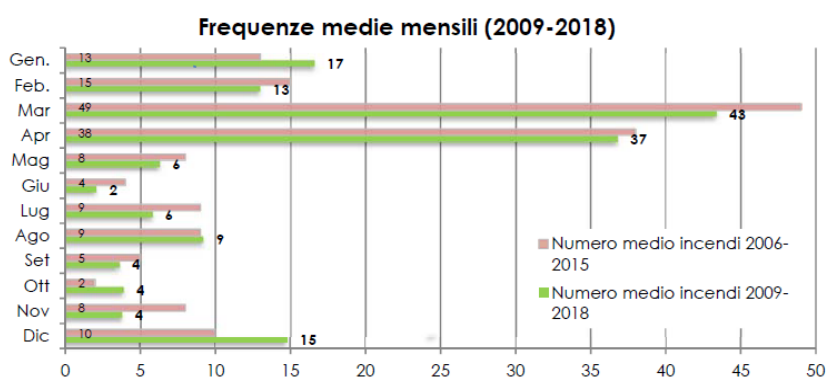


Figura 8: Frequenze medie mensili (Regione Lombardia, 2020)

Gli incendi vengono classificati anche sulla base delle cause determinanti, così suddivise: “naturali”, “involontarie o colpose”, “volontarie o dolose”, “dubbie” ed infine “non classificabili” (Regione Lombardia, 2020). Gli eventi di causa dubbia vengono accorpati a quelli non classificabili, in quanto per alcuni incendi non ci sono elementi sufficienti per differenziare l’origine dell’innesco.

Va rimarcato come la metà del campione (49.6%) di incendi studiato è classificato come volontario (o doloso) mentre per un terzo degli eventi (33.6%) non è possibile definire la causa scatenante (non classificabile), gli incendi involontari costituiscono il 15.5% mentre la restante parte (1.3%) è imputabile a cause naturali (Figura 9). Quest’ultime sono riconducibili ad eventi propri della natura, a circostanze atmosferiche ben definite e sostanzialmente inevitabili, quali i fulmini.

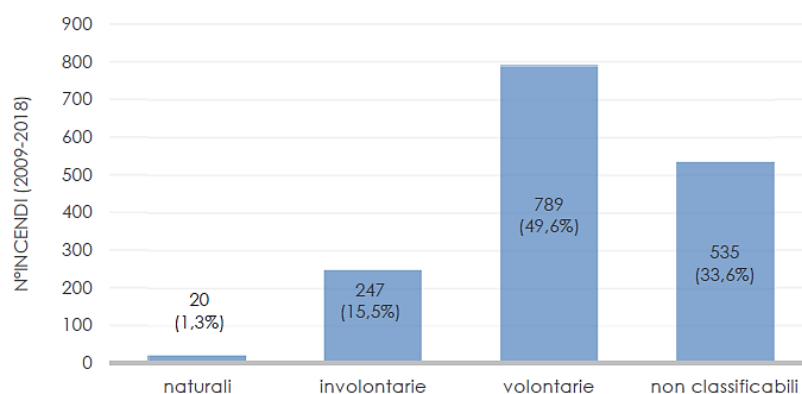


Figura 9: Frequenza degli incendi per causa per il decennio 2009-2018 (Regione Lombardia, 2020)

Successivamente, per ogni anno è studiata l'incidenza di ciascuna causa sulla superficie percorsa dal fuoco: esiste una discreta variabilità annua in cui pochi incendi con innesco involontario hanno causato un rogo di estese dimensioni, ad eccezione dell'anno 2018 (Figura 10). Il territorio lombardo, quindi, non è generalmente soggetto ad eventi con cause naturali ma, al contrario, le attività antropiche sono determinanti per lo sviluppo di incendi volontari o involontari.

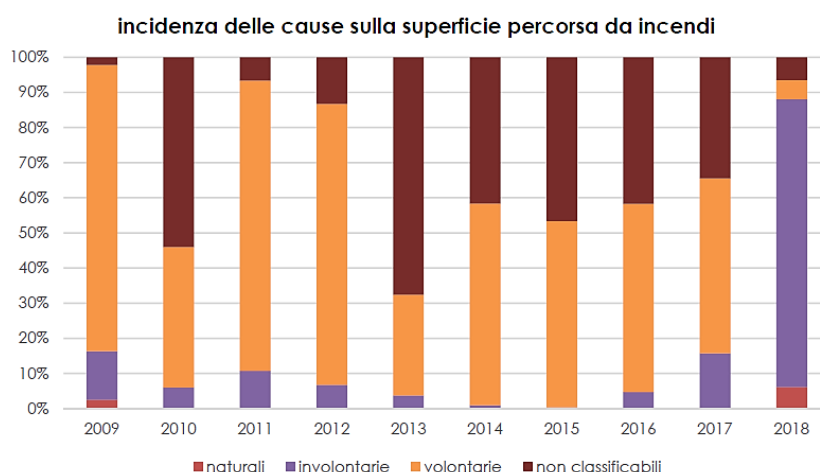


Figura 10: Incidenza delle cause sulla superficie percorsa da incendi per il decennio 2009-2018 (Regione Lombardia, 2020)

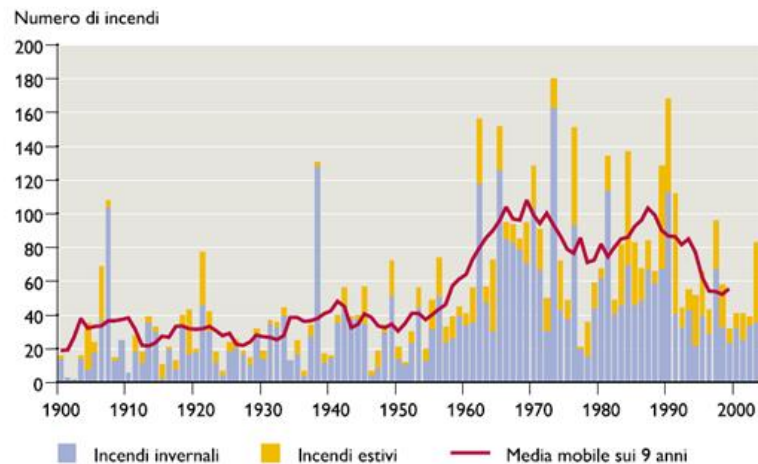
Alla luce di queste analisi, si spiega come il Piano antincendio boschivo si occupi di azioni di previsione e prevenzione al fine di ridurre le cause di innesco e tratti principalmente attività di lotta attiva, definendo le procedure, gli strumenti e i mezzi di intervento in caso di necessità.

3.3.3 Canton Ticino

Il territorio ticinese presenta una lunga tradizione in materia di gestione e lotta agli incendi boschivi: basti pensare che il primo provvedimento riguardante questo tema consiste in un Decreto del Consiglio di Stato del 1878 (Conedera, et al., 2004). In questo modo si è tentato di regolamentare le attività di segnalazione e spegnimento, nonché di imporre un divieto di

pascolo per un determinato periodo dell'anno, in modo da disincentivare atti volti ad ottenere un qualsiasi ritorno economico dall'incendio.

Le informazioni sugli incendi boschivi nel territorio ticinese vengono raccolte a partire dal 1912. Questa lunga serie di dati ha consentito di studiare l'evoluzione dei fenomeni indicando, tra le altre cose, un importante aumento nel numero di eventi partendo dagli anni Cinquanta.



¹ Il periodo invernale è definito da dicembre ad aprile compreso; il periodo estivo da maggio a novembre compreso (corrispondente grossomodo al periodo vegetativo).

Figura 11: Andamento della frequenza annuale degli incendi boschivi registrati nel Canton Ticino per il periodo 1900-2003 (Conedera & Pezzatti, 2005)

Diversi autori hanno esaminato l'evoluzione rappresentata in Figura 11, concludendo che i cambiamenti in ambito socio-economico nel dopoguerra abbiano favorito gli inneschi (Antonietti, 1974) (Ceschi, 1975/76) (Conedera, 1996). Il dislocamento della popolazione nei centri urbani, accompagnato da un conseguente abbandono delle attività agricole, ha portato ad un incremento di terreno incolto, superficie boscata ed al progressivo accumulo di legname e lettiera¹ al suolo, comportando una maggiore disponibilità di materiale combustibile.

Gli anni Novanta sono caratterizzati invece da un'inversione di tendenza data da un calo nel numero di eventi, soprattutto nei casi associati a comportamenti negligenti dell'uomo. Questo decremento può essere attribuito all'introduzione del Decreto esecutivo del 21 ottobre 1987 voluto dal Consiglio di Stato del Cantone, con il quale si vietano i fuochi all'aperto ed il compostaggio di scarti vegetali. Nonostante questo provvedimento sia inteso inizialmente con il fine di ridurre l'inquinamento di aria ed acqua, permette di diminuire contemporaneamente

¹ Strato più superficiale del bosco, costituito da sostanze organiche in decomposizione.

anche il numero di inneschi e di sensibilizzare la popolazione alla tematica ambientale (Conedera, 1996). Inoltre, la diminuzione del numero di eventi può anche essere associata all'evoluzione dei terreni lasciati incolti durante i precedenti anni di abbandono delle attività agricole. Infatti, in seguito ad una prima fase caratterizzata dallo sviluppo di erba alta e cespuglieti, di più facile ignizione, molti campi marginali superano questo stadio evolutivo divenendo veri e propri boschi, caratterizzati da una minore probabilità di innesco (Conedera & Pezzatti, 2005).

Un altro importante aspetto da considerare nello studio degli incendi boschivi nel territorio ticinese, riguarda la superficie bruciata.

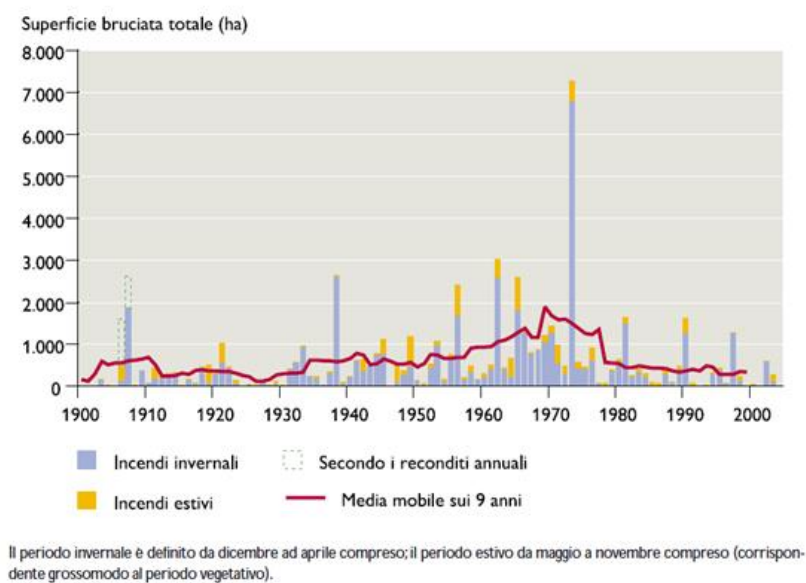


Figura 12: Andamento della superficie annuale bruciata [ha] negli incendi boschivi in Canton Ticino per il periodo 1900-2003 (Conedera & Pezzatti, 2005)

A primo impatto, è possibile notare il picco di superficie bruciata in corrispondenza del 1973: gli incendi boschivi di quell'anno, in particolar modo quello avvenuto nel mese di dicembre, sono ricordati come i più catastrofici per il Cantone (Conedera, et al., 2004) (Antonietti, 1974) (Corti, 1993).

In generale, dal grafico in Figura 12 si evince che, sebbene il numero di eventi nel corso dell'ultimo secolo sia caratterizzato da oscillazioni, l'area percorsa dal fuoco tende a ridursi nel tempo. L'uso di mezzi aerei nella fase di spegnimento e l'ottimizzazione nell'organizzazione

dei pompieri², dovuta all'introduzione della Legge cantonale sulla polizia del fuoco (1976), consente di intervenire in modo rapido ed efficiente contenendo il più possibile la progressione del fronte di fiamma. Ad oggi, i corpi pompieri sono organizzati nelle seguenti categorie (FCTCP Pompieri Ticino):

- A- Centri di soccorso cantonale: coordinano la lotta agli incendi, all'inquinamento ed ai danni alla natura intervenendo simultaneamente in diverse situazioni, in un comprensorio di ampia dispersione regionale, garantendo un'organizzazione ottimale con gli altri enti di soccorso del territorio.
- B- Centri di soccorso regionale: si occupano della gestione di incendi e danni alla natura in un comprensorio regionale limitato, assicurando i collegamenti operativi con le strutture locali di soccorso.
- C- Centri di soccorso locale: è un gruppo che interviene a livello locale, subordinato ai centri di soccorso cantonale e regionale. In zone particolarmente colpite da incendi boschivi questi centri sono costituiti da corpi pompieri di montagna, equipaggiati quindi in modo differente, in grado di agire esclusivamente nel territorio di competenza.
- CM- Corpi di montagna: si occupano degli incendi di bosco, per i quali sono particolarmente specializzati.
- D- Corpi aziendali: agiscono in casi di prima necessità a livello aziendale e sono principalmente subordinati ai centri di soccorso cantonali e regionali.

Da uno studio eseguito sugli eventi censiti nel Ticino per il periodo 1970-2013, suddivisi nei vari mesi dell'anno, si osservano due diversi regimi di incendi: uno di tipo invernale-primaverile, esteso quindi al periodo di riposo vegetativo, l'altro di tipo estivo, caratterizzato dalla fase vegetativa (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016).

² Definizione corrente per i vigili del fuoco in Svizzera

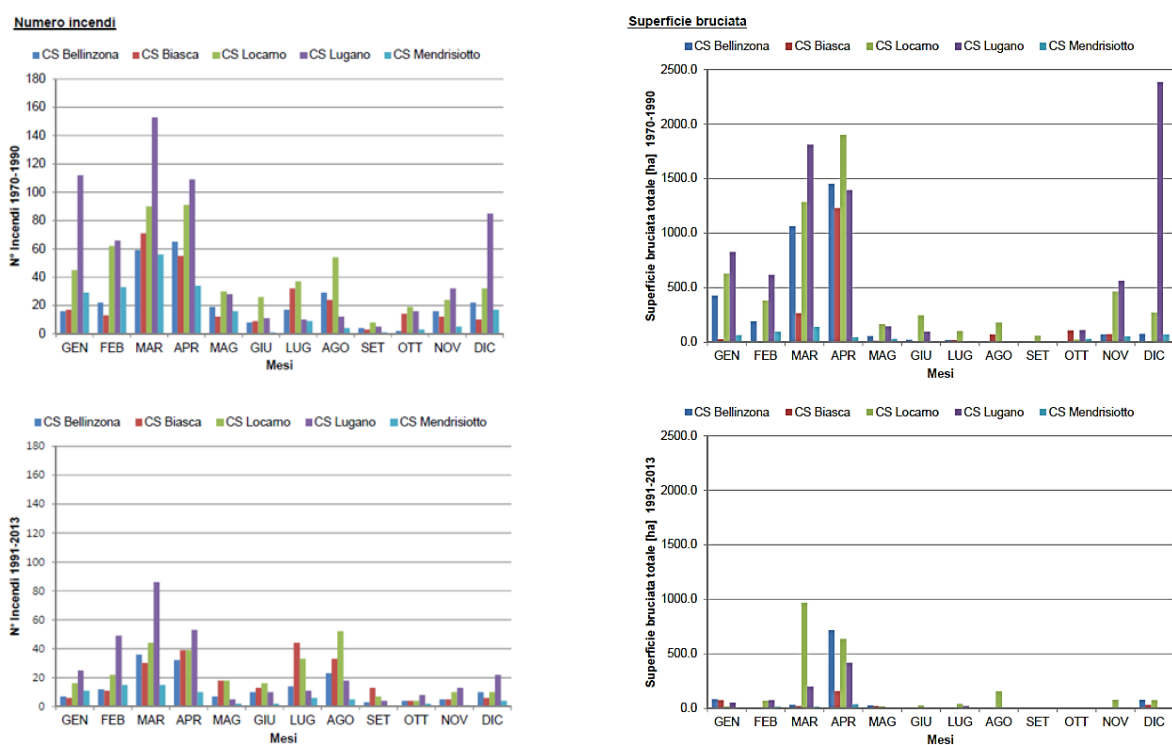


Figura 13: Numero di incendi boschivi mensili registrati nei singoli comprensori dei centri di soccorso ticinesi (a sinistra) e superficie bruciata [ha] (a destra mensilmente) in ogni centro di soccorso nei periodi 1970-1990 e 1991-2013 (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016)

Sulla linea di quanto affermato in precedenza, si nota che sia il ventennio 1970-1990 che l'intervallo 1991-2013 sono nettamente caratterizzati da un regime di incendi invernale-primaverile. Queste stagioni risultano essere le più critiche sia in termini di numero di eventi che di superficie percorsa dal fuoco.

Confrontando i due intervalli temporali analizzati, è possibile osservare una forte diminuzione nel numero e nell'estensione degli eventi nel periodo invernale e primaverile. Per quanto concerne la fase estiva, si evince che il numero di eventi verificati nel periodo 1991-2013 risulta lievemente aumentato nei mesi di luglio ed agosto. Tuttavia, a tale incremento non è associata una maggiore superficie percorsa dal fuoco che, al contrario, è molto ridotta.

La differenza principale tra il regime di incendi invernale ed estivo risiede nelle più comuni cause di innesco e modalità di propagazione. Infatti, se nella prima prevalgono eventi di natura antropica che tendono ad estendersi nei boschi di latifoglie a basse quote, diffondendosi soprattutto a livello superficiale, la seconda è costituita da inneschi principalmente naturali, che interessano boschi di conifere a quote più elevate propagandosi più lentamente nello strato sotterraneo (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016).



Figura 14: Rappresentazione delle principali cause di incendi boschivi registrati nel Cantoni Ticino per i periodi 1970-1990 e 1991-2013 (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016)

Come si evince dalle statistiche riportate in Figura 14, nei due periodi analizzati si sono verificate delle evoluzioni nelle cause di innesco. Tuttavia, la variazione che meno passa inosservata riguarda gli eventi attribuiti alla caduta di fulmini: è principalmente a questi ultimi che viene associato l'aumento del numero di incendi boschivi nel periodo estivo, soprattutto nei mesi di luglio ed agosto (Conedera & Pezzatti, 2005). Tale incremento può essere associato alla combinazione di due fattori in grado di facilitare l'innesco, come il verificarsi di scariche elettriche in periodi particolarmente siccitosi in località dove, a causa della scarsa gestione del terreno, si registra un accumulo di materiale al suolo e l'aumento delle aree boscate.

4. Un modello di suscettività per gli incendi boschivi

4.1 L'analisi di suscettività

L'analisi di suscettività consiste in un metodo di supporto nella produzione di mappe, legate al tema degli eventi naturali, da applicare nella pianificazione del territorio e nella gestione delle emergenze in ambito di protezione civile. Questo approccio non rappresenta un'alternativa alla metodologia classica nella produzione di mappe di rischio, ma quanto più uno strumento concorrente, da integrare all'esistente. Il risultato prodotto è indipendente dal tempo e dalla frequenza di accadimento, quindi non si lega al concetto di tempo di ritorno proprio delle mappe di pericolosità e agli scenari di rischio.

L'analisi di suscettività è spesso utilizzata per la produzione di mappe delle aree soggette a fenomeni calamitosi, quali frane, alluvioni (Bartolomei, et al., 2006) e trova applicazione anche nel campo degli incendi boschivi (Pourtaghi, Pourghasemi, Aretano, & Semeraro, 2016) (Verde & Zêzere, 2010).

La suscettività da incendio indica la propensione di un'area ad essere percorsa dal fuoco, assumendo che i fattori e le condizioni che lo hanno generato in passato possano individuare le aree che in futuro potranno essere più o meno colpite dal fenomeno in esame. L'analisi prevede lo studio delle relazioni esistenti tra i dati storici degli incendi ed i fattori di tipo morfologico o climatico che caratterizzano il territorio in esame, l'addestramento di un modello di suscettività e la realizzazione della relativa mappa.

La prima fase da eseguire per la produzione di mappe di suscettività consiste nella ricerca di dati storici degli incendi boschivi avvenuti nell'area di studio. Una porzione del dataset verrà utilizzata per la calibrazione del modello, mentre la restante parte sarà dedicata alla validazione. Di conseguenza, è importante disporre di una quantità sufficiente di informazioni relative agli eventi verificati.

In secondo luogo, si devono individuare le caratteristiche del territorio in grado di favorire lo sviluppo di un evento calamitoso. Per il fenomeno in esame, i fattori sono raggruppabili in due categorie: "fattori predisponenti" e "fattori determinanti". I primi sono connessi alle caratteristiche intrinseche del territorio, come la topografia, la vegetazione e le condizioni meteorologiche. I secondi invece sono riconducibili a cause naturali, come fulmini, o di origine antropica, come nel caso di azioni di ordine colposo o doloso (Regione Lombardia, 2017). Infatti, uno studio eseguito dall'European Forest Fire Information System (EFFIS) mostra come

più del 95% degli incendi boschivi sia riconducibile alla pressione antropica (Leuenberger, Parente, Tonini, Gonzalez Pereira, & Kanevski, 2018). Di conseguenza, è fondamentale includere nei modelli di suscettività da incendio l'effetto dovuto alla presenza dell'uomo, oltre alle caratteristiche del territorio in esame.

Inoltre, un'ulteriore verifica da eseguire in questa fase è l'influenza che i vari fattori possono avere gli uni sugli altri, in modo da evitare una ridondanza nelle variabili del modello.

Una volta definiti i fattori predisponenti e determinanti, si esegue la loro suddivisione in classi con il fine di valutare l'influenza di ciascuna sul verificarsi dell'evento.

Successivamente, si adotta un modello che mette in relazione i fattori predisponenti e determinanti scelti con i dati di calibrazione degli incendi boschivi, attraverso l'attribuzione di pesi basati sull'occorrenza o meno di eventi registrati. Questo passaggio consente di ottenere la mappa di suscettività per l'area in esame.

Infine, per valutare la bontà del modello addestrato, si esegue la fase di validazione sulla base del dataset ad essa dedicato.

4.1.1 Stato dell'arte sulla suscettività da incendio boschivo: aree di interesse, fattori di influenza e modelli applicativi

La letteratura in materia di incendio boschivo risulta molto vasta e ha grande applicazione in diversi contesti geografici. Gli studi esistenti vengono svolti con l'obiettivo di identificare i fattori che favoriscono lo sviluppo di questi fenomeni calamitosi e quindi di elaborare strumenti quali mappe di suscettività utili a supporto delle decisioni in fase di pianificazione e gestione delle emergenze.

Uno studio eseguito per la provincia del Golestan, regione situata nell'Iran settentrionale e particolarmente colpita da incendi boschivi, si propone di analizzarne la suscettività attraverso una procedura articolata in tre fasi (Pourtaghi, Pourghasemi, Aretano, & Semeraro, 2016):

1. individuazione di *general indicators*, ossia degli elementi che influenzano il fenomeno;
2. sviluppo di un modello di predizione utilizzando tecniche statistiche di *data mining*, in grado di lavorare con grandi quantità di dati;
3. produzione della mappa di suscettività implementando il modello selezionato in un sistema informativo geografico.

Inizialmente vengono presi in considerazione quindici fattori predisponenti-determinanti: pendenza, esposizione ed elevazione del suolo, indice di umidità topografico (TWI, definito

come il logaritmo del rapporto tra la *upslope area* relativa ad un punto, ovvero il flusso drenato in una sezione specifica e la pendenza del medesimo punto), indice di posizione topografico (TPI, definito come differenza di quota tra un punto specifico del terreno rispetto ai punti circostanti), piano di curvatura, effetto del vento, temperatura annuale, pioggia annuale, composizione del suolo, distanza da strada, fiumi e paesi, indice di vegetazione NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, utilizzato per la valutazione del contenuto di umidità) ed uso del suolo.

Partendo dal dataset di calibrazione si confrontano tre diversi modelli di regressione, ognuno dei quali indica i fattori più influenti tra quelli considerati inizialmente: si evince che, sebbene in misura differente, le variabili relative a pendenza, distanza dalle strade, uso del suolo, pioggia e temperatura annuale risultano avere un maggiore impatto sull'occorrenza degli incendi boschivi. Successivamente per ogni modello si ottiene una mappa di suscettività del territorio analizzato, la cui accuratezza è valutata nella fase di validazione.

Ulteriori analisi sugli incendi boschivi sono state condotte per il Portogallo, che è da considerarsi uno degli Stati europei più colpiti da queste calamità a causa di condizioni climatiche, topografia e caratteristiche della vegetazione favorevoli (Amraoui, Pereira, DaCamara, & Calado, 2015) (Pereira, Calado, DaCamara, & Calheiros, 2013). Alcuni autori, studiando la suscettività del territorio a questa tipologia di eventi, evidenziano come sia sufficiente basarsi su due soli fattori predisponenti di tipo geografico, che quindi tendono a non cambiare nel breve periodo: la pendenza e la copertura ed uso del suolo (Leuenberger, Parente, Tonini, Gonzalez Pereira, & Kanevski, 2018). Tale scelta è guidata dalla letteratura esistente: variabili come la quota, la temperatura e la precipitazione vengono ritenute poco significative (Verde & Zêzere, 2010). Le ragioni di questa affermazione risiedono nel fatto che alcuni fattori predisponenti possono considerarsi come *proxy* di altri. Infatti si sottolinea come la pendenza possa essere vista come una variazione di quota, che a sua volta è in grado di regolare la temperatura e la pioggia (Chang & Tsai, 1991) (Parente & Pereira, 2016) (Li, Zhang, Xie, & Wang, 2010) (Neteler, Rocchini, Castellani, & Roiz, 2011). Allo stesso modo, anche la tipologia di vegetazione presente è legata alle condizioni climatiche del territorio (Parente & Pereira, 2016).

La procedura proposta per la mappatura della suscettività prevede il confronto tra l'approccio deterministico e due diversi metodi stocastici. Dai risultati emerge che coperture del suolo come la vegetazione erbacea, aree a vegetazione rada e foreste siano le classi che influenzano maggiormente i modelli di suscettività ottenuti.

La drammatica situazione portoghese in tema di incendi boschivi è da lungo tempo esaminata in termini di suscettività e si conferma sempre di più la maggiore influenza dei fattori predisponenti di tipo statico rispetto a quelli climatici. Uno studio eseguito sull'intero Stato esamina la predisposizione del territorio agli incendi nel lungo periodo, integrando in un modello variabili come quota, pendenza, copertura del suolo, pioggia media annuale, numero medio di giorni con temperatura minima superiore o pari a 20 °C ed eventi storici; questi ultimi sono valutati in termini di probabilità, mentre agli altri si associa un punteggio in base alla loro influenza su un eventuale innesco (Verde & Zêzere, 2010). Ne risulta che il modello migliore è costituito dalle sole variabili di uso del suolo, pendenza e dati storici: l'inserimento di informazioni relative a precipitazioni e temperatura non assume un ruolo significativo nella valutazione e mappatura della suscettività del Portogallo.

In alcuni casi gli autori approfondiscono il legame tra gli incendi boschivi e l'aspetto socioeconomico, soprattutto laddove gli eventi classificati come volontari o involontari sono molto superiori a quelli naturali. Uno studio svolto in un'area a Sud-Ovest della Regione di Madrid si sofferma sulla relazione tra l'azione umana e gli inneschi (Romero-Calcerrada, Novillo, Millington, & Gómez Jiménez, 2008). In primo luogo, si considerano undici variabili, di cui cinque relative all'aspetto socioeconomico e sei di tipo spaziale; in particolare, queste ultime rappresentano le vie d'accesso all'area esaminata e l'uso del suolo. Il rischio di innesco viene valutato partendo dal metodo *Weights of Evidence*, tramite il quale si esaminano le associazioni spaziali tra le variabili sulla base del teorema di Bayes.

I risultati dell'analisi evidenziano che la lontananza da strade e tratti ad uso agricolo è correlata positivamente con il verificarsi di incendi boschivi, soprattutto nella fascia dei 50 metri; superati i 450 metri di distanza, la correlazione diventa trascurabile. In aggiunta, gli eventi si rivelano essere influenzati dalla prossimità alle aree camping e delle zone industriali, mentre sembrano non essere connessi alla presenza di spazi ricreativi sul territorio.

Un aspetto interessante emerso da questo studio si riscontra nell'assenza di incendi in prossimità di aree dedicate all'allevamento: di conseguenza, l'abbandono delle zone rurali ed il successivo cambiamento nell'uso del suolo, può portare ad un aumento nel numero di inneschi. Tale conclusione risulta particolarmente importante, soprattutto alla luce del notevole calo delle tradizionali attività primarie che si registra da oltre un secolo nelle regioni mediterranee (Badia, Pallares-Barbera, Valldeperas, & Gisbert, 2019). L'abbandono delle attività agricole e di allevamento, con il conseguente accumulo di materiale vegetale, implica grandi variazioni nell'uso del suolo. In aggiunta, l'espansione delle zone abitate verso aree boscate rende spesso

difficile la collocazione dei confini urbani e forestali e può comportare un aumento nel rischio di incendio (Viegas, 2009).

4.2 Caso di studio

L'area di studio si colloca in un contesto transfrontaliero, come detto in precedenza, al confine tra l'Italia e la Svizzera.

La linea di confine tra i due Stati risale al periodo napoleonico, e fu definita con la costituzione provvisoria della Repubblica elvetica del 1798, rivista poi nel 1815. A seguito dell'Unità d'Italia (1861) nasce ufficialmente il confine italo-elvetico.

L'area in esame è caratterizzata da un confine che segue solo in parte i criteri naturali. Infatti, la porzione a Nord segue la linea spartiacque, cioè la cresta dei rilievi montuosi, mentre per l'estremità a Sud il tracciamento viene eseguito adottando una metodologia arbitraria (Ufficio federale di topografia swisstopo). Per tali motivi, il confine tra i due Paesi può essere considerato di natura politica mentre il territorio si sviluppa con continuità. La mancanza di barriere comporta che i pericoli naturali non rimangono confinati da un lato o dall'altro, causando contemporaneamente effetti su entrambe le porzioni in esame. È quindi utile costruire un quadro conoscitivo comune e condiviso dei rischi che accomunano i due territori per individuare i mezzi e le risorse da mobilitare in caso di calamità.

La superficie del territorio in esame si estende per circa 3825 km² ed è composta per il 64.8% da territorio italiano e per il restante 35.2% da quello svizzero (Figura 15), comprendendo:

- le aree lombarde di amministrazione delle province di Como e Varese;
- i distretti ticinesi di Mendrisio, Lugano, Bellinzona ed in parte di Locarno, Vallemaggia, Leventina e Riviera;
- una porzione della regione di Moesa, nel Canton Grigioni.

Il territorio di studio è caratterizzato dalla presenza di un'enclave italiana in territorio svizzero: infatti il comune di Campione D'Italia appartiene alla provincia di Como ma è completamente circondato dal distretto di Lugano.

Un aspetto peculiare è la presenza di diversi corpi idrici di rilievo tra cui il lago Maggiore ed il lago di Como, che rispettivamente definiscono i limiti occidentale e orientale dell'area di studio; a questi si aggiunge il lago di Lugano, che si affaccia sia sul territorio ticinese che su quello lombardo.

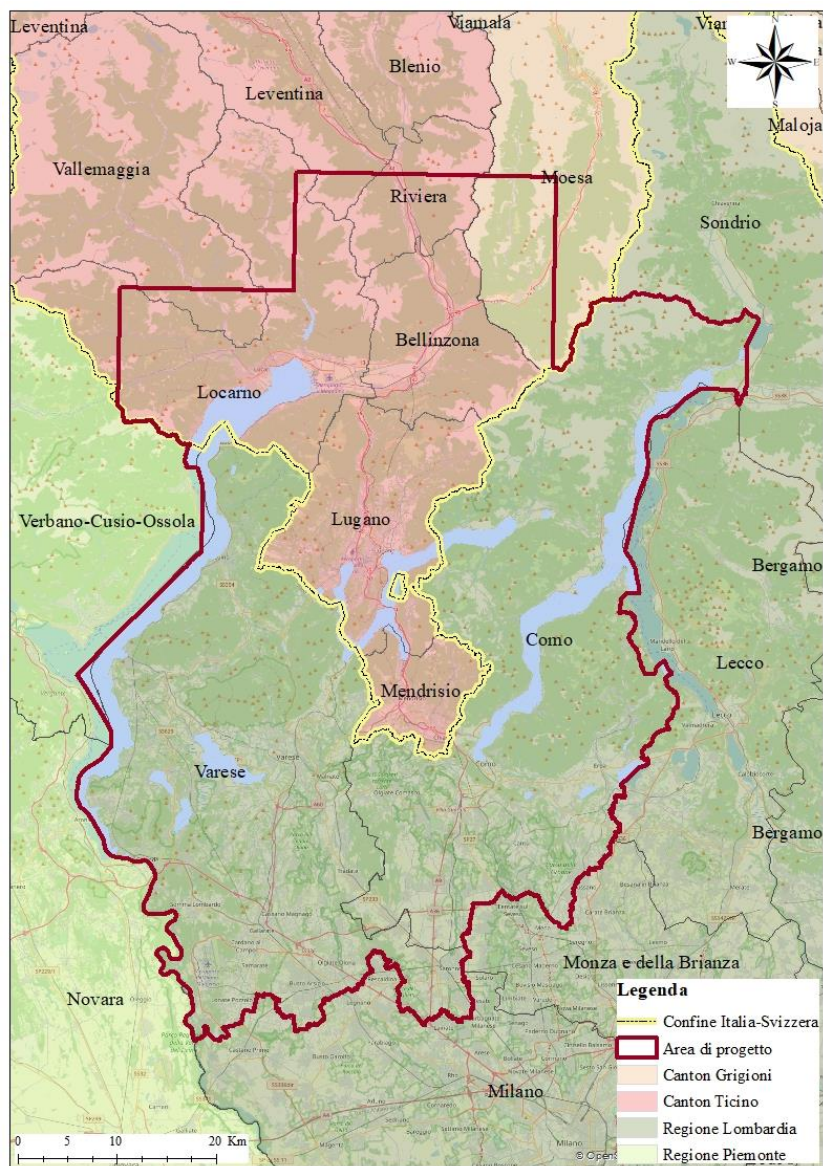


Figura 15: Rappresentazione dell'area di studio

Per accompagnare i dati relativi agli incendi boschivi, viene svolto lo studio del territorio dal punto di vista naturale. I due Stati coinvolti nell'area considerata, infatti, sono caratterizzati da interessanti dati sulla copertura boschiva. Il patrimonio forestale italiano è tra i più importanti d'Europa per estensione e varietà di specie, e costituisce un'immensa ricchezza per l'ambiente e l'economia, per l'equilibrio del territorio, per la conservazione della biodiversità e del paesaggio. In Italia i boschi ricoprono circa il 32% dell'intera superficie nazionale (Dipartimento della Protezione Civile) e la Lombardia è la terza regione italiana per superficie forestale, con un'estensione del 26% rispetto al territorio lombardo e il 7% di quello nazionale (ERSAF e Regione Lombardia, 2018).

Per quanto riguarda la Svizzera, invece, la foresta ricopre circa un terzo del territorio (Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL) e in particolare il Canton Ticino

presenta il tasso di boscosità più elevato di tutta la nazione, circa il 58% (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016).

4.3 Dati a disposizione

L'analisi di suscettività per il fenomeno degli incendi boschivi richiede la ricerca dei dati storici delle aree percorse dal fuoco per l'area in esame, quale elemento imprescindibile su cui addestrare il modello. A questo aspetto si affianca, come detto, lo studio approfondito dei fattori predisponenti e determinanti e le loro relazioni.

La scelta varia a seconda del territorio in esame, come si è evinto dalla letteratura esistente, in parte precedentemente descritta. Infatti, una variabile che ha un grande influenza in una determinata area, può non averne in un'altra regione.

In questo elaborato, la selezione dei fattori predisponenti e determinanti è condotta partendo dall'analisi di studi esistenti in tema di incendi boschivi e dallo studio delle caratteristiche del territorio, nonché delle informazioni territoriali disponibili. Per l'area in esame, quindi, sono scelti cinque fattori predisponenti e determinanti, quali: l'elevazione, la pendenza, l'esposizione, la copertura e l'uso del suolo e la prossimità alla rete stradale.

Su di essi vengono condotte delle analisi statistiche per valutare la loro effettiva influenza rispetto ai dati degli eventi storici disponibili. I valori caratterizzanti ciascun fattore sono poi suddivisi in classi per osservare la eventuale correlazione tra il fattore e la predisposizione del territorio e, in particolare, quali range di valori di ciascun fattore debbano essere considerati nell'individuazione delle aree esposte al passaggio del fuoco. La classificazione è svolta in maniera empirica, testando diversi intervalli di variabilità dei valori e andando a individuare la percentuale di pixel bruciati ricadente nella classe.

Si evidenzia che i fattori predisponenti e determinanti opzionati appartengono alla categoria di parametri di tipo statico: sono cioè indici che descrivono condizioni stabili che favoriscono il verificarsi o il comportamento di un incendio. I fattori in esame, infatti, non cambiano, o meglio, mutano molto lentamente nel tempo (Regione Toscana, 2009).

4.3.1 Dati storici degli incendi

Per costruire l'analisi di suscettività sul territorio in esame, è necessario analizzare i dati storici delle aree percorse dal fuoco per entrambe le porzioni di territorio, italiano e svizzero.

Le informazioni riguardanti gli incendi boschivi per la regione Lombardia vengono raccolte in una banca dati gestita dall'Arma dei Carabinieri, la cui sezione Forestale si occupa di redigere un rapporto dettagliato sull'evento contenente:

- data, ora, località e coordinate dei punti di innesco, causa dell'incendio e relativo tempo di ritorno;
- area percorsa dal fuoco, tipologia di superficie e vegetazione coinvolta;
- durata della fase di spegnimento, con relativo personale e mezzi intervenuti;
- descrizione del territorio coinvolto.

Queste informazioni vengono condivise con Regione Lombardia, garantendo di conseguenza una reportistica periodica sugli incendi, il trasferimento annuale dei dati registrati per ogni evento avvenuto sul territorio e la disponibilità della perimetrazione delle superfici bruciate con i relativi dati in formato digitale.

Per quanto riguarda il Canton Ticino, le informazioni prelevate per ogni evento vengono registrate dai servizi forestali cantonali e, dal 2008, vengono collezionate nella banca dati incendi boschivi della Svizzera (*Swissfire*). I dati elvetici sono stati forniti dalla Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI), nell'ambito di collaborazione per il progetto Gestisco. Le informazioni ticinesi, pur mostrando una struttura dei dati simile a quella resa disponibile dalla regione Lombardia, risultano più complete, includendo informazioni aggiuntive quali la precisione con la quale sono stati raccolti i dati e la tipologia di suolo e vegetazione coinvolte.

Inoltre, i due inventari si riferiscono ad un arco temporale diverso: la regione Lombardia ha reso disponibili i dati dell'ultimo decennio (2009-2018), utilizzati per descrivere l'andamento del fenomeno degli incendi boschivi nella redazione dell'ultimo Piano Antincendio Boschivo (2020-2022); il dataset elvetico invece riguarda un periodo più ampio, che si estende fino agli anni Cinquanta. Per ovvie ragioni, quindi, si è scelto di restringere il campo di indagine all'arco temporale 2009-2018. Quest'ultimo può ritenersi sufficiente a descrivere l'andamento degli incendi, in quanto permette di escludere variazioni del contesto territoriale e socioeconomico, non più rappresentativi della realtà attuale (Regione Lombardia, 2020).

Per uniformare il dataset degli eventi è necessario confrontare gli attributi associati agli incendi del lato italiano e svizzero ed eseguire una selezione di quelli più significativi come la data (formato gg/mm/aaaa), l'area, la causa e le coordinate del punto di innesco. A tal proposito, si evidenzia che i due Stati utilizzano un sistema di riferimento diverso per la visualizzazione

dell'informazione digitale: la Lombardia adotta il sistema di riferimento WGS84 nel sistema di coordinate con proiezione UTM, fuso 32 Nord, mentre il Cantone utilizza l'ellissoide locale di Bessel (1841) a cui è associato il sistema di coordinate CH1903. In conclusione, il dataset ottenuto viene adattato al sistema di riferimento UTM-WGS84.

Dal punto di vista operativo, si sottolinea che le informazioni riguardanti la località, la data e l'ora del primo avvistamento vengono prelevate subito, mentre la perimetrazione delle aree percorse dal fuoco viene eseguita successivamente, anche a distanza di mesi. L'individuazione delle superfici bruciate può avvenire sia attraverso dei sopralluoghi, sia tramite immagini satellitari. Questa metodologia però può portare delle incertezze nella perimetrazione: infatti, se un evento si verifica nel mese di dicembre ed il rilievo viene effettuato a maggio, identificare i segni lasciati dal passaggio del fuoco può rivelarsi una procedura piuttosto complessa.

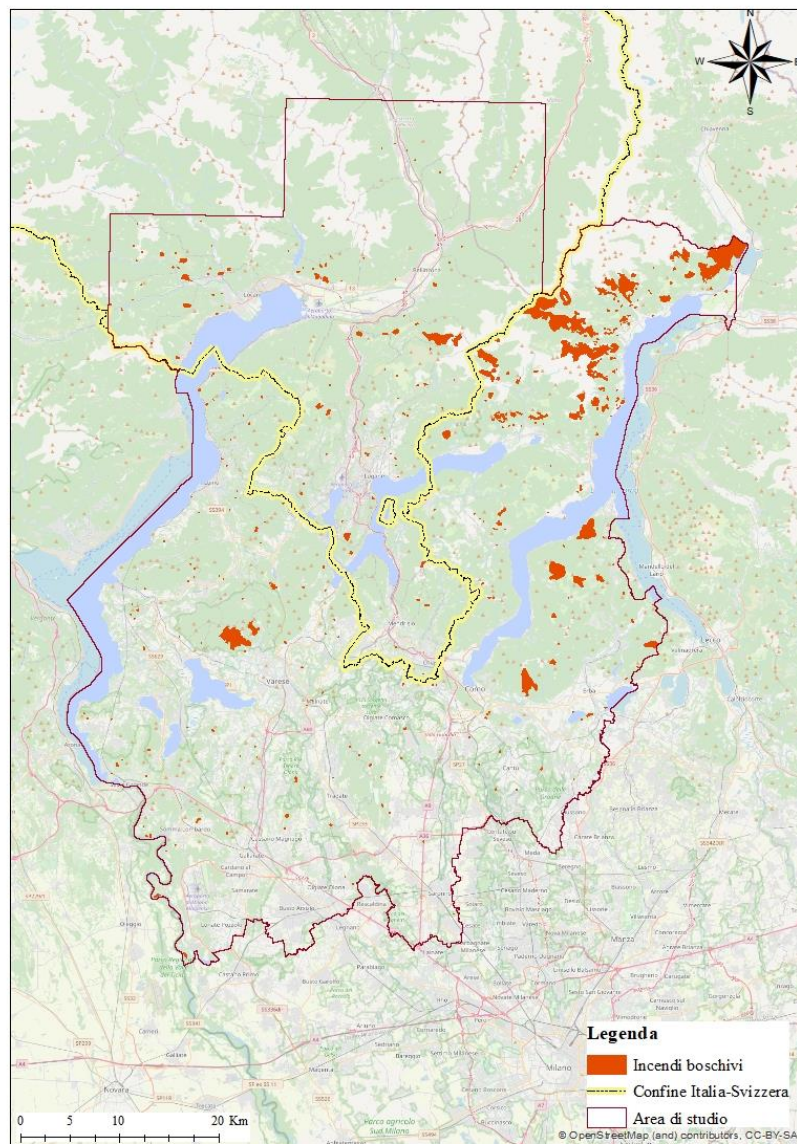


Figura 16: Rappresentazione degli incendi boschivi registrati nell'area di studio per decennio 2009-2018

Tabella 1: Numero di incendi boschivi registrati nell'area di studio nel decennio 2009-2018

	n. incendi boschivi
Area di studio-IT	592
Area di studio-CH	160
Totale	752

Da quanto appena riportato, si evince che gran parte degli eventi (circa il 79%) cade in territorio italiano. D'altra parte, è bene sottolineare che la percentuale di territorio lombardo compresa nell'area di studio è maggiore di quella ticinese, che copre poco meno del 35% della superficie esaminata.

Dalla mappa riportata in Figura 16, è possibile notare come la porzione orientale del territorio in esame sia particolarmente colpita da incendi boschivi, sia per numero che per estensione. In particolare, alcuni di questi eventi sono localizzati in prossimità del confine, dove è quindi importante adottare strategie di gestione integrata del rischio incendio.

Per analizzare in modo più approfondito il set di dati a disposizione, vengono eseguite delle analisi riguardo il numero di occorrenze e la relativa estensione.

Tabella 2: Numero di incendi boschivi registrati annualmente e relativa area bruciata rilevati nel territorio di progetto nel decennio 2009-2018

Anno	Area di studio		Area di studio-IT		Area di studio-CH	
	n. incendi boschivi	Area bruciata [km ²]	n. incendi boschivi	Area bruciata [km ²]	n. incendi boschivi	Area bruciata [km ²]
2009	55	1.53	42	1.13	13	0.40
2010	53	4.36	39	4.30	14	0.07
2011	99	5.82	82	5.02	17	0.80
2012	126	5.38	110	5.12	16	0.26
2013	60	2.13	49	1.91	11	0.22
2014	57	2.79	46	2.50	11	0.29
2015	87	13.01	60	12.75	27	0.26
2016	69	7.55	51	5.34	18	2.21
2017	100	21.23	78	20.59	22	0.64
2018	46	10.19	35	9.73	11	0.46
Totale	752	73.99	592	68.39	160	5.60

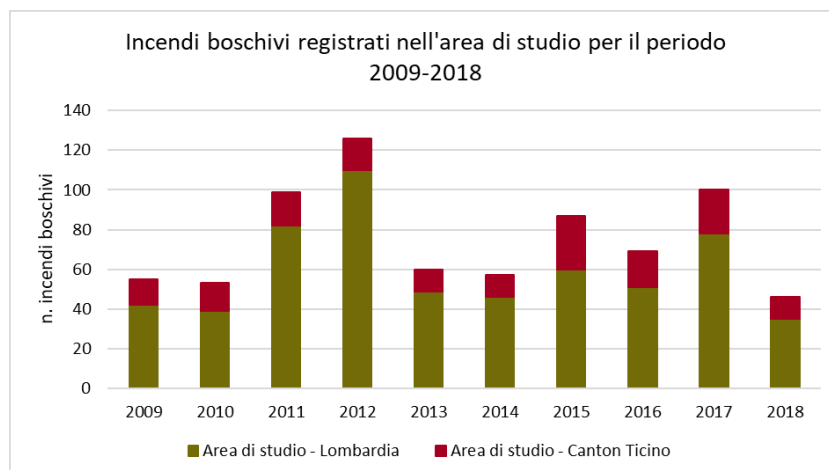


Figura 17: Andamento annuale del numero di incendi boschivi registrati nel periodo 2009-2018 nella porzione lombarda (in verde) e ticinese (in rosso) dell'area di studio

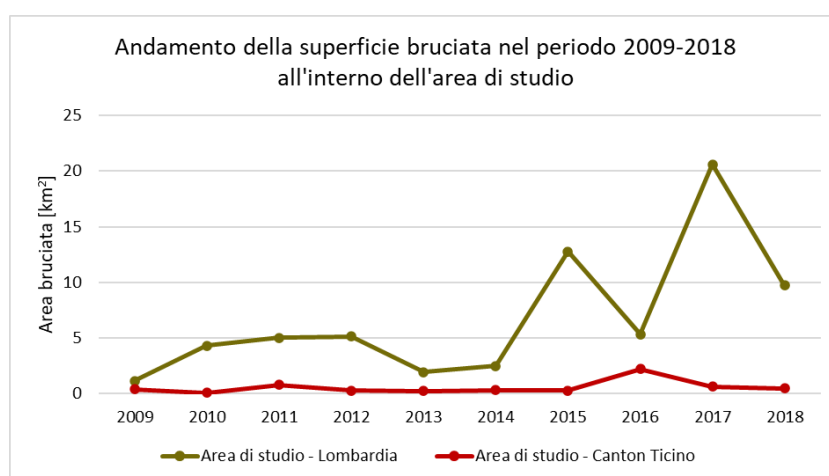


Figura 18: Andamento annuale delle aree percorse dal fuoco relativo al periodo 2009-2018 nella porzione lombarda (in verde) e ticinese (in rosso) dell'area di studio

In generale, osservando il numero di incendi boschivi registrati sul territorio in esame, si evince che il 2012 è stato l'anno peggiore dal punto di vista della quantità degli eventi rilevati. In realtà, l'aumento caratterizza esclusivamente la porzione italiana dell'area di studio (rappresentata in verde sul grafico): infatti, dei 126 incendi verificati solo 16 cadono nel territorio ticinese, dato non troppo diverso da quelli riportati per gli altri anni.

Il 2018, al contrario, si presenta con il più basso numero di occorrenze registrate nel decennio considerato. Tale decremento si osserva per entrambe le porzioni italiana e svizzera, colpite rispettivamente da 35 ed 11 eventi.

Tuttavia, questi risultati assumono tutt'altro significato se associati alla superficie annuale percorsa dal fuoco, in modo da avere una misura dell'impatto degli incendi sul territorio in esame. In primo luogo, risulta evidente come il lato ticinese sia caratterizzato da eventi di modesta estensione, per i quali si osserva un solo picco pari a 2.21 km² nell'anno 2016.

Contrariamente, nella porzione lombarda la situazione è completamente diversa: nel decennio considerato la superficie bruciata tende ad aumentare notevolmente, raggiungendo un massimo di 20.6 km² nel 2017. Un dato interessante si riscontra per l'anno 2012: l'elevato numero di incendi avvenuti è associato ad una superficie bruciata contenuta, che risulta essere perfino minore di quella rilevata per il 2018.

Oltre alla distribuzione annuale degli eventi, si esegue un'ulteriore analisi riguardante la loro suddivisione mensile.

Tabella 3: Distribuzione mensile del numero di incendi boschivi e della relativa area bruciata rilevati nell'area di studio nel decennio 2009-2018

Mese	Area di studio		Area di studio-IT		Area di studio-CH	
	n. incendi boschivi	Area bruciata [km2]	n. incendi boschivi	Area bruciata [km2]	n. incendi boschivi	Area bruciata [km2]
Gennaio	64	4.71	54	4.44	10	0.28
Febbraio	71	2.95	58	2.86	13	0.09
Marzo	215	12.07	185	11.21	30	0.86
Aprile	195	27.92	167	26.89	28	1.03
Maggio	34	1.97	29	1.88	5	0.09
Giugno	14	0.14	5	0.12	9	0.02
Luglio	29	0.49	14	0.27	15	0.23
Agosto	27	0.29	13	0.21	14	0.09
Settembre	8	0.00	5	0.00	3	0.00
Ottobre	22	8.07	14	7.95	8	0.12
Novembre	16	0.51	11	0.37	5	0.13
Dicembre	57	14.86	37	12.18	20	2.68
Totale	752	73.99	592	68.39	160	5.24

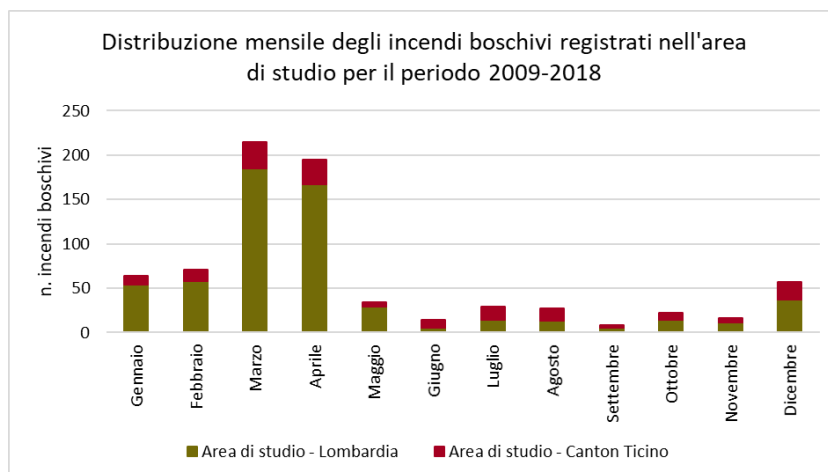


Figura 19: Distribuzione mensile del numero di incendi boschivi registrati nel periodo 2009-2018 nella porzione lombarda (in verde) e ticinese (in rosso) dell'area di studio

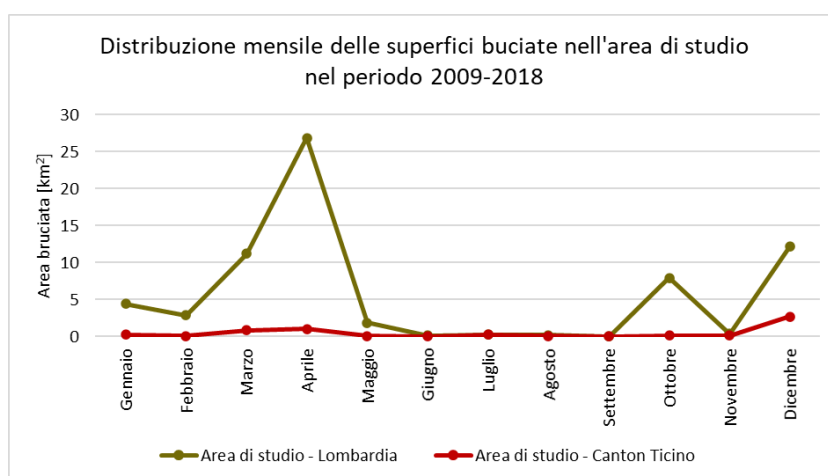


Figura 20: Andamento mensile dell'area percorsa dal fuoco relativo al periodo 2009-2018 nella porzione lombarda (in verde) e ticinese (in rosso) dell'area di studio

Osservando il numero di eventi rilevati per mese, appare evidente che l'area di studio sia interessata da un regime di incendi invernale e primaverile: infatti i mesi più critici risultano essere marzo ed aprile. Ancora una volta è necessario fare una distinzione tra il caso italiano e quello svizzero: se il primo è caratterizzato dalla quasi assenza di eventi nel periodo estivo, il secondo è contraddistinto da una maggiore omogeneità nella distribuzione mensile degli incendi, sebbene mostrino una leggera preferenza per la stagione invernale.

È importante considerare che in generale un regime di incendi invernale si rivela più dannoso in termini di vegetazione percorsa dal fuoco. Infatti, nel caso in cui la flora venga colpita nella fase di riposo vegetativo, potrebbe non essere in grado di recuperare le proprie funzioni per la stagione successiva (Bovio, 2010).

Ragionando in termini di superfici percorse dal fuoco, è possibile confermare il regime invernale-primaverile di incendi boschivi e notare nuovamente la netta distinzione tra la vasta

estensione degli eventi avvenuti sul lato italiano rispetto a quelli svizzeri. Per il primo, la situazione peggiore si riscontra in corrispondenza del mese di aprile, con poco meno di 27 km² di area bruciata; nel caso ticinese invece, il mese più critico risulta essere quello di dicembre, con 2.7 km² di superficie percorsa dalle fiamme.

4.3.2 Dati morfologici

La configurazione morfologica locale, ai fini della suscettività da incendio boschivo, viene descritta attraverso i dati di elevazione, pendenza ed esposizione. La morfologia costituisce uno dei più importanti aspetti che si lega al clima di una regione, tra cui le condizioni meteorologiche e le variabili spazio-temporali quali temperatura dell'aria, precipitazione, radiazione solare. Questi aspetti influiscono sul ciclo di vita della copertura del suolo, esercitando quindi una forte influenza sull'incidenza del fuoco (Leuenberger, Parente, Tonini, Gonzalez Pereira, & Kanevski, 2018).

L'elevazione viene descritta attraverso l'uso di un modello digitale del terreno (DTM), cioè una matrice le cui celle contengono i valori di quota in metri sul livello del mare [m s.l.m.]. In questo caso, le informazioni memorizzate nel grigliato indicano l'elevazione della superficie terrestre senza gli oggetti antropici e vegetazionali.

Lo strumento utilizzato per la visualizzazione di questo formato di dati è il software ArcMap 10.7, componente principale del pacchetto ArcGIS di Esri, attraverso il quale è stato possibile realizzare anche le future rappresentazioni.

L'area di studio è inquadrata da due modelli digitali del terreno, uno italiano e uno svizzero, che sono stati fusi in un unico dataset. Il dato italiano utilizzato è disponibile tra le informazioni erogate online della Regione Lombardia, accessibili attraverso il Geoportale regionale.

Le informazioni elvetiche sono realizzate dall'Ufficio Federale di Topografia Swisstopo e fornite dalla Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI), nell'ambito di collaborazione per il progetto Gestisco.

La Lombardia adotta un passo di campionamento pari a 5 metri ed il sistema di riferimento WGS84 nel sistema di coordinate con proiezione UTM, fuso 32 Nord. Il Cantone Ticino utilizza un grado di dettaglio superiore, con celle di dimensione 2m x 2m e l'ellissoide locale di Bessel (1841) a cui è associato il sistema di coordinate CH1903. Per l'integrazione delle informazioni dei due Stati, si è optato per una risoluzione di 5 metri e il sistema di riferimento UTM-WGS84.

Le quote del terreno rappresentano il primo fattore predisponente analizzato in questo elaborato ed in quanto tale viene distribuito su cinque classi, seguendo la zonazione verticale del territorio in esame, nota anche con il termine di piani altitudinali (Figura 21).

I limiti superiori delle classi seguono quanto proposto dall'Istituto nazionale di statistica (Istat)³. Infatti, la prima comprende valori tra 0 e 300 metri s.l.m. che definiscono le aree di pianura, mentre la seconda varia tra 300 e 700 metri s.l.m. rappresentando la parte collinare del territorio in esame.

La porzione montuosa invece è distribuita su diverse classi, in funzione delle analisi fitogeografiche⁴ svolte per la vegetazione italiana. La terza classe, per il territorio in esame, è descritta dal range di quota tra 700 e 1500 m s.l.m., definito come piano montano inferiore, costituito principalmente da boschi di latifoglie. Il quarto intervallo viene rappresentato dal piano montano superiore, compreso tra i 1500 m s.l.m. e i 2000 m s.l.m., caratterizzato dai boschi di conifere (Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura, 2003). Per quote superiori si definisce il piano alpino: esso è compreso tra il limite superiore della vegetazione arborea e il limite superiore dei prati continui. Al di sopra dei 3000 m s.l.m. si definisce il piano nivale: il suolo è ricoperto da nevi non perenni, le quali si sciolgono nei mesi estivi e la superficie assume una configurazione a copertura discontinua, caratterizzata da vegetazione ipsofila (Blasi & Biondi, 2017). Tuttavia, per il caso in esame, la fascia più alta è quella alpina in quanto la quota massima presente nell'area di studio è pari a 2955 m s.l.m..

³ Classificazione per fini statistici di zona altimetrica, di collina, di montagna e di pianura definita nella pubblicazione delle "Circoscrizioni statistiche, Metodi e norme, serie C - n. 1 agosto 1958".

⁴ La fitogeografia è la scienza che studia i tipi e la distribuzione geografica delle piante e delle loro comunità, nonché delle cause di diversificazione delle maggiori comunità vegetali.

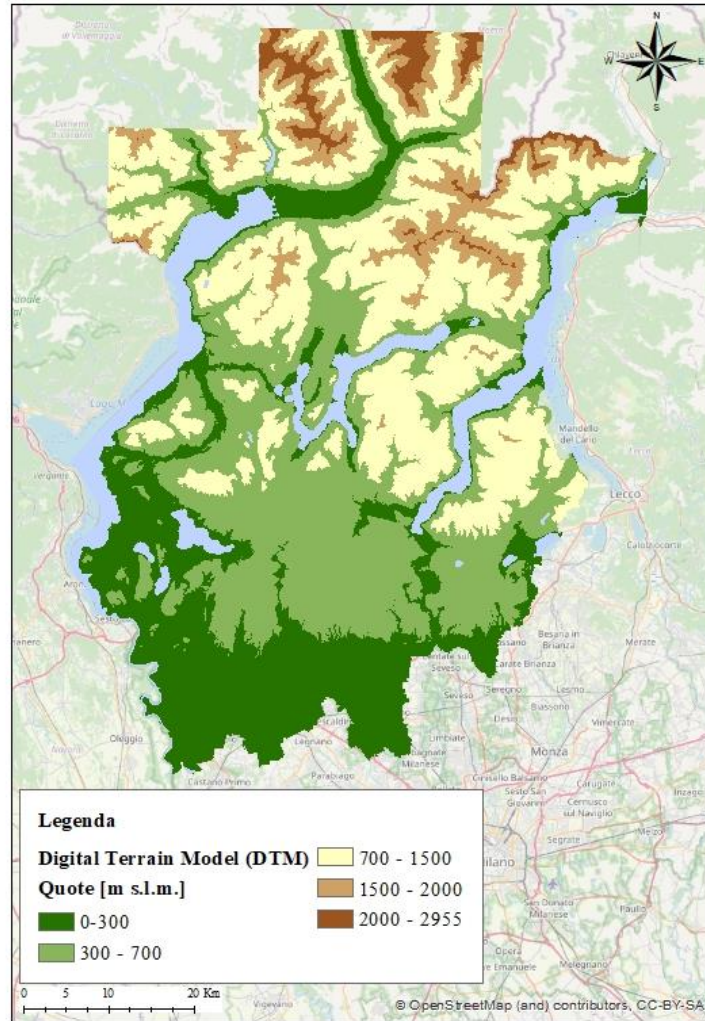


Figura 21: Rappresentazione del modello digitale del terreno (DTM) dell'area di studio

Dalla Tabella 4 è possibile evincere che oltre il 60% dei pixel bruciati ricade nella fascia dei rilievi collinari di bassa quota compresa tra i 300 e i 700 metri, circa il 20% in quella caratterizzata da altimetrie maggiori e poco più del 15% nella fascia di collina, mentre nella prima e nell'ultima classe si osservano valori percentuali poco rilevanti.

Tabella 4: Percentuali di pixel per ciascuna classe di quota sul territorio in esame e sulle aree bruciate

Quota	Area Totale	Aree Bruciate
Classe [m]	% pixel	% pixel
0-300	25.24	1.80
300-700	34.33	15.91
700-1500	30.13	61.19
1500-2000	7.82	19.63
2000-2955	2.49	1.46

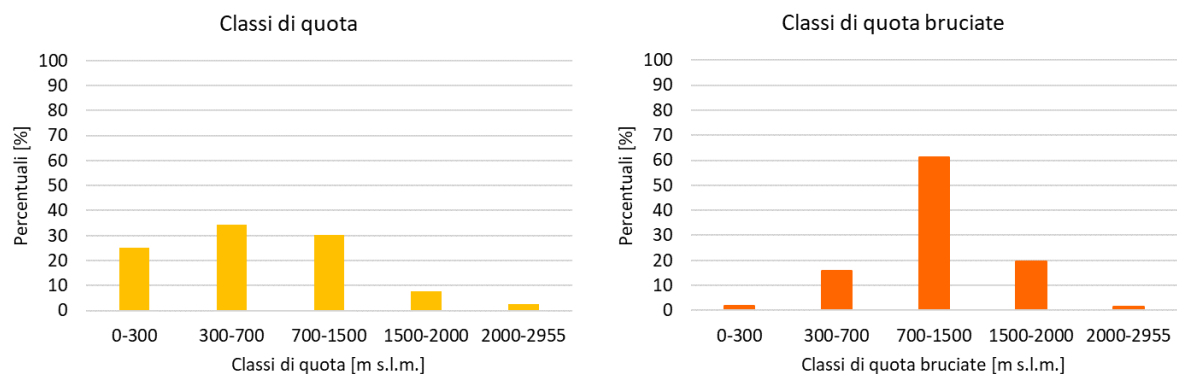


Figura 22: Percentuali riferite ai pixel presenti sul territorio e per le aree bruciate per classe di quota

Una volta che si ha a disposizione il DTM, è possibile utilizzarlo come file di input per ricavare le informazioni riguardanti le pendenze caratteristiche e l'esposizione. I file che si ottengono sono in formato raster, le cui celle contengono il valore di pendenza (in gradi) ed esposizione (in gradi).

La pendenza viene rappresentata come la percentuale di variazione dell'elevazione per ogni cella del modello digitale del terreno, calcolata come il rapporto tra la differenza di quota tra una cella e quella adiacente e la distanza tra i centri delle due celle. In questo elaborato, l'informazione è espressa in gradi, compresa tra 0° e 90°.

La pendenza del territorio è di particolare interesse nello studio degli incendi boschivi in quanto influenza la velocità di propagazione del fenomeno. Alcuni autori hanno evidenziato che in un versante caratterizzato da inclinazione compresa tra 10° e 15° la velocità risulta essere doppia rispetto ad una superficie piana, quadrupla se l'inclinazione è di 25° (Blasi, Bovio, Corona, Marchetti, & Maturani, 2004). Infatti, la pendenza di un versante favorisce lo sviluppo dell'effetto camino, cioè il movimento ascensionale convettivo di masse d'aria che causa il preriscaldamento, per apporto di calore esterno, dei materiali verso la cima. Di conseguenza, si osserva l'avanzamento del fuoco verso l'alto nelle porzioni dove il terreno subisce un aumento della temperatura e la perdita del suo contenuto d'acqua. Inoltre, la pendenza provoca l'inclinazione della fiamma, avvicinandola al combustibile di monte che subisce riscaldamento per irraggiamento (Janbaz Ghobadi, Gholizadeh, & Majidi Dashliburun, 2012).

La suddivisione in classi adottata dalla letteratura esistente, per il fattore predisponente della pendenza, mostra un'ampia variabilità di scelte (Jaiswal, Mukherjee, Raju, & Saxena, 2002) (Janbaz Ghobadi, Gholizadeh, & Majidi Dashliburun, 2012) (Verde & Zêzere, 2010) (Pourtaghi, Pourghasemi, Aretano, & Semeraro, 2016). Le alternative proposte non

suggeriscono un'indicazione univoca sulla modalità di costruzione delle classi, in quanto probabilmente si adattano al loro contesto di applicazione.

In questa sede, si è deciso di comporre cinque classi di pendenza per quantile, il quale consente la suddivisione del territorio in esame in range di uguale numerosità. Questa scelta è adottata al fine di valutare i pesi sulla base della distribuzione dei soli eventi osservati, senza che questi vengano influenzati dall'ampiezza della classe. Il primo intervallo raccoglie la porzione di territorio pianeggiante tra 0° e 2.5°, il secondo da 2.5° a 13°, il terzo tra 13° e 27°, il quarto tra 27° e 37° ed infine l'ultimo per pendenze superiori a 37° (Figura 23 e Figura 24).

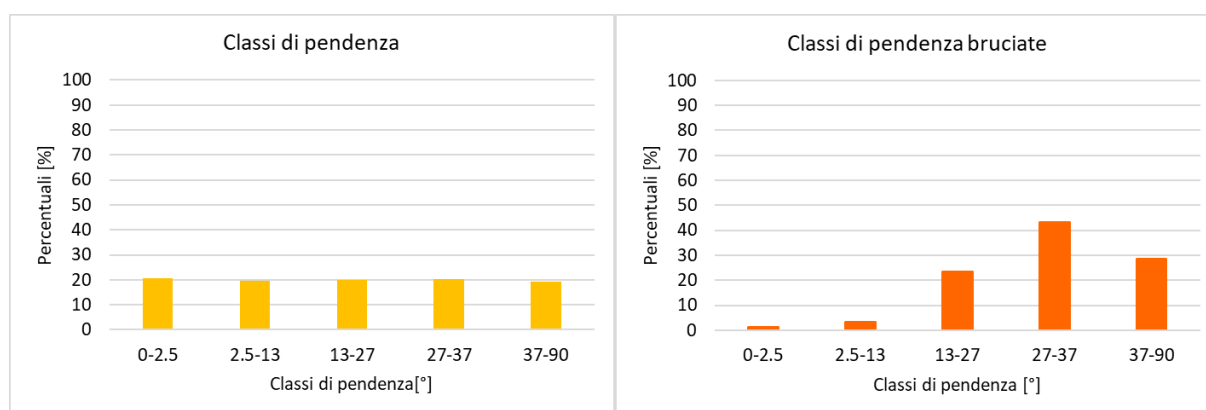


Figura 23: Percentuali riferite ai pixel presenti sul territorio e per le aree bruciate per classe di pendenza

Come si evince dalla Figura 23 e dai risultati riportati in Tabella 5, i valori di interesse di pendenza dei pixel delle aree percorse dal fuoco corrispondono a quelli maggiori di 13 gradi, quindi le ultime tre classi analizzate.

Tabella 5: Percentuali di pixel per ciascuna classe di pendenza sul territorio in esame e sulle aree bruciate

Pendenza	Area Totale	Aree Bruciate
Classe [°]	% pixel	% pixel
0-2.5	20.69	1.42
2.5-13	19.75	3.26
13-27	19.92	23.46
27-37	20.41	43.34
37-90	19.23	28.51

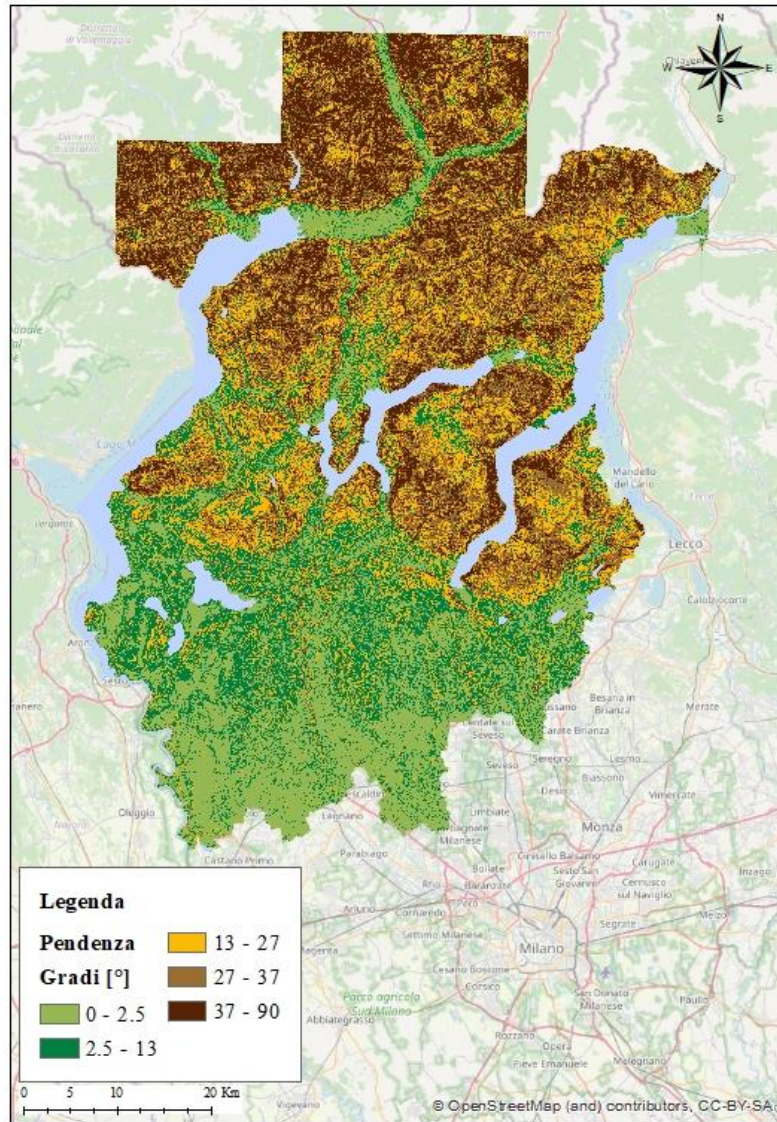


Figura 24: Rappresentazione del fattore predisponente di pendenza (Slope) dell'area di studio

Un altro aspetto topografico di interesse per lo studio degli incendi boschivi è l'esposizione, cioè la direzione verso cui è rivolto un versante, che condiziona l'insolazione del territorio. Questo aspetto si riferisce quindi alla quantità di radiazione solare che esso riceve che influisce sulla temperatura locale, il contenuto umido del suolo e la circolazione di masse d'aria (Janbaz Ghobadi, Gholizadeh, & Majidi Dashliburun, 2012).

Dal modello digitale del terreno è possibile ottenere la mappa dell'esposizione di un territorio, la quale contiene l'informazione in gradi della misura della direzione verso cui guarda un pendio rispetto nord. Nella Figura 25 si presenta la mappa dell'esposizione dell'area di studio.

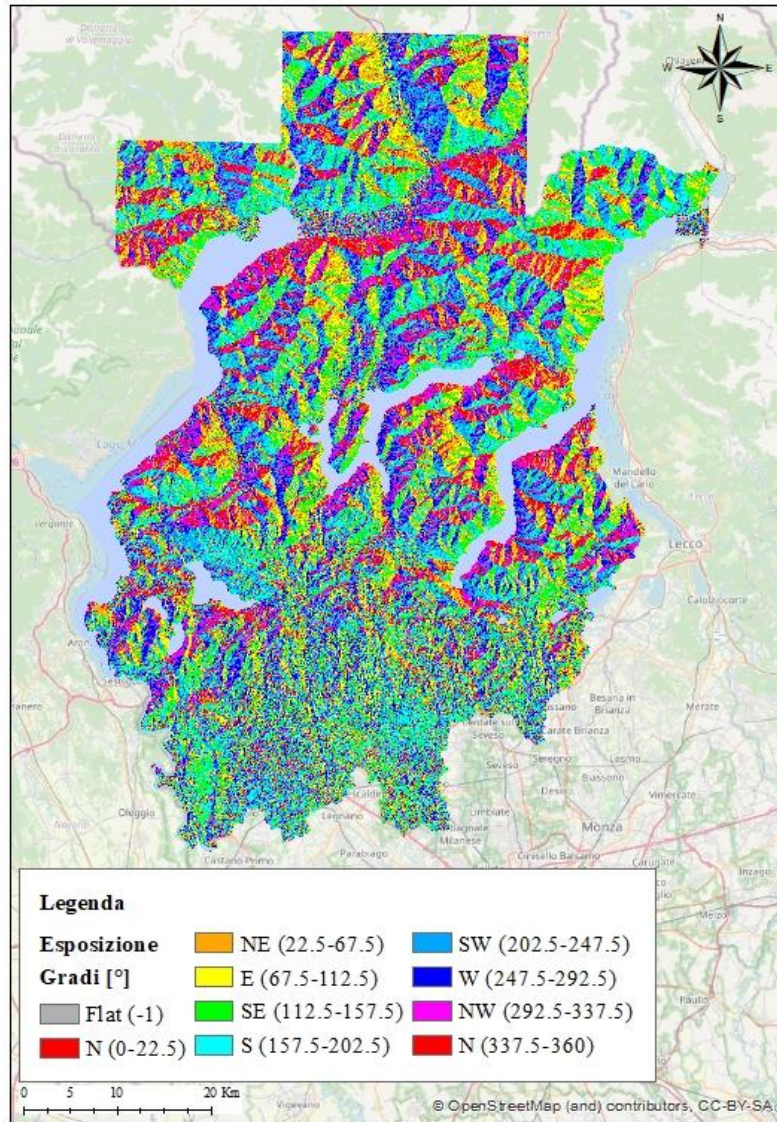


Figura 25: Rappresentazione del fattore predisponente di esposizione (Aspect) dell'area di studio

Il territorio in esame presenta una distribuzione pressoché uniforme tra le classi di esposizione da 0° a 360°, mentre la porzione occupata dalle aree piane (*flat*) può essere considerata trascurabile. Quest'ultimo aspetto è confermato anche per le aree percorse dal fuoco, per le quali però si osserva una diversa distribuzione percentuale delle celle caratterizzate da esposizione variabile nel quadrante Sud.

Nella relativa uniformità del dato è possibile evidenziare che le classi di esposizione maggiormente interessate dal fenomeno in esame coincidono con le celle rivolte verso Sud, Sudest e Sudovest (Tabella 6 e Figura 26). Questa informazione conferma la tesi per cui i versanti esposti a Sud sono più caldi e secchi in quanto ricevono localmente più radiazione solare. I versanti esposti a Sud sono quindi caratterizzati da temperature elevate, venti forti e

umidità inferiore, che rendono il suolo più propenso all'innesco di un incendio (Lin & Rinaldi, 2009) (Blasi, Bovio, Corona, Marchetti, & Maturani, 2004).

Tabella 6: Percentuali di pixel per ciascuna classe di esposizione sul territorio in esame e sulle aree bruciate

Esposizione		Area Totale	Aree Bruciate
Direzione	Classe [°]	% pixel	% pixel
Flat	-1-0	0.21	0.14
N	0-22.5	9.99	5.17
	337.5-360		
NE	22.5-67.5	10.23	6.78
E	67.5-112.5	12.74	13.48
SE	112.5-157.5	14.58	20.79
S	157.5-202.5	14.99	22.48
SW	202.5-247.5	14.02	18.27
W	247.5-292.5	12.55	7.67
NW	292.5-337.5	10.70	5.21

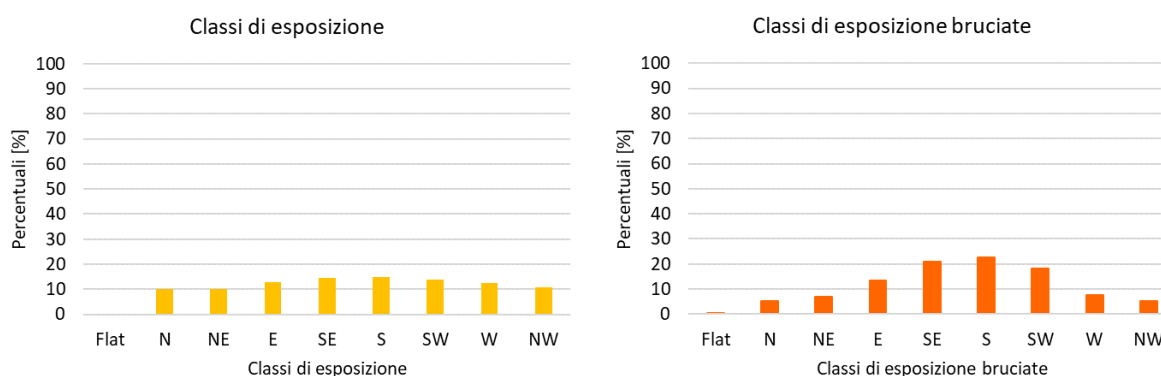


Figura 26: Percentuali riferite ai pixel presenti sul territorio e per le aree bruciate per classe di esposizione

4.3.3 Dati di copertura del suolo

La descrizione del territorio di studio dal punto di vista di uso e copertura del suolo fa riferimento alla classificazione proposta dal progetto Corine Land Cover (CLC). Questa iniziativa nasce a livello europeo per il rilevamento e il monitoraggio delle caratteristiche di copertura e uso del suolo, con prima strutturazione nel 1985. Il Consiglio delle Comunità Europee vara il programma CORINE (*COoRdination of INformation on the Environment*) per dotare l'Unione Europea, gli Stati associati e i paesi limitrofi all'area mediterranea e balcanica di informazioni territoriali omogenee sullo stato dell'ambiente, utilizzando lo stesso grado di dettaglio e adottando quindi una scala 1:100'000.

Lo scopo principale dell'iniziativa è di verificare dinamicamente lo stato dell'ambiente nell'area comunitaria, al fine di fornire supporto per lo sviluppo di politiche comuni, controllarne gli effetti e proporre eventuali soluzioni correttive. Per questo motivo è scelto come dato di copertura del suolo per l'area transfrontaliera, sposando gli scopi del progetto Gestisco e garantendo quindi un quadro completo e omogeneo.

Il programma CORINE realizza un sistema informativo sullo stato dell'ambiente al quale associa una convenzione di nomenclatura e metodologia di lavoro per la creazione del database Corine Land Cover (CLC). La produzione dei dati e gli aggiornamenti sono affidati all'Agenzia Europea per l'ambiente (EEA) e realizzati all'interno dell'ambito *Land* del programma Copernicus. In questo elaborato è utilizzata la copertura Corine Land Cover del 2018, anno in cui è stato eseguito il suo ultimo aggiornamento, effettuato con nuove immagini satellitari provenienti da Sentinel-2 e da Landsat 8.

I prodotti del CLC sono basati sulla fotointerpretazione di immagini acquisite dai satelliti per l'osservazione della terra, seguendo una metodologia e nomenclatura standard che produce un numero di classi di uso e copertura del suolo, dipendente dal grado di dettaglio adottato. Nel caso in cui il risultato venga prodotto a tre livelli di approfondimento, il numero di classi totali è pari a 44, così distribuite: 5 classi per il primo livello, 15 per il secondo livello ed appunto 44 per il terzo. Esse vengono identificate attraverso un codice numerico a tre cifre, esattamente quanti sono i livelli di dettaglio. Per esempio, la prima cifra, da sinistra, indica una delle cinque classi del primo livello e può avere valore da 1 a 5, indicando, rispettivamente, le superfici artificiali, le aree agricole, le foreste e le aree semi-naturali, le zone umide ed infine i corpi idrici. Adottando lo stesso criterio, vengono assegnati gli altri valori numerici per completare l'identificativo a tre cifre.

La copertura del suolo del territorio transfrontaliero preso in esame viene descritta attraverso 26 classi totali, che interessano tutte le cinque suddivisioni del primo livello e rispettano la classificazione fino al terzo livello di dettaglio; quindi le celle del file raster della copertura del suolo contengono il codice a tre cifre (Tabella 7).

Per quanto riguarda il formato, invece, ci si riferisce ad un grigliato con celle di passo pari a 100m x 100m. Per uniformare il dato ai precedenti fattori predisponenti è necessario eseguire un ricampionamento, impostando la dimensione delle celle a 5m x 5m.

Tabella 7: Codici utilizzati per descrivere la copertura del suolo (Corine Land Cover 2018)

LEGENDA			
I livello	II livello	III livello	
Nome	Nome	Codice	Nome
Superfici Artificiali	Zone urbanizzate residenziali	1.1.1	Zone residenziali a tessuto continuo
		1.1.2	Tessuto urbano discontinuo
	Zone industriali, commerciali ed infrastrutturali	1.2.1	Aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici e privati
		1.2.2	Reti stradali, ferrovie e infrastrutture tecniche
		1.2.4	Aeroporti
	Zone estrattive, cantieri, discariche e terreni artefatti abbandonati	1.3.1	Aree estrattive
	Zone verdi artificiali e non agricole	1.4.1	Aree verdi urbane
		1.4.2	Aree ricreative sportive
Superfici Agricole Utilizzate	Seminativi	2.1.1	Terreni arabili in aree non irrigue
	Colture permanenti	2.2.1	Vigneti
	Prati stabili	2.3.1	Superfici a copertura erbacea
	Zone agricole eterogenee	2.4.2	Sistemi colturali e particellari complessi
		2.4.3	Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti
Territori Boscati e Ambienti Semi-naturali	Zone boscate	3.1.1	Bosco di latifoglie
		3.1.2	Boschi di conifere
		3.1.3	Boschi misti di latifoglie e conifere
	Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	3.2.1	Aree a pascolo naturale e praterie
		3.2.2	Brughiere e cespuglieti
		3.2.4	Vegetazione in evoluzione
	Zone aperte con vegetazione rada o assente	3.3.1	Spiagge, dune, sabbie
		3.3.2	Rocce nude
		3.3.3	Aree a vegetazione rada
Zone umide	Zone umide interne	4.1.1	Ambienti umidi fluviali
		4.1.2	Torbiere
Corpi Idrici	Acque continentali	5.1.1	Corsi d'acqua e canali e idrovie
		5.1.2	Bacini d'acqua

In Figura 27 viene rappresentata l'area di studio e le percentuali dei pixel che la caratterizzano per ogni classe di CLC sono collezionate nella Tabella 8. Il territorio in esame presenta una importante porzione di zone boscate e in particolare di boschi di latifoglie. A seguire, si trova una elevata percentuale di territorio classificato come tessuto urbano discontinuo, per poi tornare alle classi che indicano la presenza di territori agricoli, "verdi" e naturali. Una percentuale rilevante per il territorio italo-svizzero è riferita alla presenza di corpi idrici estesi. Da est a ovest si osservano il lago di Como, il lago di Lugano, il lago Maggiore e il lago di Varese, insieme a bacini minori come il lago di Pusiano (CO-LC), il lago di Alserio (CO), il lago di Comabbio (VA) e il lago di Monate (VA).

Tabella 8: Percentuale di esistenza sul territorio in esame delle classi di copertura del suolo (CLC 2018)

Nome della classe del III livello	Codice	Percentuale [%]
Zone residenziali a tessuto continuo	1.1.1	0.45
Tessuto urbano discontinuo	1.1.2	14.43
Aree industriali, commerciali e dei servizi pubblici e privati	1.2.1	2.09
Reti stradali, ferrovie e infrastrutture tecniche	1.2.2	0.08
Aeroporti	1.2.4	0.44
Aree estrattive	1.3.1	0.20
Aree verdi urbane	1.4.1	0.09
Aree ricreative sportive	1.4.2	0.21
Terreni arabili in aree non irrigue	2.1.1	5.66
Vigneti	2.2.1	0.08
Superfici a copertura erbacea	2.3.1	0.72
Sistemi colturali e particellari complessi	2.4.2	0.53
Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti	2.4.3	6.87
Bosco di latifoglie	3.1.1	34.79
Boschi di conifere	3.1.2	5.41
Boschi misti di latifoglie e conifere	3.1.3	9.55
Aree a pascolo naturale e praterie	3.2.1	3.82
Brughiere e cespuglieti	3.2.2	1.15
Vegetazione in evoluzione	3.2.4	2.75
Spiagge, dune, sabbie	3.3.1	0.02
Rocce nude	3.3.2	0.65
Aree a vegetazione rada	3.3.3	2.02
Ambienti umidi fluviali	4.1.1	0.11
Torbiere	4.1.2	0.08
Corsi d'acqua e canali e idrovie	5.1.1	0.09
Bacini d'acqua	5.1.2	7.71

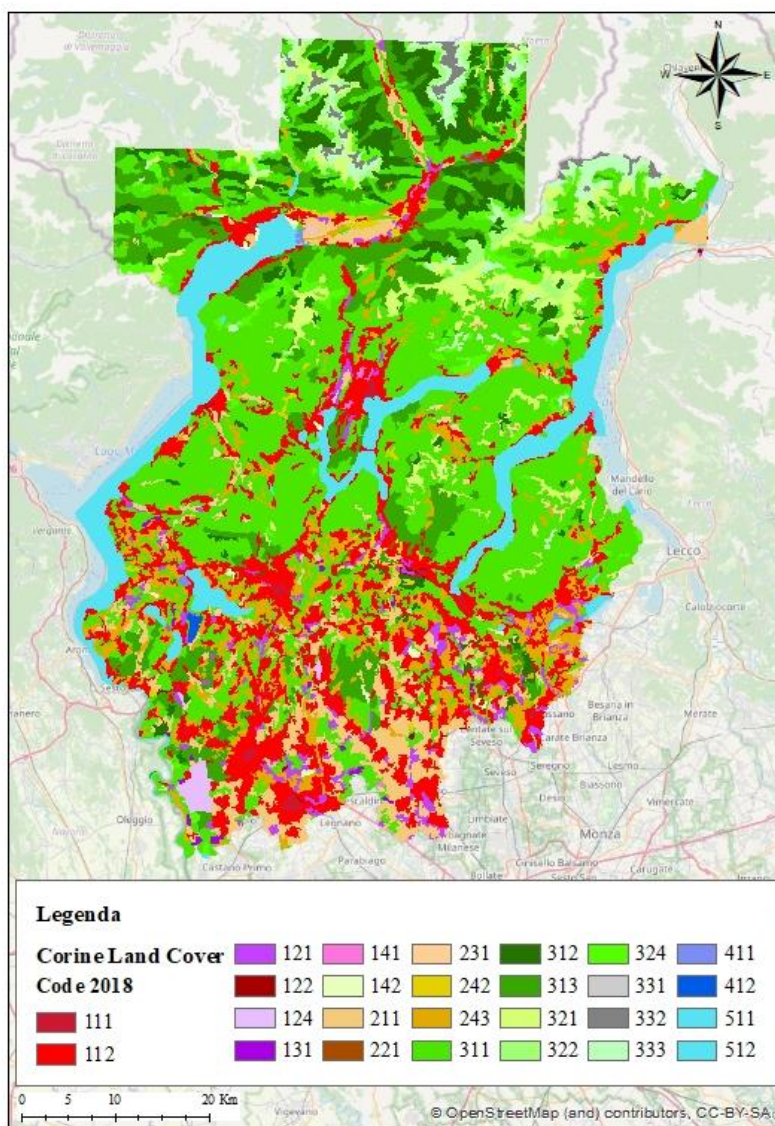


Figura 27: Rappresentazione delle classi di copertura del suolo (Corine Land Cover 2018) dell'area di studio

Le classi di copertura del suolo delle aree percorse dal fuoco sono riportate in Figura 28, in cui è rappresentato il valore percentuale dei pixel di ciascuna classe rispetto al totale bruciato. La maggior parte degli incendi si sviluppano nelle zone boscate caratterizzate da boschi di latifoglie e nelle aree a pascolo naturale e praterie. Successivamente una buona percentuale di area bruciata riguarda le porzioni di territorio classificate come aree a vegetazione rada, in evoluzione e zone boscate con presenza mista di latifoglie e conifere.

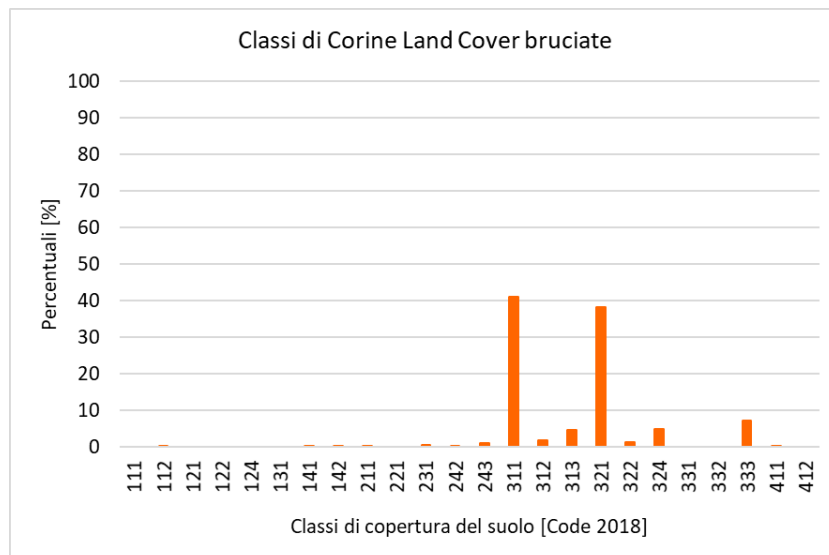


Figura 28: Percentuale dei pixel bruciati sul territorio per classe di copertura del suolo (Corine Land Cover 2018) dell'area di studio

In conclusione, le classi di copertura del suolo più interessate dal fenomeno in esame sono quelle appartenenti alla terza categoria del primo livello di dettaglio, cioè i terreni boscati e ambienti semi-naturali.

La dimensione e la quantità di combustibile dipendono dalle caratteristiche della vegetazione, quali la tipologia, struttura e distribuzione spaziale, i quali esercitano anche la loro influenza sulla propagazione del fuoco (Regione Lombardia, 2017).

Inoltre, la disponibilità del combustibile si lega alla fase di crescita della vegetazione e quindi alla stagionalità degli eventi stessi. Vengono prodotti, quindi, i grafici in Figura 29 e Figura 30 in cui viene adottata la suddivisione in soli due intervalli temporali proposta dalla letteratura (Blasi, Bovio, Corona, Marchetti, & Maturani, 2004). In particolare, la stagione definita come invernale corrisponde al periodo compreso tra il 1° ottobre e il 31 marzo, mentre quella estiva al periodo dal 1° aprile al 30 settembre.

Inoltre, la disponibilità del combustibile si lega alla fase di crescita della vegetazione e quindi alla stagionalità degli eventi stessi. Vengono prodotti, quindi, i grafici in Figura 29 e Figura

30 in cui viene adottata la suddivisione in soli due intervalli temporali proposta dalla letteratura (Blasi, Bovio, Corona, Marchetti, & Maturani, 2004). In particolare, la stagione definita come invernale corrisponde al periodo compreso tra il 1° ottobre e il 31 marzo,

mentre quella estiva al periodo dal 1° aprile al 30 settembre.

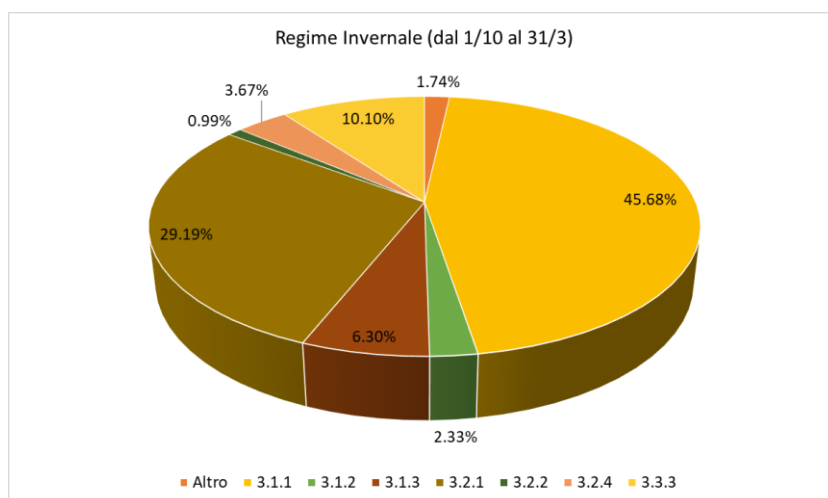


Figura 29: Rappresentazione percentuale degli incendi del periodo invernale (dal 1/10 al 31/3)

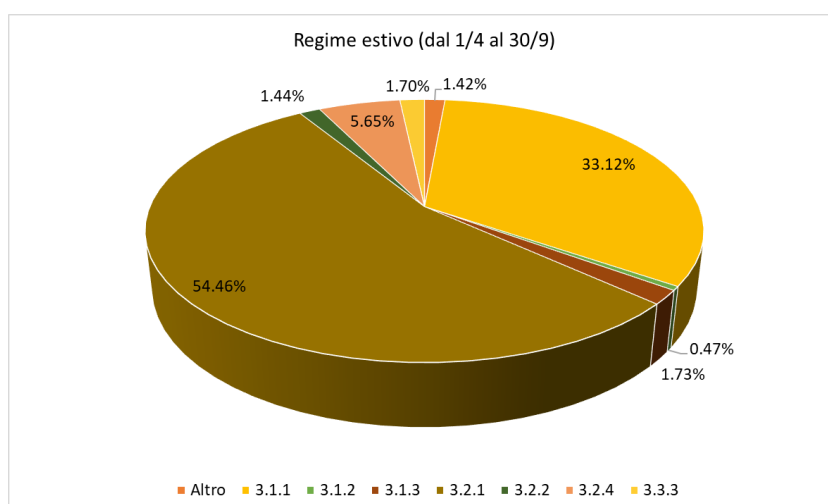


Figura 30: Rappresentazione percentuale degli incendi del periodo estivo (1/4 al 30/9)

In generale, circa il 64% del totale di pixel bruciati è interessato dal fenomeno nel periodo invernale mentre la restante parte riguarda gli incendi di regime estivo. Questo dato conferma ulteriormente le criticità già evidenziate per l'area di studio e la necessità di uno studio approfondito sul tema degli incendi boschivi invernali, in particolare per le diverse classi di copertura del suolo. Da quanto rappresentato nelle predette figure, infatti, si evince un aspetto rilevante riguardante la proporzione tra le aree boscate e non boscate percorse dal fuoco. Nella stagione invernale tra le superfici percorse dal fuoco prevalgono quelle boscate, a differenza di quanto accade per le stagioni estive in cui le zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea risultano maggiormente interessate dal fenomeno in esame. Ad esempio, le aree dedicate al pascolo risentono dell'andamento climatico, degli effetti di prolungati periodi di

siccità e del carico animale (Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare). Esse sono caratterizzate da rapida diffusibilità dei fronti di fiamma in quanto la velocità del vento non è rallentata dalla copertura arborea o arbustiva, causando quindi alti valori di velocità di propagazione.

Si specifica, inoltre, che le classi rappresentanti spiagge, dune, sabbie e rocce nude non sono ovviamente interessate da incendi, in nessun periodo dell'anno. A tal proposito, per gli sviluppi futuri e per questo caso di studio, esse vengono considerate come classi “non bruciabili”.

Tabella 9: Memorandum della descrizione delle classi di copertura del suolo della terza categoria

LEGENDA			
I livello	II livello	III livello	
Nome	Nome	Codice	Nome
Territori Boscati e Ambienti Semi-naturali	Zone boscate	3.1.1	Bosco di latifoglie
		3.1.2	Boschi di conifere
		3.1.3	Boschi misti di latifoglie e conifere
	Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	3.2.1	Aree a pascolo naturale e praterie
		3.2.2	Brughiere e cespuglieti
		3.2.4	Vegetazione in evoluzione
	Zone aperte con vegetazione rada o assente	3.3.1	Spiagge, dune, sabbie
		3.3.2	Rocce nude
		3.3.3	Aree a vegetazione rada

Infine, per considerare l'influenza delle caratteristiche orografiche sulle manifestazioni del fenomeno in esame si individuano le distribuzioni delle varie tipologie di copertura ed uso del suolo al variare della quota, quindi le zone altimetriche caratterizzanti le classi per l'area di progetto e per le relative aree bruciate.

In particolare, viene analizzata la classe dei territori boscati e ambienti semi-naturali ad esclusione di spiagge, dune, sabbie e roccia nuda. Dapprima, infatti, si ricorda che le classi rappresentanti spiagge, dune e sabbie e rocce nude non presentano porzioni interessate dagli incendi boschivi in esame. Queste classi hanno una distribuzione sul territorio molto differente: le spiagge, dune e sabbie ricoprono parti del territorio a bassa quota in prossimità dei laghi, mentre le rocce si trovano per la maggior parte in alta quota.

In generale, per l'area di studio si può affermare che le aree a vegetazione rada caratterizzano un range di altitudine piuttosto ampio che varia da circa 250 m s.l.m. alla massima elevazione

dell'area in esame. Per quote superiori a 2500 m s.l.m. si inizia ad osservare il diradarsi della vegetazione e lo sviluppo del limite della neve. L'estensione delle classi boscate sul territorio di studio, invece, si spinge fino a quote di poco oltre 2000 m s.l.m. Infine, per le zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea si osserva che il limite superiore aumenta, fino al raggiungimento dei 2500 m s.l.m..

I risultati ottenuti sono in linea con quanto individuato dalla zonazione verticale del territorio in esame, come riportato in precedenza (Blasi & Biondi, 2017).

Analizzando la distribuzione dei pixel dell'area di studio e delle superfici percorse dal fuoco relativi alle classi boscate, si ottengono le seguenti distribuzioni.

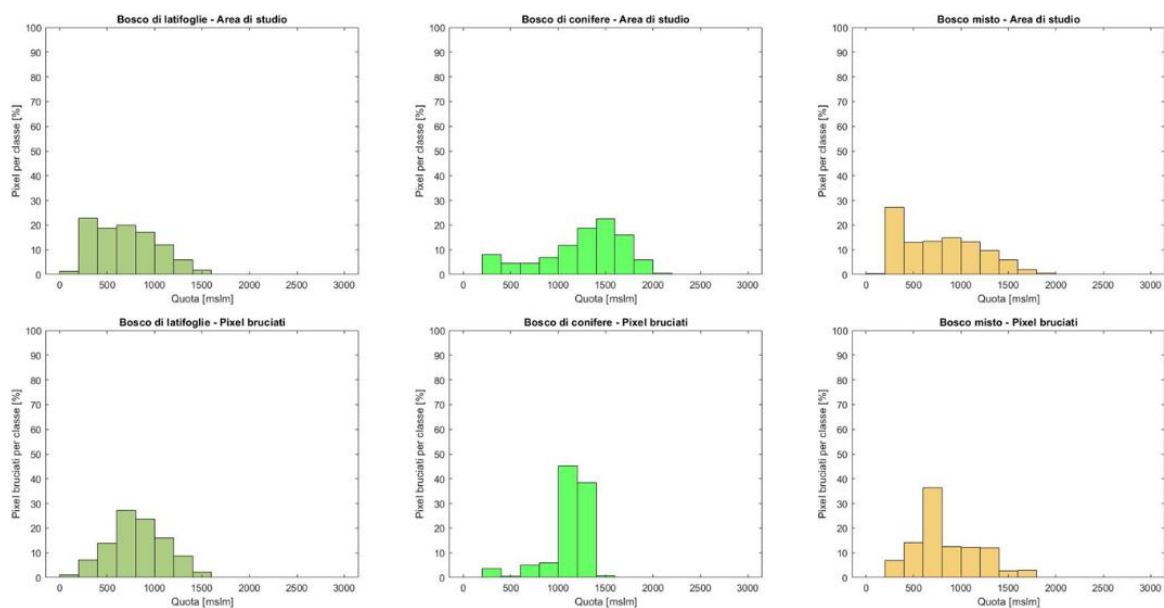


Figura 31: Distribuzione delle zone boscate al variare della quota per l'area di studio e le superfici bruciate: bosco di latifoglie (a sinistra), bosco di conifere (al centro), bosco misto (a destra)

Dai grafici riportati in Figura 31 si evince che la distribuzione altimetrica delle superfici bruciate non segue quella dell'area di studio. Infatti, sebbene la maggior parte dei pixel del territorio di studio tenda a occupare una data fascia altimetrica, gli incendi si concentrano in range di quota differenti. Questo aspetto è particolarmente accentuato nel caso del bosco di conifere, dove circa l'80% dei pixel bruciati si trova ad una quota compresa tra 1000 e 1400 m s.l.m., range in cui è incluso meno del 30% delle conifere dell'area di studio. Anche per i boschi misti si riscontra lo stesso comportamento, in quanto questa categoria si colloca principalmente intorno a 200-400 m s.l.m., mentre i relativi pixel bruciati sono disposti a quota 600-800 m s.l.m.. Nel caso del bosco di latifoglie la differenza della zonazione tra area in esame e area bruciata è meno netta: il 50% dei pixel interessati dagli incendi si trova ad un'altitudine compresa tra 600 e 1000 m s.l.m., range nel quale si colloca il 40% delle latifoglie totali.

Successivamente, si analizza la distribuzione altimetrica relativa alle zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea.

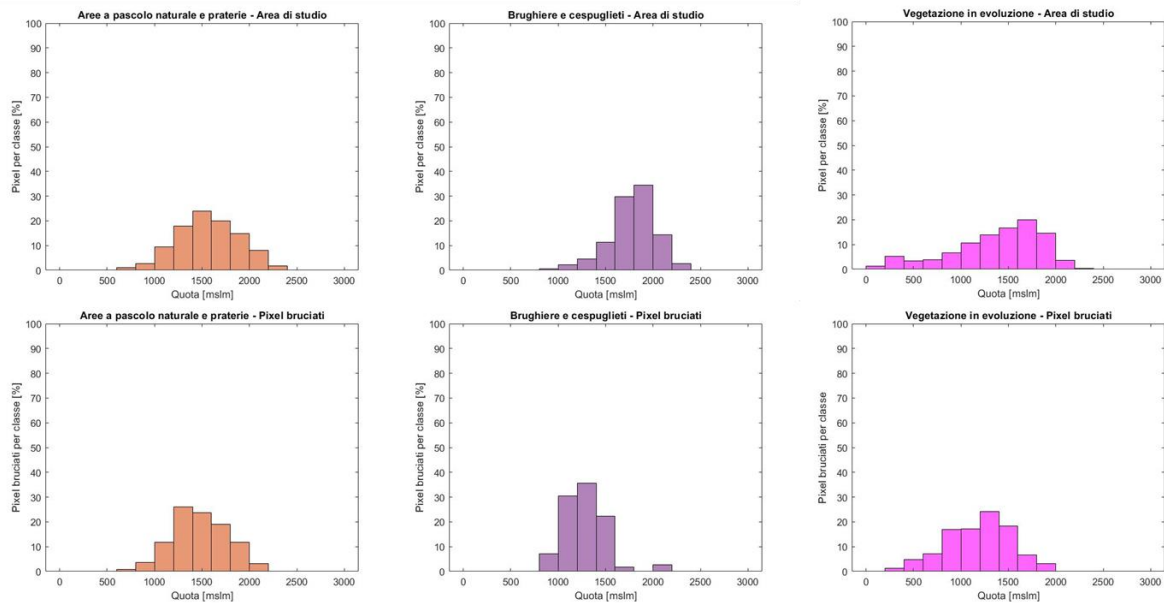


Figura 32: Distribuzione delle zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea al variare della quota per l'area di studio e le superfici bruciate: pascoli naturali e praterie (a sinistra), brughiere e cespuglieti (al centro), vegetazione in evoluzione (a destra)

La distribuzione altimetrica dei pixel dell'area di studio e delle aree bruciate risulta differente anche nel caso di brughiere e cespuglieti: questi ultimi risultano essere collocati per il 60% entro 1600-2000 m s.l.m., mentre la porzione percorsa dal fuoco è principalmente situata a quote inferiori, comprese tra 1000 e 1600 m s.l.m.. La vegetazione in evoluzione invece è disposta su un range di elevazione molto variabile nell'area di studio, ma circa il 90% dei pixel bruciati è localizzato tra 800 e 1600 m s.l.m..

Per quanto riguarda le aree a pascolo naturale e praterie, la differenza tra pixel totali e bruciati è meno accentuata. Infatti, il 60% del territorio caratterizzato da questa copertura del suolo è collocato nel range 1200-1800 m s.l.m., con un picco intorno a 1500 m di altitudine. È possibile notare che nello stesso intervallo è situata la medesima percentuale di pixel percorsi dal fuoco, sebbene in questo caso il massimo sia raggiunto ad una quota inferiore.

L'ultima analisi viene eseguita sulle zone aperte con vegetazione rada o assente, i cui risultati sono mostrati di seguito.

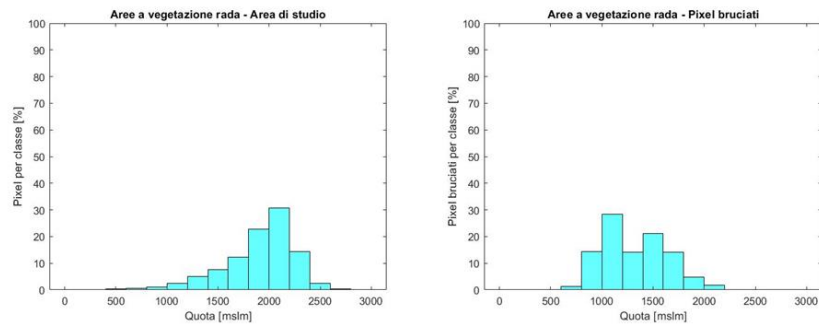


Figura 33: Distribuzione delle zone aperte con vegetazione rada o assente al variare della quota per l'area di studio e per le superfici bruciate: aree a vegetazione rada

Per il caso in Figura 33, si riscontra ancora una volta una netta differenza tra i pixel dell'area di studio e delle relative superfici bruciate. Infatti, nonostante le aree a vegetazione rada tendano a collocarsi verso quote alte, intorno a 2000 m s.l.m., le superfici caratterizzate dagli eventi sono situate principalmente nei range 1000-1200 m e 1400-1600 m di altitudine.

In conclusione, dai grafici mostrati in Figura 31, Figura 32 e Figura 33, si può osservare un generale slittamento dei picchi della distribuzione altimetrica dei pixel bruciati rispetto a quelli presenti sul territorio. Questo comportamento può essere spiegato dal fatto che la predisposizione al fuoco di un'area non dipende solo dalla quota, ma concorrono anche altri fattori predisponenti e determinanti.

4.3.4 Grafo stradale

Dall'analisi della letteratura emerge come gran parte degli eventi di incendio boschivo e di interfaccia siano profondamente influenzati dalle attività umane (Ricotta, Bajocco, Guglietta, & Conedera, 2018). Questo aspetto emerge anche dalle prime analisi effettuate sul territorio dell'area di studio, in cui per il decennio 2009-2018 il 60% degli eventi registrati sono riconducibili a comportamenti negligenzi o dolosi.

Di conseguenza alcuni autori, per studiare l'influenza delle attività umane sulla distribuzione delle superfici percorse dal fuoco e dei punti di innesco, concordano sull'uso della distanza degli eventi dalla rete stradale (Narayanaraj & Wimberly, 2011). Tale scelta è anche giustificata dal fatto che le strade presenti in aree boscate rappresentano una via di accesso per lo svolgimento di attività ricreative e di gestione delle foreste (Forman, et al., 2003) (Syphard, et al., 2007) (Syphard, et al., 2008), diventando così un generico attrattore per attività antropiche che possono potenzialmente prefigurare episodi colposi o dolosi. Un'ulteriore criticità risiede nella tipologia di vegetazione presente a ridosso delle strade: alcuni autori infatti evidenziano come tendano a svilupparsi specie erbacee molto fini, caratterizzate da un minor contenuto di umidità e, quindi, più combustibili (Dantonio & Vitousek, 1992): di conseguenza, questo tipo

di vegetazione risulta maggiormente esposto ad inneschi indotti da fulmini (Arienti, Cumming, Krawchuk, & Boutin, 2009).

Uno studio svolto per la regione Sardegna ha analizzato l'impronta antropica sul territorio utilizzando non solo la viabilità, ma anche la copertura del suolo (Ricotta, Bajocco, Guglietta, & Conedera, 2018). Il risultato ottenuto dimostra che l'occorrenza degli incendi boschivi risulta essere fortemente influenzata dalla prossimità alle strade, indipendentemente dalla tipologia di classe di copertura del terreno. Tuttavia, questo aspetto tende ad essere sottolineato maggiormente in aree naturali o semi-naturali rispetto a quanto si osserva in zone con una maggiore pressione antropica.

Sulla base di queste considerazioni, si è deciso di analizzare l'influenza della rete stradale sugli incendi boschivi per il territorio di studio.

In primo luogo, è necessario reperire i dati relativi alle strade presenti sul territorio: per assicurare la stessa accuratezza e la stessa scala per tutta l'area in esame, che racchiude porzioni di due diversi Paesi, si è deciso di ricorrere ai dati geografici di OpenStreetMap. Si tratta di un progetto finalizzato a raccogliere e distribuire dati a scala mondiale e a contenuto aperto. Quest'ultimo aspetto implica che essi possono essere utilizzati, inseriti o corretti da qualsiasi utente e per qualsiasi scopo. Si genera di conseguenza una banca dati con licenza libera, i cui prodotti hanno il solo vincolo di dover citare il progetto e mantenere in cascata la stessa tipologia di licenza.

Gli elementi presenti sul territorio possono essere rappresentati nel database attraverso punti, linee, poligoni e relazioni (ovvero un insieme dei precedenti), che vengono caratterizzati dai *tag*. Si tratta di etichette costituite da due termini: *key*, che identifica la famiglia di caratteristiche e *value*, che contraddistingue in modo più specifico ciò che l'elemento va a rappresentare.

Il grado di dettaglio adottato da Open Street Map nella descrizione del dato in esame si rivela particolarmente utile per una iniziale cernita dei dati: infatti il grafo stradale a disposizione si presenta minuziosamente descritto, riportando per ogni elemento molteplici proprietà come il nome della strada, il numero di corsie, l'ampiezza, ecc. Per l'analisi della prossimità degli incendi boschivi alle strade, è possibile limitarsi alla sola *key highway*, la quale indica l'intera famiglia di strade. All'interno di questa macrocategoria è possibile eseguire un'ulteriore selezione degli elementi del grafo sulla base dei valori indicati nel campo *Value*, poiché non tutte le voci riportate sono utili ai fini di questo studio. In sostanza, i tag scelti sono quelli che

descrivono quei tratti di rete stradale in prossimità dei quali vi è la possibilità che si sviluppi un incendio boschivo: di conseguenza elementi come attraversamenti pedonali, aree pedonali in ambiente urbano, fermate dell'autobus, rampe di scale, ecc. non vengono considerate. Nella seguente tabella si riportano i tag scelti.

Tabella 10: Tag definiti dallo standard di OpenStreetMap considerati per l'analisi di prossimità degli incendi boschivi alla rete stradale

Key	Value	Descrizione
Highway	Bridleway	Percorso per equitazione (in genere percorsi pedonali praticabili anche a cavallo)
	Cycleway	Pista ciclabile
	Footway	Percorso costruito appositamente per i pedoni
	Path	Sentiero
	Primary	Strada di importanza nazionale e regionale
	Primary link	Tratto di collegamento tra un elemento di tipologia primary ed un altro simile o di classificazione inferiore
	Rest area	Area di sosta
	Road	Strada con classificazione non nota.
	Secondary	Strada di importanza regionale e provinciale
	Secondary link	Tratto di collegamento tra un elemento di tipologia secondary ed un altro simile o di classificazione inferiore
	Service	Strada di servizio
	Services	Stazione di servizio
	Tertiary	Strada di importanza locale o comunale
	Tertiary link	Tratto di collegamento tra un elemento di tipologia tertiary ed un altro simile o di classificazione inferiore
	Track	Strada carreggiabile ad uso prevalentemente agricolo o forestale
Trunk	Tipologia a metà strada tra autostrade/tangenziali e statali	
Trunk link	Tratto di collegamento tra un elemento di tipologia trunk ed un altro simile o di classificazione inferiore	

La rappresentazione dell'intera rete stradale per l'area di studio è visibile in Figura 34.

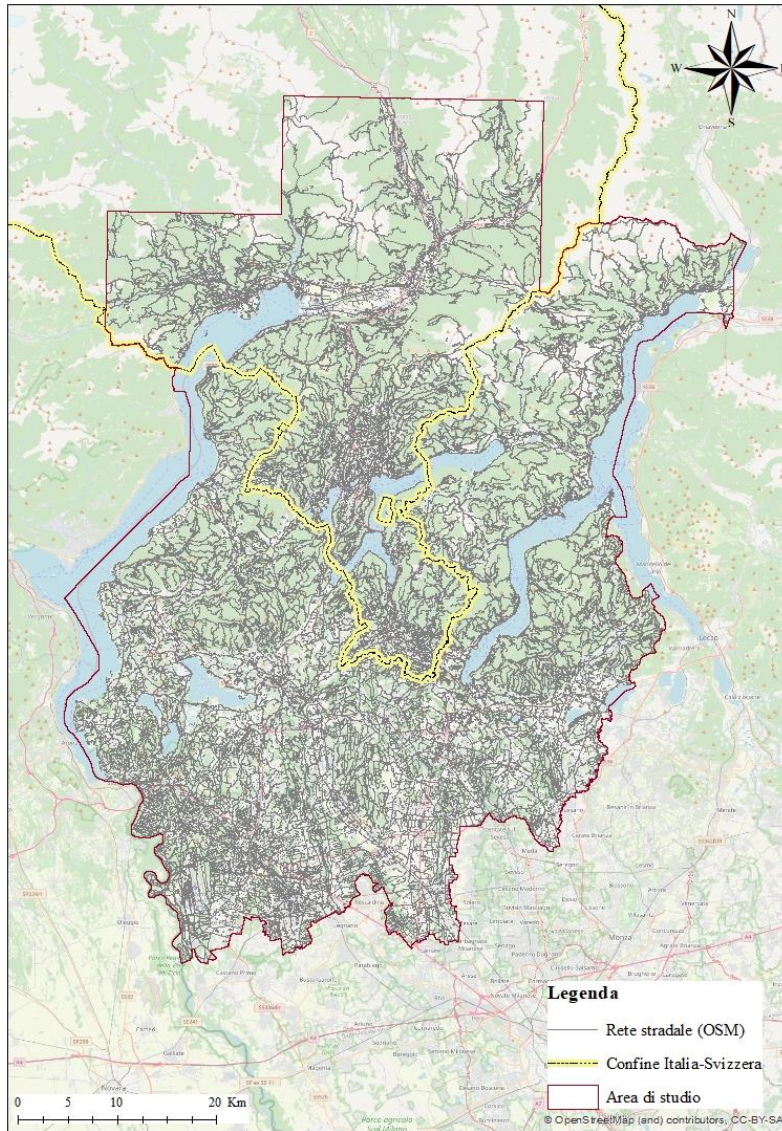


Figura 34: Grafo stradale per l'area di studio

4.3.4.1 Valutazione della prossimità della rete stradale agli incendi boschivi

L'analisi di prossimità delle strade agli incendi boschivi è eseguita mediante GIS, calcolando per ogni pixel dell'area di studio la distanza euclidea tra le superfici percorse dal fuoco ed il tratto di grafo stradale più vicino.

Successivamente, il dato è opportunamente riclassificato utilizzando degli intervalli di distanza di tipo logaritmico. Il motivo di tale suddivisione risiede nel fatto che si vuole investigare in modo molto approfondito ciò che accade negli spazi prossimi alle strade piuttosto che nelle porzioni più lontane, proprio per evidenziare una eventuale relazione tra l'esistenza di vie d'accesso sul territorio e i punti di innesco. Di conseguenza la discretizzazione viene effettuata

creando le fasce 0-2 m, 2-5 m, 5-10 m, 10-20 m, 20-50 m, 50-100 m, 100-200 m, 200-500 m e 500-1000 m, limitando quindi l'analisi alla distanza massima di 1 km.

Di seguito, si riportano le mappe ottenute per l'area di studio (Figura 35) e per le sole aree bruciate (Figura 36).

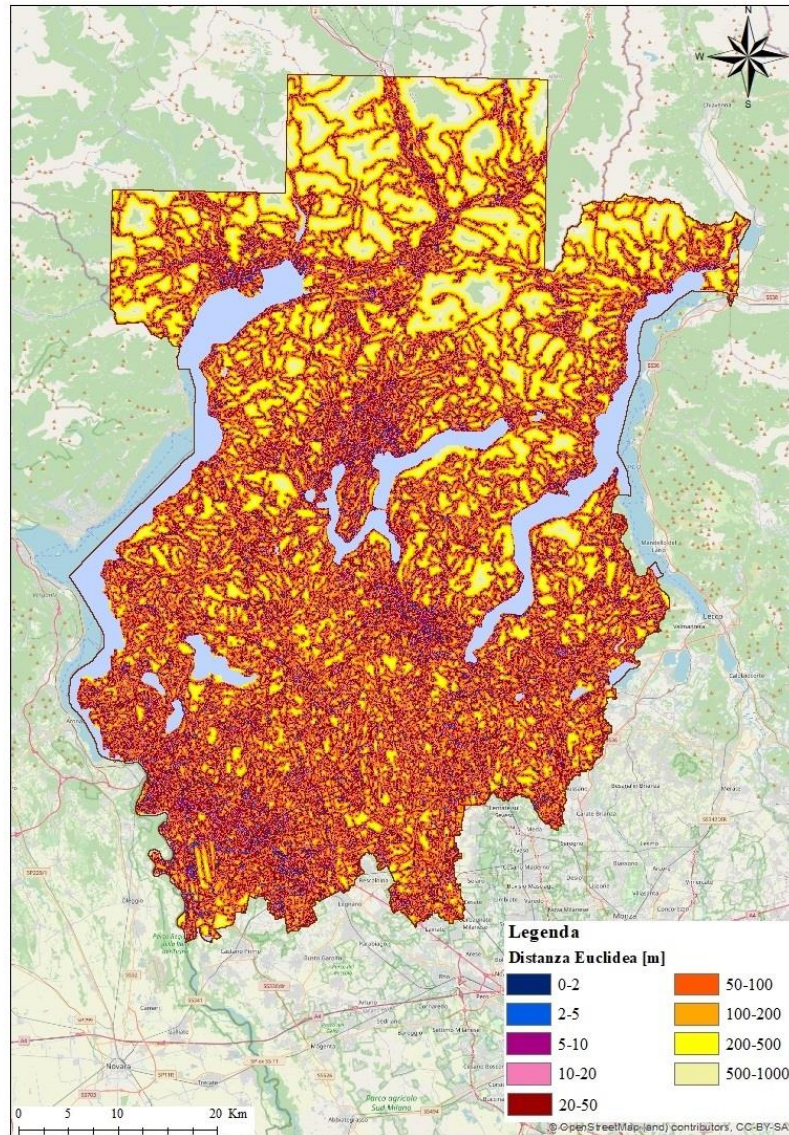


Figura 35: Rappresentazione della distanza euclidea calcolata sull'area di studio per la valutazione della distanza di ciascun pixel dal grafo stradale

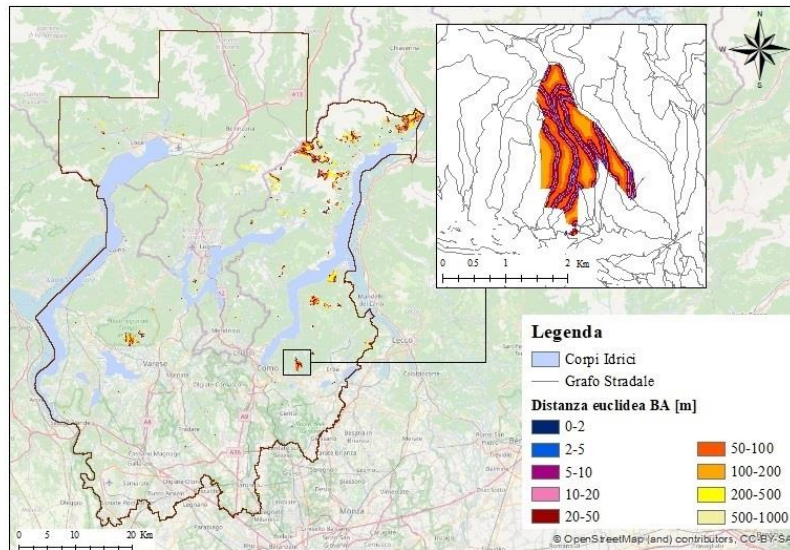


Figura 36: Rappresentazione della distanza euclidea ottenuta per le aree bruciate (BA) nell'area di studio per la valutazione della distanza dal grafo stradale; nel riquadro a destra, un dettaglio eseguito su un incendio

Successivamente, si calcola per ogni range selezionato il rapporto tra i pixel bruciati e quelli presenti sull'area di studio, in modo da valutarne l'andamento. Prima di procedere, si svolge un'analisi critica sul territorio da esaminare: dai dati riguardanti la copertura del suolo si può constatare la presenza di classi definite dal CORINE che, per loro natura, non consentono lo sviluppo di un incendio boschivo. Di conseguenza, è necessario eseguire una distinzione tra la totalità dell'area presa in esame e la sua parte potenzialmente percorribile dal fuoco, che è quindi definita "bruciabile". Confrontando quest'ultima con gli eventi registrati, si ottengono i risultati indicati di seguito.

Tabella 11; Risultati ottenuti dalla distanza euclidea calcolata sulla totalità del grafo stradale

Classi di distanza dal grafo stradale [m]	Pixel in ogni classe per l'area di studio totale [%]	Pixel in ogni range per l'area bruciabile [%]	Pixel bruciati [%]	<u>Pixel bruciati</u> <u>Pixel bruciabili</u> [%]
0-2	2.68	2.78	2.20	1.32
2-5	3.63	3.79	3.01	1.32
5-10	3.42	3.59	2.88	1.33
10-20	6.99	7.36	5.90	1.33
20-50	18.64	19.63	15.92	1.35
50-100	20.77	21.78	19.50	1.49
100-200	20.33	20.98	24.04	1.91
200-500	16.72	15.52	22.60	2.42
500-1000	6.84	4.56	3.94	1.44

Nella Tabella 11 vengono riportati in ogni colonna, rispettivamente, i range scelti per la discretizzazione della distanza dalla rete stradale e le percentuali di pixel dell'area di studio calcolate rispetto al totale, considerando prima la totalità del territorio, successivamente la sua superficie al netto delle aree non bruciabili. Infine, l'ultima colonna raccoglie la percentuale del rapporto tra i pixel appartenenti alle aree bruciate e quelli relativi a superfici potenzialmente bruciabili. Tale esito viene rappresentato nel grafico semilogaritmico riportato di seguito.

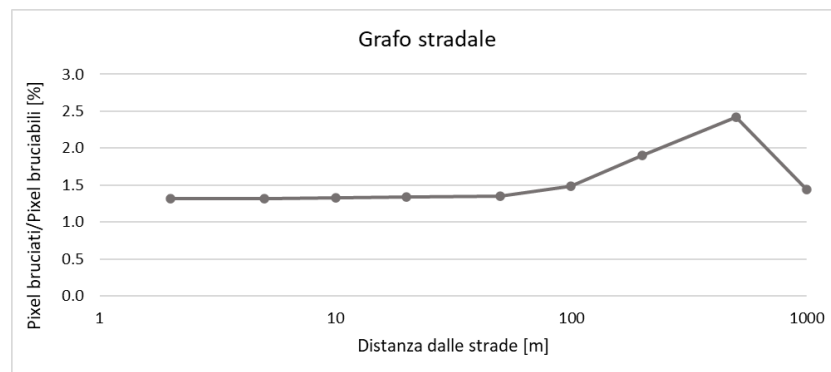


Figura 37: Andamento del rapporto tra pixel bruciati e bruciabili nell'area di studio, considerando la distanza del grafo stradale dagli incendi boschivi

Dall'andamento in Figura 37 si nota una tendenza pressoché costante fino ad una distanza pari a 50 metri dalla strada, oltre i quali si osserva un incremento con un picco del 2.42% entro i 500 metri. Superata questa distanza, il rapporto tra i pixel bruciati e bruciabili torna a scendere, assestandosi nuovamente al di sotto dell'1.5 % come avviene per le classi più vicine al grafo. Da quanto emerso da questa prima analisi, si evince che la prossimità alla rete stradale sia un fattore rilevante per gli eventi registrati nel decennio 2009-2018 per la distanza compresa tra 100 e 500 metri.

Tuttavia, è necessario effettuare una considerazione: il dato riguardante la rete stradale a disposizione, come già accennato in precedenza, si presenta molto fitto e dettagliato. Pertanto, si è deciso di effettuare delle analisi più mirate, che siano in grado di esaminare l'esistenza di una dipendenza tra gli incendi boschivi ed alcune categorie di strade che compongono il grafo. Tale scelta è anche guidata da una semplice osservazione della distribuzione delle aree bruciate sul territorio rispetto alle strade: ne risulta che gran parte degli eventi è localizzata in prossimità di strade ad uso agricolo o forestale e, soprattutto, dei sentieri. Di conseguenza, dal grafo si estraggono in primo luogo la rete di viabilità data da *path* (sentieri) e *track* (strade agricole o forestali) che, successivamente, vengono esaminate separatamente.

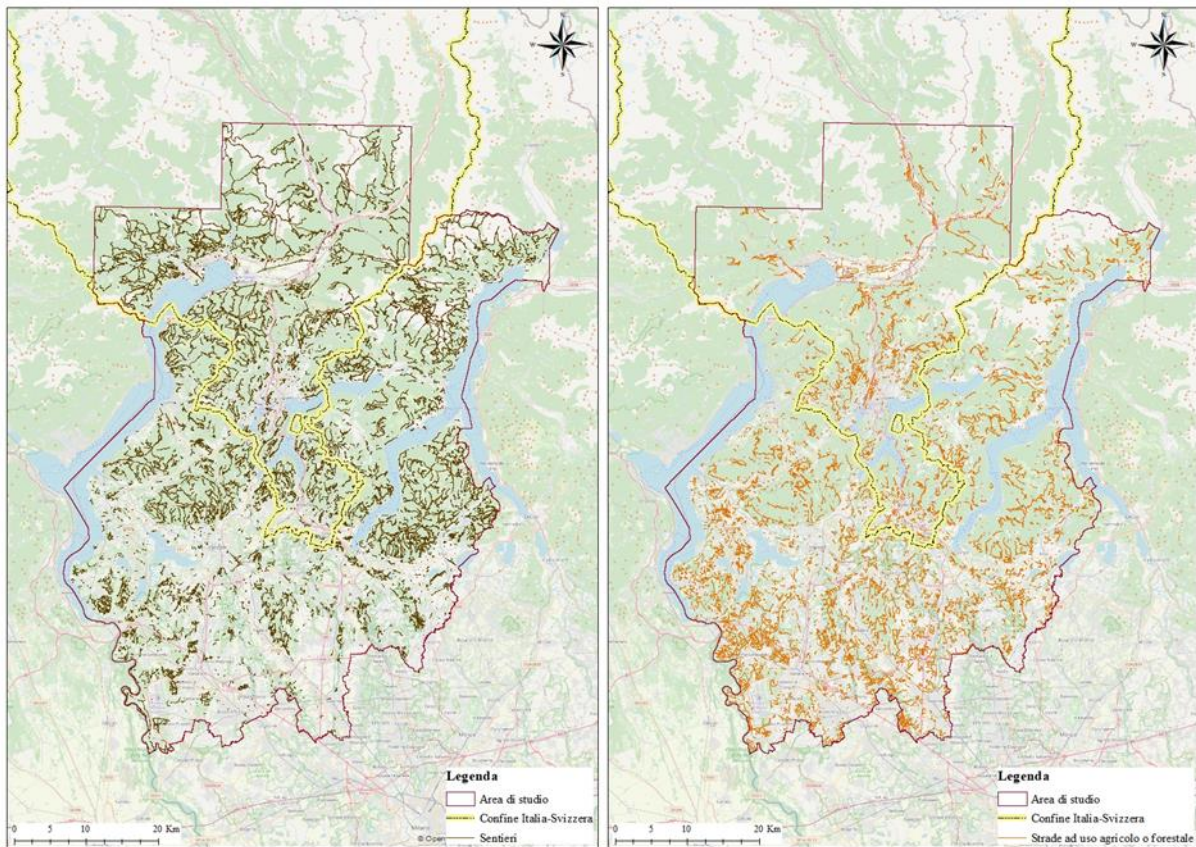


Figura 38: Rappresentazione della rete stradale formata dai sentieri (a sinistra, in marrone) e dalle strade ad uso agricolo o forestale (a destra, in arancione)

Le analisi condotte in precedenza sulla totalità della rete stradale sono ripetute per esaminare questi casi: la distanza euclidea è calcolata per ciascuno dei tre grafi e, in seguito, si valuta la porzione dell'area di studio interessata e quella percorsa dal fuoco. Nella tabella e nel grafico sottostante si riportano i risultati.

Tabella 12: Risultati ottenuti dalla distanza euclidea calcolata su sentieri e strade ad uso agricolo o forestale (a), solo sentieri (b), solo strade ad uso agricolo o forestale (c)

	Classi di distanza [m]	Pixel in ogni classe per l'area di studio totale [%]	Pixel in ogni range per l'area bruciabile [%]	Pixel bruciati [%]	<u>Pixel bruciati</u> <u>Pixel bruciabili</u> [%]
a) Sentieri e strade ad uso agricolo o forestale	0-2	1.50	1.64	2.12	2.15
	2-5	2.09	2.29	2.90	2.11
	5-10	2.03	2.22	2.78	2.09
	10-20	4.26	4.65	5.74	2.06
	20-50	12.16	13.23	15.63	1.97
	50-100	16.18	17.40	19.33	1.85
	100-200	22.51	23.58	24.21	1.71
	200-500	28.58	27.45	22.82	1.39
	500-1000	10.69	7.53	4.47	0.99

b) Sentieri	0-2	0.92	1.00	1.66	2.81
	2-5	1.28	1.40	2.29	2.79
	5-10	1.25	1.36	2.23	2.79
	10-20	2.65	2.89	4.67	2.75
	20-50	7.86	8.56	13.33	2.66
	50-100	11.43	12.33	18.10	2.50
	100-200	18.90	20.00	25.40	2.16
	200-500	34.70	34.50	26.12	1.29
	500-1000	21.02	17.95	6.21	0.59
c) Strade ad uso agricolo o forestale	0-2	0.74	0.79	0.54	1.19
	2-5	1.05	1.13	0.73	1.14
	5-10	1.04	1.12	0.71	1.11
	10-20	2.24	2.41	1.51	1.10
	20-50	6.94	7.44	4.57	1.08
	50-100	10.74	11.41	6.93	1.07
	100-200	18.59	19.40	13.74	1.25
	200-500	35.34	35.36	39.93	1.99
	500-1000	23.32	20.93	31.35	2.64

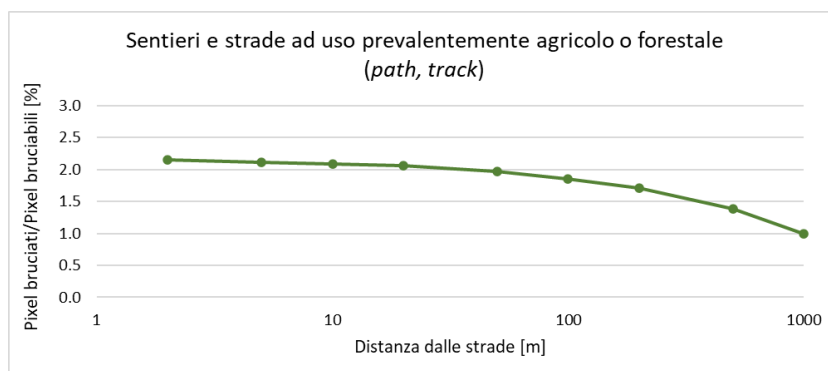


Figura 39: Andamento del rapporto tra pixel bruciabili e bruciati nell'area di studio, considerando la distanza da sentieri e strade agricole o forestali

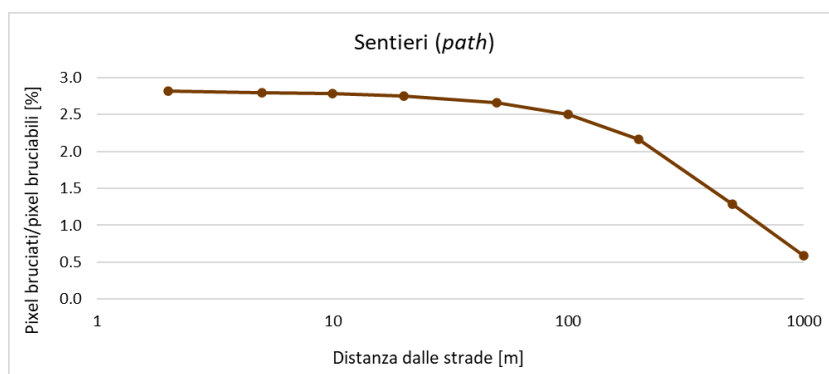


Figura 40: Andamento del rapporto tra pixel bruciabili e bruciati nell'area di studio, considerando la distanza dai soli sentieri

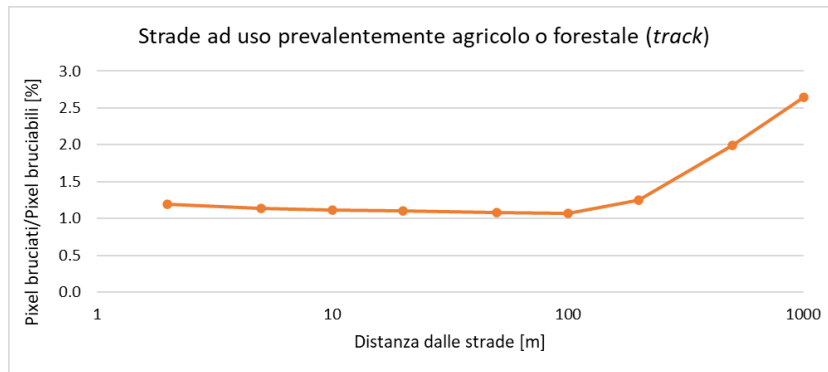


Figura 41: Andamento del rapporto tra pixel bruciabili e bruciati nell'area di studio, considerando la distanza dalle sole strade agricole o forestali

L'andamento dei tre grafici mostra dei risultati molto interessanti: come già osservato dalla distribuzione delle aree bruciate rispetto alle strade, si può notare che il rapporto tra pixel bruciati e bruciabili, per il caso di grafo composto da sentieri e strade ad uso agricolo o forestale, supera il 2% entro i 10 metri per poi subire un decremento raggiungendo l'1% per la massima distanza considerata pari ad 1 km.

La stessa evoluzione non si registra però per il caso della rete formata dalle sole strade agricole/forestali, che al contrario aumenta con la distanza da queste. Tale risultato consente di trarre una ulteriore deduzione: l'andamento decrescente fornito dalla combinazione di *path* e *track* è dovuto esclusivamente ai sentieri. Per questi ultimi, come si evince dal grafico in Figura 40, si osserva una forte diminuzione del rapporto tra pixel bruciati e bruciabili all'aumentare della distanza dal grafo in questione. Partendo da un valore poco al di sotto del 3% per le fasce più vicine ai sentieri, si registra un decremento dai 100 metri in poi, raggiungendo una quota pari a circa 0.5% in corrispondenza del limite considerato.

4.3.4.2 Valutazione della prossimità della rete stradale ai punti di innesco

Tra le informazioni a disposizione sulle aree percorse dal fuoco, è possibile trovare i dati relativi alle coordinate dei punti dai quali la propagazione degli incendi ha avuto inizio. Di conseguenza, si calcola la distanza tra i punti di innesco registrati per il periodo 2009-2018 sull'area di studio e il tratto di rete stradale più vicino.

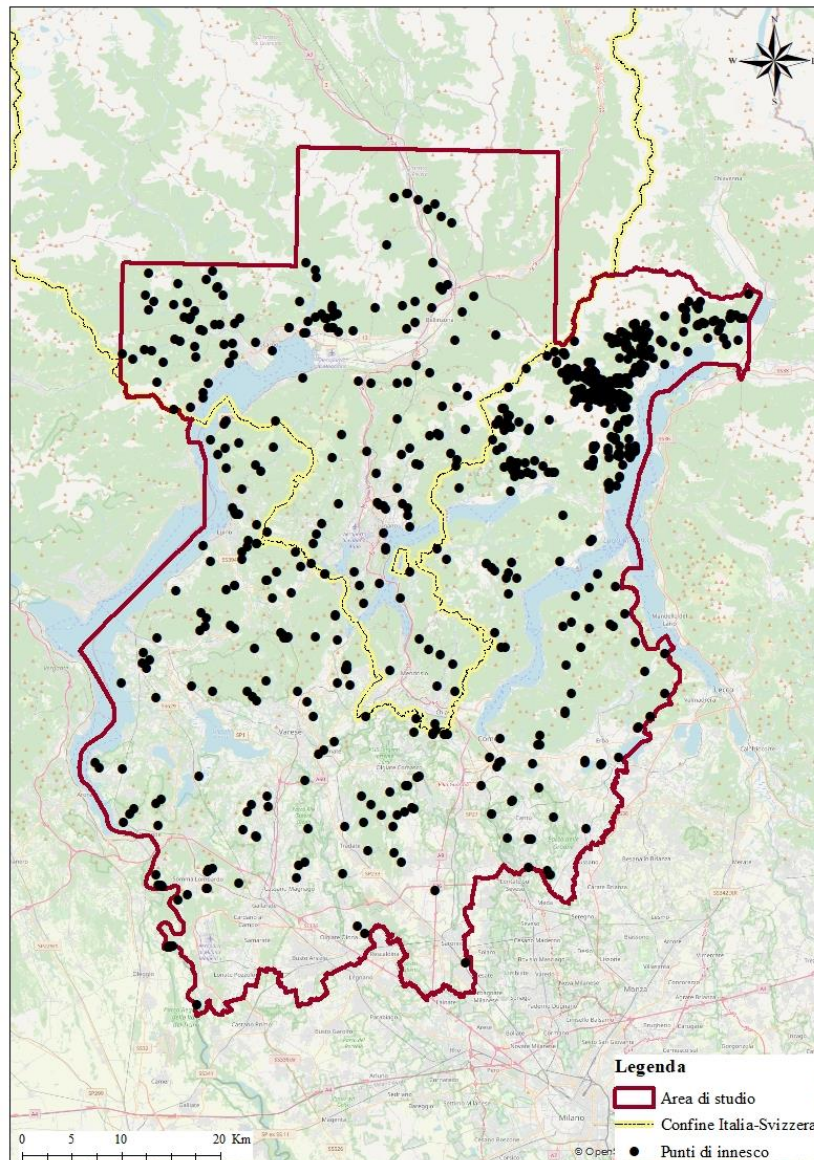


Figura 42: Rappresentazione dei punti di innesco registrati per il periodo 2009-2018 nell'area di studio; in grigio è riportata la rete stradale

Inizialmente viene considerata l'intera ramificazione del grafo, per poi passare ad un suo alleggerimento considerando sentieri, strade ad uso agricolo o forestale e la combinazione delle due categorie, come fatto in precedenza. I risultati sono riassunti nella tabella di seguito, in cui si mostra la ripartizione dei punti di innesco in base alle classi di distanza definite.

Tabella 13: Distribuzione dei punti di innesco rispetto alla massima estensione del grafo stradale, alla rete formata da sentieri e strade ad uso agricolo o forestale, ai soli sentieri ed alle sole strade ad uso agricolo o forestale

Inneschi per classe [%]				
Classi di distanza [m]	Grafo stradale totale	Sentieri e strade ad uso agricolo o forestale	Sentieri	Strade ad uso agricolo o forestale
0-2	3.00	1.91	0.95	0.95
2-5	6.13	4.77	2.86	2.04
5-10	7.90	6.68	5.04	1.91
10-20	10.76	9.54	7.49	2.59
20-50	18.39	16.76	13.35	6.40
50-100	23.02	20.16	17.17	11.72
100-200	17.71	19.21	20.16	17.30
200-500	11.17	17.98	23.16	37.87
500-1000	1.77	2.72	8.99	13.35
>1000	0.14	0.27	0.82	5.86

In ogni colonna sono riportate le percentuali di punti di innesco, suddivise in base alla distanza dalle strade, calcolate rispetto al totale degli eventi registrati.

Nei grafici sottostanti invece è possibile osservare l'andamento della distribuzione cumulata degli inneschi all'aumentare della distanza dai vari grafi considerati.

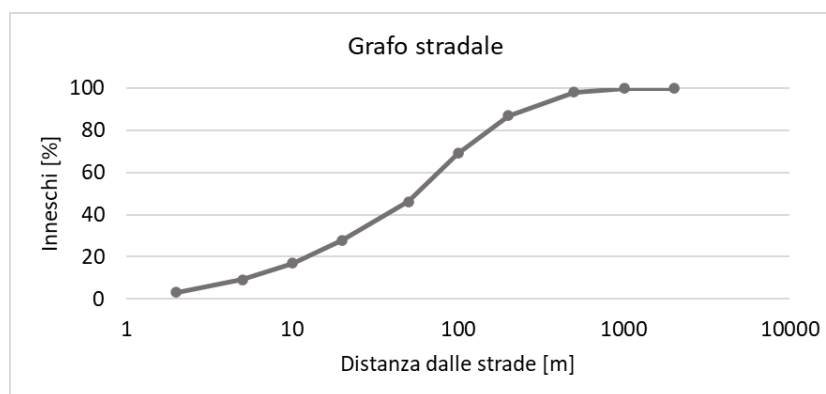


Figura 43: Distribuzione cumulata dei punti di innesco all'aumentare della distanza dal grafo stradale totale

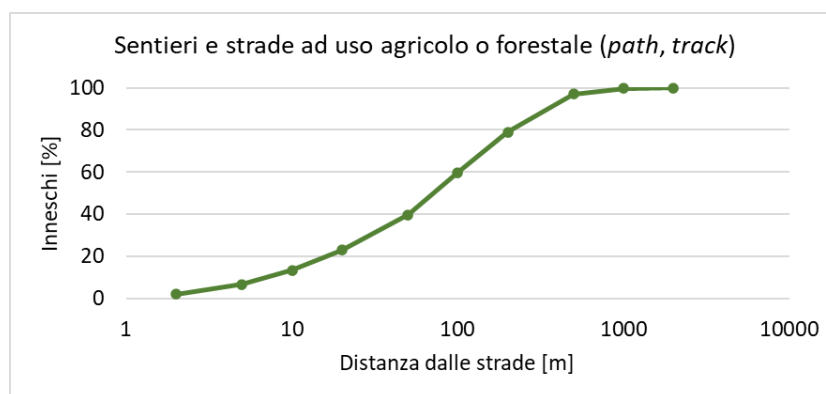


Figura 44: Distribuzione cumulata dei punti di innesco all'aumentare della distanza da sentieri (path) e strade ad uso agricolo o forestale (track)

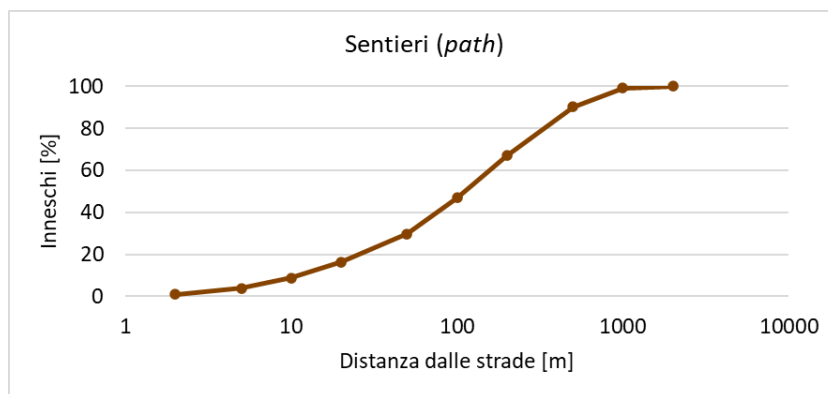


Figura 45: Distribuzione cumulata dei punti di innesco all'aumentare della distanza dai sentieri (*path*)

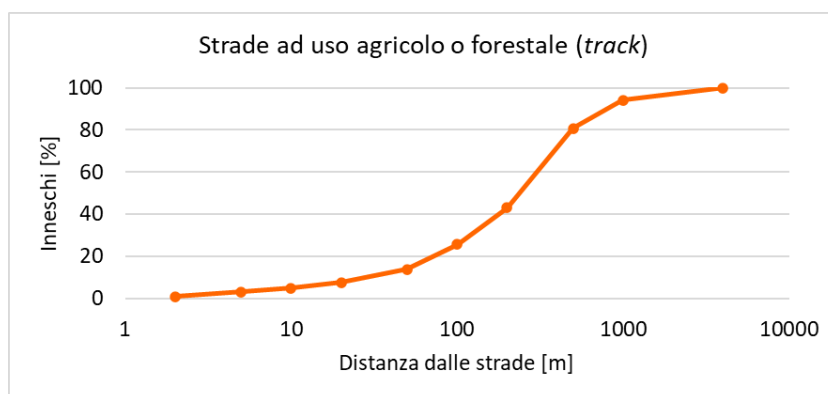


Figura 46: Distribuzione cumulata dei punti di innesco all'aumentare della distanza dalle strade ad uso agricolo o forestale (*track*)

Questi risultati confermano quanto già ottenuto con l'analisi svolta precedentemente: la prossimità alle strade è un aspetto che va considerato nello studio di suscettività di un territorio agli incendi boschivi. Infatti, dal primo grafico (a), si evince che circa il 70% dei punti di innesco si trova entro 100 metri dal grafo stradale a disposizione.

In generale, si può affermare che l'andamento delle curve è caratterizzato da un incremento piuttosto rapido tranne che per il caso delle strade ad uso agricolo o forestale, il cui tratto iniziale si presenta più piatto rispetto agli altri casi. Di fatto, la rete formata esclusivamente da *path* consente di includere nel raggio di 100 metri la metà degli inneschi, mentre nel caso dei *track* poco più del 20%.

In conclusione, è possibile confermare che la prossimità ai sentieri risulta essere determinante per gli eventi avvenuti nel decennio 2009-2018.

Oltre alle coordinate, i punti di innesco sono caratterizzati da molti altri attributi tra cui le cause. È però necessario fare una precisazione: i set di dati a disposizione sono stati messi a punto da due Paesi diversi, dal momento che l'area studiata si colloca in un contesto transfrontaliero. Di conseguenza, le informazioni riportate possono differire sia in accuratezza sia nella

codificazione utilizzata. Per questo motivo, prima di svolgere qualsiasi analisi è fondamentale rendere omogenei i due dataset.

In particolare, le cause riportate dal Cantone Ticino risultano essere distinte in 15 classi, molto più dettagliate quindi delle 5 definite per la regione Lombardia. Per garantire l'uniformità dei dati, viene adottata la seguente classificazione:

- **dubbie/non classificabile:** include gli eventi le cui cause non sono state identificate con certezza;
- **naturali:** associato ad eventi come le fulminazioni;
- **volontarie:** relativo a incendi dolosi o dovuti a piromania;
- **involontarie:** connesso ad eventi accidentali, dovuti a comportamenti negligenti.

La riclassificazione porta ad ottenere un dataset per l'area di studio così composto:

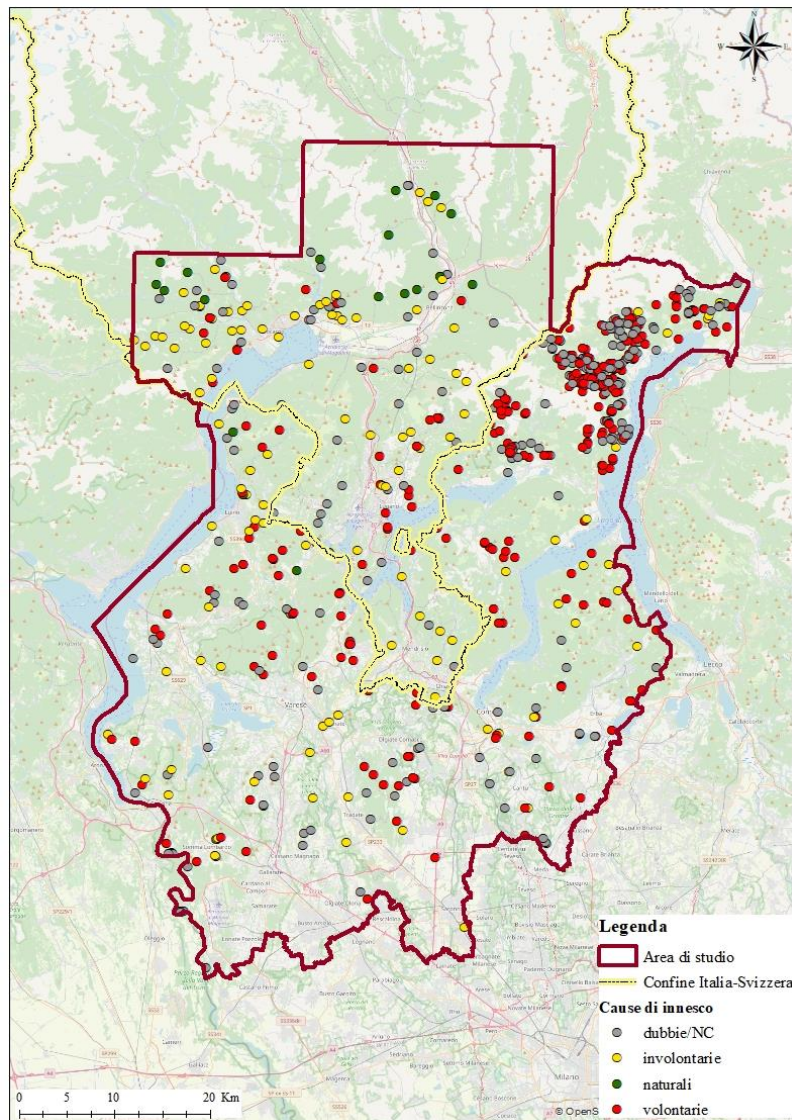


Figura 47: Rappresentazione dei punti di innesco distinti per causa registrati nel periodo 2009-2018 nell'area di studio

Tabella 14: Cause di innesco per gli eventi registrati nell'area analizzata per il periodo 2009-2018

Cause	n. inneschi
Dubbie/NC	275
Naturali	20
Volontarie	319
Involontarie	120

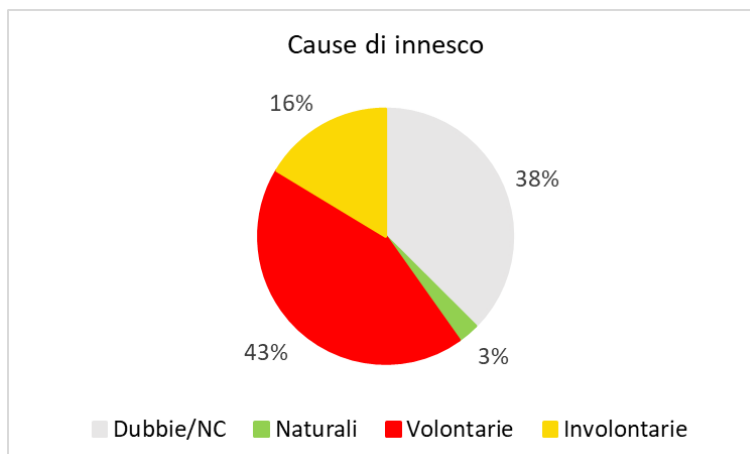


Figura 48: Percentuali riferite alle cause di innesco per gli eventi registrati nell'area analizzata per il periodo 2009-2018

Come già anticipato dalla letteratura, anche per il territorio in esame si evidenzia la prevalenza di inneschi collegati all'azione umana. Infatti, le cause volontarie ed involontarie compongono all'incirca il 60% degli eventi avvenuti nel decennio 2009-2018. Ovviamente, è importante considerare che tale valore è al netto degli inneschi la cui origine non è certa.

Un ruolo molto meno rilevante è svolto dalle cause naturali, che costituiscono solo una piccola parte del dataset.

In seguito a tali risultati, si è deciso di indagare sulla distribuzione degli inneschi riconducibili all'azione umana. Pertanto, si considerano gli eventi associati a cause volontarie ed involontarie e ne viene studiata la distanza dai sentieri.

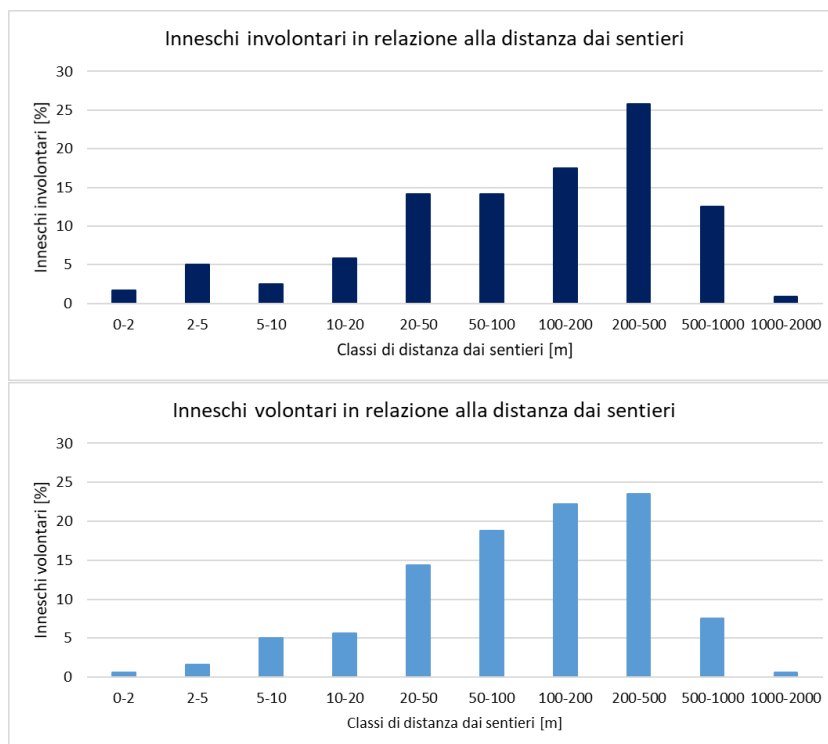


Figura 49: Percentuale di inneschi registrati nell'area di studio nel periodo 2009-2018 per eventi involontari (in alto in blu) e volontari (in basso in azzurro), valutati rispetto alle classi di distanza dai sentieri

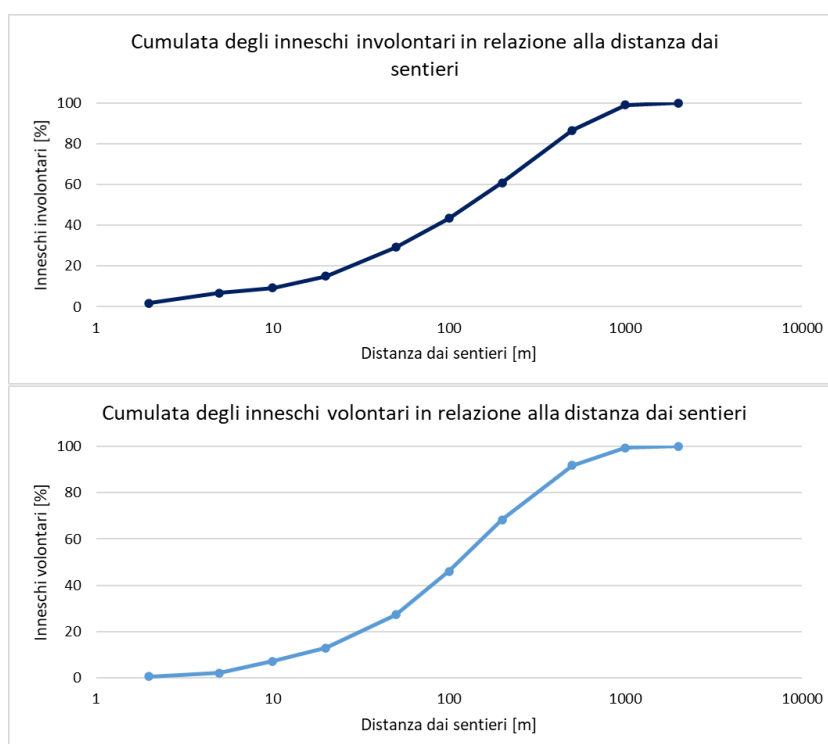


Figura 50: Distribuzione cumulata degli inneschi registrati nell'area di studio nel periodo 2009-2018 per eventi involontari (in alto in blu) e volontari (in basso in azzurro), valutata in base alla distanza dai sentieri

Dal grafico riportato in Figura 49 si può notare che, sia per cause involontarie che volontarie, la percentuale di punti di innesco raggiunge un massimo che oscilla intorno al 25% in corrispondenza della classe di distanza situata tra 200 e 500 metri dai sentieri. Successivamente, all'aumentare della distanza si osserva un forte calo nel numero di eventi. Guardando più attentamente, si può notare come i due casi analizzati non siano in realtà così simili: infatti, prima di giungere al valore di picco, l'andamento appare sempre in aumento per gli inneschi volontari e più variabile per quelli involontari. Tale comportamento potrebbe essere riconducibile alla natura stessa degli eventi involontari, dal momento che si tratta di cause accidentali.

Esaminando invece le distribuzioni cumulate riportate in Figura 50, si osserva un'evoluzione quasi analoga per entrambi i casi. Infatti, più della metà degli inneschi si trova ad una distanza massima dai sentieri pari a 200 metri: in particolare, si tratta del 60% degli eventi involontari e del 70% di quelli volontari.

4.4 Motore statistico

Dopo aver definito i fattori predisponenti e determinanti e le loro relazioni rispetto alle osservazioni storiche, si sviluppa un modello statistico per compiere l'analisi di suscettività del territorio in esame. La scelta ricade sull'utilizzo di un metodo statistico multivariato, largamente applicato per osservare le correlazioni spaziali tra variabili, quale il metodo del peso dell'evidenza (WoE). Questo viene utilizzato come approccio statistico per un'analisi multifattoriale e si basa sul teorema di Bayes della probabilità condizionata (Bonham-Carter, 1994) (Romero-Calcerrada, Novillo, Millington, & Gómez Jiménez, 2008).

Ad ogni classe di fattore predisponente, purché indipendenti tra loro, viene attribuito un peso in relazione al rapporto tra l'evento, in questo caso l'incendio e quindi porzione bruciata, rispetto alla presenza o assenza del fattore predisponente sul territorio in esame.

Questo metodo si basa sul teorema di Bayes dove con la lettera "F" si indica ciascun fattore predisponente e con "F_i" ciascuna classe, mentre con "b" viene indicata l'evidenza dell'evento, e quindi la probabilità di avere un evento "b" data la classe del fattore predisponente "F_i" è:

$$P(b|F_i) = \frac{[P(F_i|b) \cdot P(b)]}{P(F_i)}$$

dove:

$P(F_i|b)$ è la probabilità che si verifichi la classe "F_i" sapendo che l'evento "b" è verificato;

$P(b)$ è la probabilità che l'evento si verifichi nell'area di studio;

$P(F_i)$ è la probabilità di esistenza di una determinata classe di un fattore predisponente.

La probabilità dell'evento "b" condizionata al fatto che la classe "F_i" non si sia verificata (\bar{F}_i) si definisce come:

$$P(b|\bar{F}_i) = \frac{[P(\bar{F}_i|b) \cdot P(b)]}{P(\bar{F}_i)}$$

dove:

$P(\bar{F}_i|b)$ è la probabilità che non si verifichi la classe "F_i" sapendo che l'evento "b" è verificato;

$P(\bar{F}_i)$ è la probabilità di non aver trovato la classe "F_i" nell'area di studio.

Queste quantità vengono calcolate come rapporto tra le aree, in termini di numero di pixel, tra gli eventi e l'area di indagine, attraverso la sovrapposizione dei diversi strati informativi.

Successivamente, il modello prevede il calcolo di una coppia di pesi per ogni classe di ciascun fattore predisponente sulla base della presenza o assenza di un evento, secondo le seguenti formulazioni:

$$W^+ = \ln \frac{P(F_i|b)}{P(F_i|\bar{b})}$$

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{F}_i|b)}{P(\bar{F}_i|\bar{b})}$$

La prima equazione esprime il peso positivo, il quale rappresenta il rapporto tra la probabilità di trovare una classe dove si è verificato un evento e la probabilità di avere la stessa classe in una porzione di territorio in cui non si è verificato l'evento in esame. Questo peso con valore positivo indica l'influenza dalla classe sul verificarsi di un evento.

La seconda formulazione, invece, indica il peso negativo che rappresenta il rapporto tra la probabilità di non trovare una classe dove si è verificato l'evento e la probabilità di non trovare la stessa classe in un'area priva di evento. Più questo valore è grande, minore è la significatività della classe nel prevedere l'evento.

La differenza tra i due pesi descritti viene definita peso di contrasto C: per valori nulli si asserisce che la classe del fattore predisponente non è significativa per l'analisi, per valori positivi o negativi si osserva la correlazione positiva o negativa nella valutazione della predisposizione all'evento preso in esame (Piacentini, et al., 2012).

4.5 Implementazione del modello

L'approccio adottato della suscettività da incendio boschivo sfrutta i dati storici e i fattori predisponenti e determinanti organizzati in classi come esposto in precedenza a cui si applica il modello statistico scelto.

La procedura seguita per ottenere la mappa di suscettività prevede quindi la preparazione del dataset, contenente le informazioni raccolte sui fattori per l'area di studio e nelle porzioni interessate dagli incendi; l'analisi della matrice di correlazione in grado di garantire l'indipendenza statistica tra le variabili in gioco; la suddivisione dei dati storici riferiti alle aree percorse dal fuoco in un dataset di calibrazione (circa il 70% delle informazioni sulle aree bruciate), mentre la restante parte (circa il 30%) per la validazione; l'applicazione del modello dei pesi dell'evidenza (WoE) per ottenere i pesi per ogni classe di ciascun fattore predisponente; ed infine, la validazione per valutare l'affidabilità del risultato.

4.5.1 Analisi di correlazione

Un'analisi statistica multivariata deve prevedere lo studio della correlazione tra i fattori scelti, esaminando l'eventuale dipendenza tra le informazioni a disposizione.

I dati utilizzati per l'analisi di correlazione sono organizzati in una matrice, il cui numero di righe è pari al numero di pixel bruciati mentre le colonne sono cinque, una per fattore predisponente e determinante scelto per addestrare il modello. Per ogni pixel, quindi, si ha una quintupla di valori che lo caratterizzano, al fine di descrivere gli incendi.

La correlazione viene analizzata attraverso la produzione della matrice di correlazione. Essa è di forma quadrata e di dimensione pari al numero dei fattori predisponenti e determinanti scelti, le cui celle contengono il coefficiente di correlazione:

$$\rho(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

dove X e Y indicano le coppie delle variabili considerate, per cui si calcola la correlazione; x_i e y_i il valore del fattore predisponente e con \bar{x} e \bar{y} si indicano i valori medi.

Il coefficiente di correlazione è un indice adimensionale compreso tra -1 e 1 che mostra il legame lineare, più o meno forte, tra i fattori che influenzano il fenomeno in esame. Per valori positivi si può affermare che le serie sono correlate positivamente; per valori nulli le serie non sono correlate ed infine, valori negativi indicano una correlazione negativa.

Quando il coefficiente di correlazione ha valori prossimi allo zero, le due serie di dati dei fattori predisponenti e determinanti messe a confronto, hanno correlazione trascurabile e si conferma l'utilità di ciascuna variabile nel modello di suscettività.

In questo caso di studio, dalla Tabella 15 si evince che tutti i fattori predisponenti e determinanti possono essere integrati nel modello.

Tabella 15: Matrice di correlazione dei fattori predisponenti e determinanti

	DTM	Pendenza	Esposizione	CLC	Distanza
DTM	1.000	0.160	-0.050	0.330	-0.027
Pendenza	0.160	1.000	0.032	0.145	0.063
Esposizione	-0.050	0.032	1.000	-0.048	0.087
CLC	0.330	0.145	-0.048	1.000	0.045
Distanza	-0.027	0.063	0.087	0.045	1.000

Lo stesso risultato si evince anche dalla rappresentazione della struttura complessiva del dataset degli incendi, attraverso la matrice di diagrammi a dispersione ottenuta per ogni coppia di variabili (Figura 51).

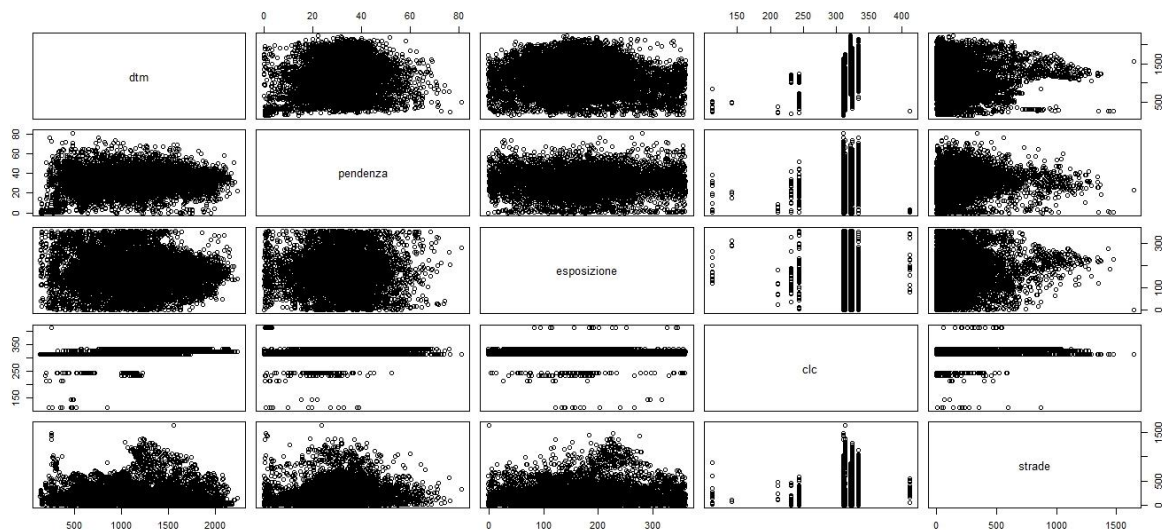


Figura 51: Matrice di diagrammi a dispersione delle variabili in gioco

Tutte le variabili rapportate alla copertura del suolo mostrano un allineamento dei punti dovuto al fatto che i valori contenuti in questo layer informativo rappresentano i codici associati alla relativa classificazione del suolo. Tutte le altre coppie di fattori predisponenti e determinanti mostrano una dispersione casuale, indicando che le variabili non sono correlate tra loro.

4.5.2 Fase di calibrazione e produzione della mappa di suscettività

L'approccio in esame sfrutta i dati dei fattori predisponenti e determinanti organizzati in classi come esposto in precedenza. Inizialmente viene considerata l'intera area coperta dal modello

digitale del terreno prodotto per il progetto Gestisco, successivamente i dati storici riferiti alle aree percorse dal fuoco vengono divisi in un dataset di calibrazione (circa il 70% delle informazioni sulle aree bruciate) per addestrare il modello, mentre la restante parte (circa il 30%) per la validazione.

Il set di calibrazione viene utilizzato per assegnare i pesi positivi, negativi e di contrasto a ciascuna classe per fattore predisponente (Tabella 16), secondo le equazioni proposte dal metodo dei pesi dell'evidenza. Questi ultimi forniscono un valore, senza unità di misura, dell'associazione spaziale tra il dataset delle occorrenze storiche e i fattori scelti per l'analisi di suscettività. I pesi mostrano quindi quali classi hanno maggiore influenza sul fenomeno ed evidenziano la correlazione, positiva o negativa, al verificarsi di un incendio per ognuna classe di ciascun fattore predisponente. Quando il peso positivo W^+ è maggiore di 2 si può affermare che la classe è estremamente predittiva; per valori compresi tra 1 e 2 la classe mostra una forte correlazione con il fenomeno in esame, moderata nel range 0.5-1 ed infine, per valori inferiori si osserva una diminuzione dell'influenza della classe rispetto agli eventi, fino a mostrarne l'indipendenza (Romero-Calcerrada, Novillo, Millington, & Gómez Jiménez, 2008).

Tabella 16: Pesi delle classi per fattore predisponente ottenuti con il modello WoE

Fattore Predisponente	Classi	W+	W-	C
DTM (m s.l.m.)	0-300	-2.377	0.270	-2.647
	300-700	-0.733	0.242	-0.975
	700-1500	0.774	-0.682	1.456
	1500-2000	0.717	-0.092	0.808
	2000-2955	-1.242	0.018	-1.260
Pendenza (°)	0-2.5	-2.475	0.217	-2.692
	2.5-13	-1.720	0.186	-1.906
	13-27	0.162	-0.045	0.207
	27-37	0.762	-0.340	1.102
	37-90	0.385	-0.118	0.503
Esposizione	Aree Piane (<i>Flat</i>)	-0.231	0.000	-0.232
	Nord	-0.465	0.041	-0.506
	Nordest	-0.151	0.016	-0.167
	Est	0.223	-0.037	0.260
	Sudest	0.362	-0.077	0.439
	Sud	0.326	-0.070	0.395
	Sudovest	0.170	-0.031	0.201
	Ovest	-0.747	0.073	-0.820
	Nordovest	-0.811	0.065	-0.876

Prossimità alla strada (m)	0-2	0.514	-0.006	0.521
	2-5	0.499	-0.008	0.507
	5-10	0.493	-0.008	0.501
	10-20	0.489	-0.017	0.507
	20-50	0.466	-0.052	0.518
	50-100	0.427	-0.071	0.498
	100-200	0.250	-0.068	0.318
	200-500	-0.244	0.102	-0.346
	500-1000	-0.753	0.110	-0.863
	>1000	-1.217	0.033	-1.250
Corine Land Cover 2018	Non Bruciabile	-2.958	0.044	-3.002
	Zone Boscate	-0.176	0.174	-0.350
	Vegetazione Arbustiva e/o Erbacea	1.589	-0.646	2.235
	Antropizzate e Agricole	-3.254	0.351	-3.606
	Zone Umide	-7.271	0.001	-7.272

Il fattore predisponente dell'elevazione ha correlazione importante con il fenomeno in esame per la fascia 700-1500 m s.l.m., a cui segue la fascia altitudinale 1500-2000 m s.l.m.. Per le altre classi invece si osserva un peso di contrasto negativo, cioè una correlazione negativa con gli eventi studiati, in particolare per la zona di pianura (-2.647).

Le fasce di pendenza con peso di contrasto positivo sono quelle con valori superiori a 13° ed il massimo si osserva nel range 27-37° (1.102), mentre una forte correlazione negativa si evince dai valori tabulati per pendenze inferiori a 13°.

I risultati ottenuti per le classi di esposizione dei versanti confermano la letteratura in quanto le classi con peso di contrasto positivo sono Sud, Sudest, Sudovest ed Est, mentre le altre mostrano correlazione negativa.

Per quanto riguarda il fattore di vicinanza alla strada, è opportuno far notare che il numero di suddivisioni in classi è mantenuto pari a dieci, come esposto in precedenza, ma si osserva che per le fasce di prossimità alla strada 0-2, 2-5, 5-10, 10-20 e 20-50 metri il peso di contrasto risulta pressoché identico. È opportuno quindi raggruppare questi cinque range in modo da ottenerne uno solo, da 0 a 50 metri di distanza dalla strada, il cui peso di contrasto è pari a 0.584 ($W^+ = 0.479$ e $W^- = -0.105$).

La copertura del suolo è sottoposta ad una procedura di riclassificazione in cinque nuove categorie durante la fase di implementazione del modello, accorpando le classi proposte dal programma CORINE. La prima comprende le porzioni del territorio in esame definibili come non bruciabili, quali le zone urbane residenziali, industriali, commerciali ed infrastrutturali,

estrattive e aree verdi urbane. A queste aree antropizzate si aggiungono le zone aperte come spiagge, dune, sabbie, rocce nude e ambienti umidi fluviali. Il modello restituisce un risultato atteso per cui il peso positivo mostra una correlazione fortemente negativa con il fenomeno in esame e, di conseguenza, un peso di contrasto negativo.

La seconda classe comprende tutto il terzo livello che descrive le zone boscate (latifoglie, conifere e misti). Il risultato è inaspettato in quanto il peso di contrasto è negativo, indicando quindi una correlazione negativa. Approfondendo questo aspetto, si trova che le zone boscate costituiscono una percentuale importante del territorio in esame (pari a circa 54%). Allo stesso tempo questa classe è la maggiormente colpita per il dataset storico degli incendi considerato, rappresentando il 45% rispetto al totale. Quindi, applicando le equazioni del modello precedentemente esposte, si osserva che l'argomento del logaritmo è molto piccolo, in quanto rappresenta il rapporto tra la porzione bruciata per la classe in esame rispetto al totale e il numero di pixel di zona boscata non bruciati fratto il totale non bruciato delle altre classi.

La terza classe raggruppa la vegetazione arbustiva e/o erbacea, le aree a vegetazione rada e i prati stabili (superfici a copertura erbacea) e i risultati mostrano una forte correlazione positiva con gli incendi.

La penultima classe descrive le aree sottoposte a pressione antropica (tessuto urbano discontinuo e aree ricreative sportive) e le zone agricole, i terreni seminativi e le colture permanenti. Infine, l'ultima classe indica le zone umide come le torbiere, per le quali non si osservano incendi registrati nel dataset storico a disposizione. Per queste ultime due categorie si ottengono pesi di contrasto negativi ed in dettaglio mostrano una forte correlazione negativa con il fenomeno studiato.

Di seguito vengono riportati i grafici dei pesi positivi, negativi e di contrasto per ciascun fattore predisponente (Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56 e Figura 57).

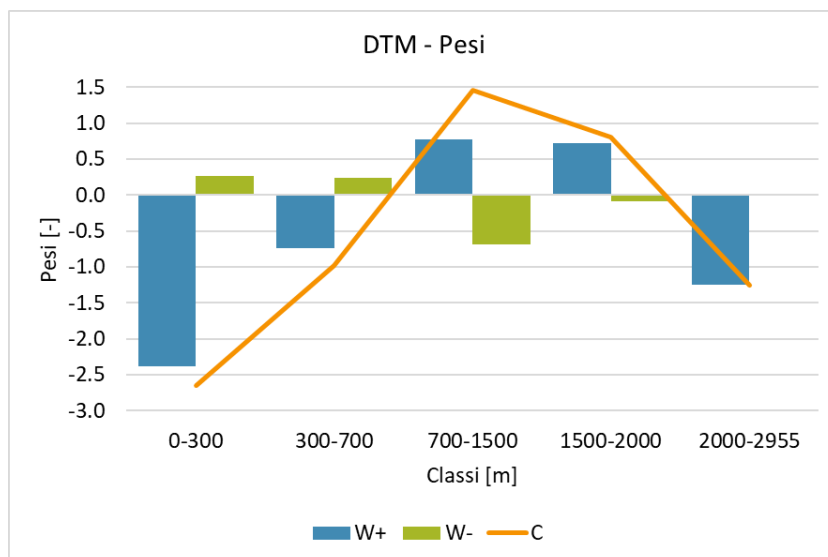


Figura 52: Pesi ottenuti dal modello WoE per il fattore predisponente dell'elevazione

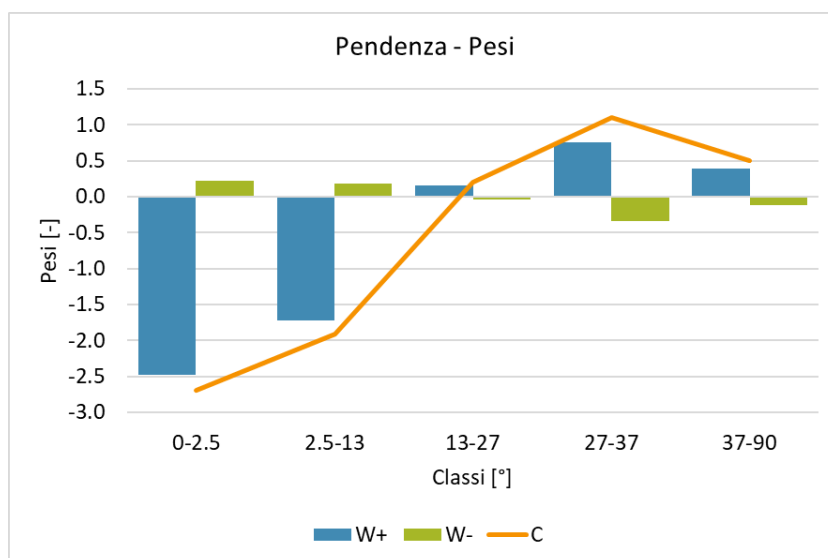


Figura 53: Pesi ottenuti dal modello WoE per il fattore predisponente della pendenza

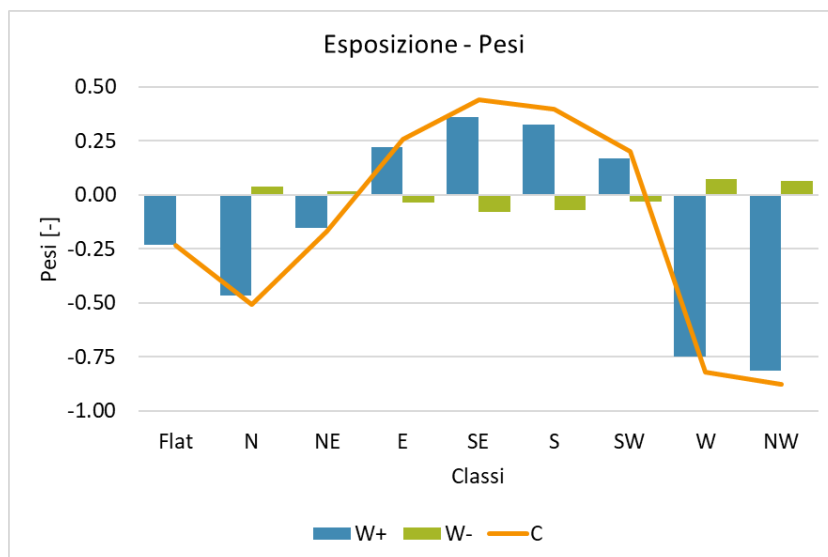


Figura 54: Pesì ottenuti dal modello WoE per il fattore predisponente dell'esposizione

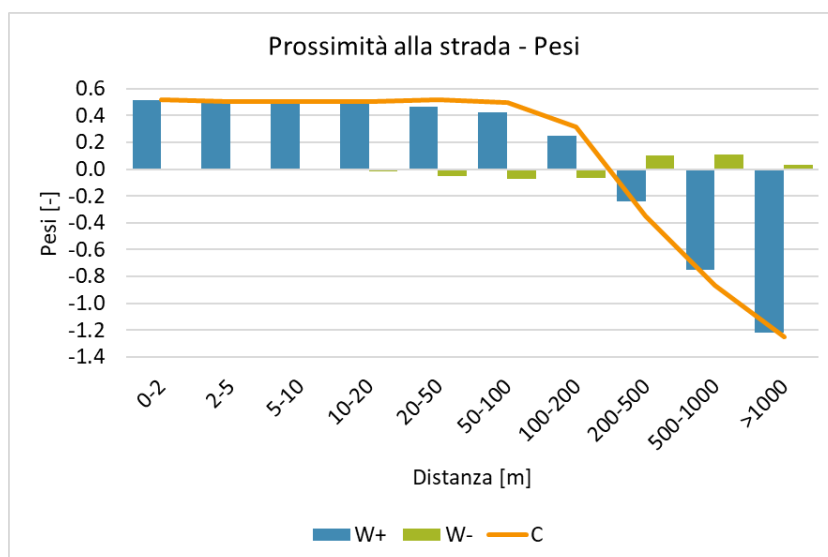


Figura 55: Pesì ottenuti dal modello WoE per il fattore predisponente della prossimità alla strada

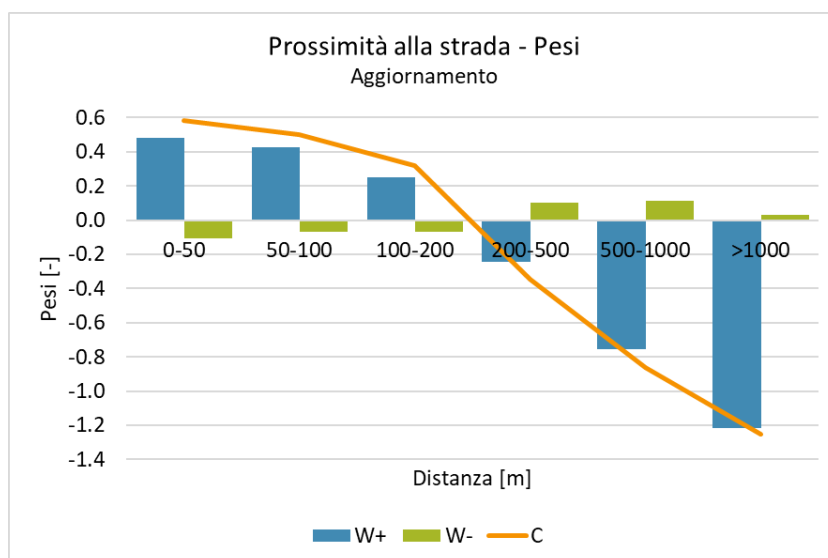


Figura 56: Pesì dal modello WoE per il fattore predisponente della prossimità alla strada aggiornati

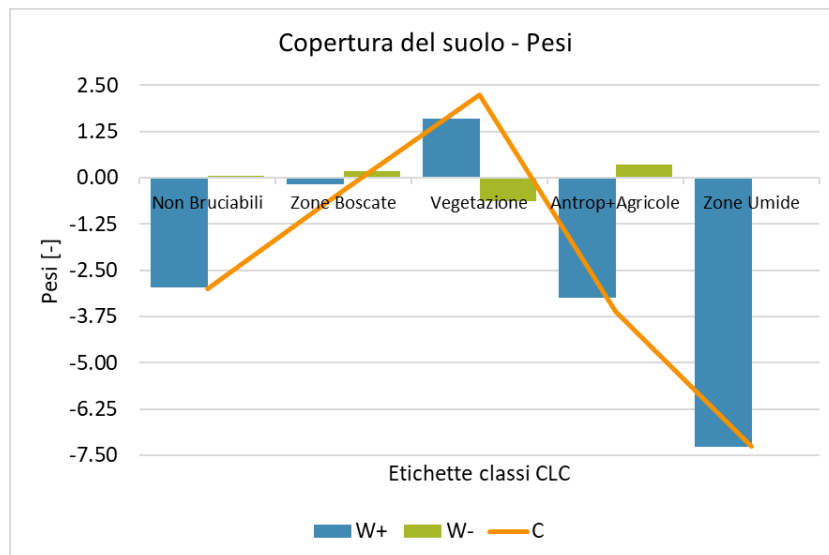


Figura 57: Pesì ottenuti dal modello WoE per il fattore predisponente della copertura del suolo (CLC 2018)

Quando i pesì delle classi di ogni fattore predisponente sono noti è possibile ottenere una mappa di suscettività degli incendi boschivi per il territorio in esame, attraverso la sovrapposizione dei diversi strati informativi pesati. Le celle della mappa contengono un valore pari alla somma dei pesì di contrasto secondo le caratteristiche del territorio in quel punto; questo indice di suscettività varia tra un minimo pari a -14.737 e un massimo di 5.816. I valori negativi indicano un'area poco suscettibile mentre quelli positivi corrispondono ad un'alta probabilità del territorio ad essere interessato da incendio.

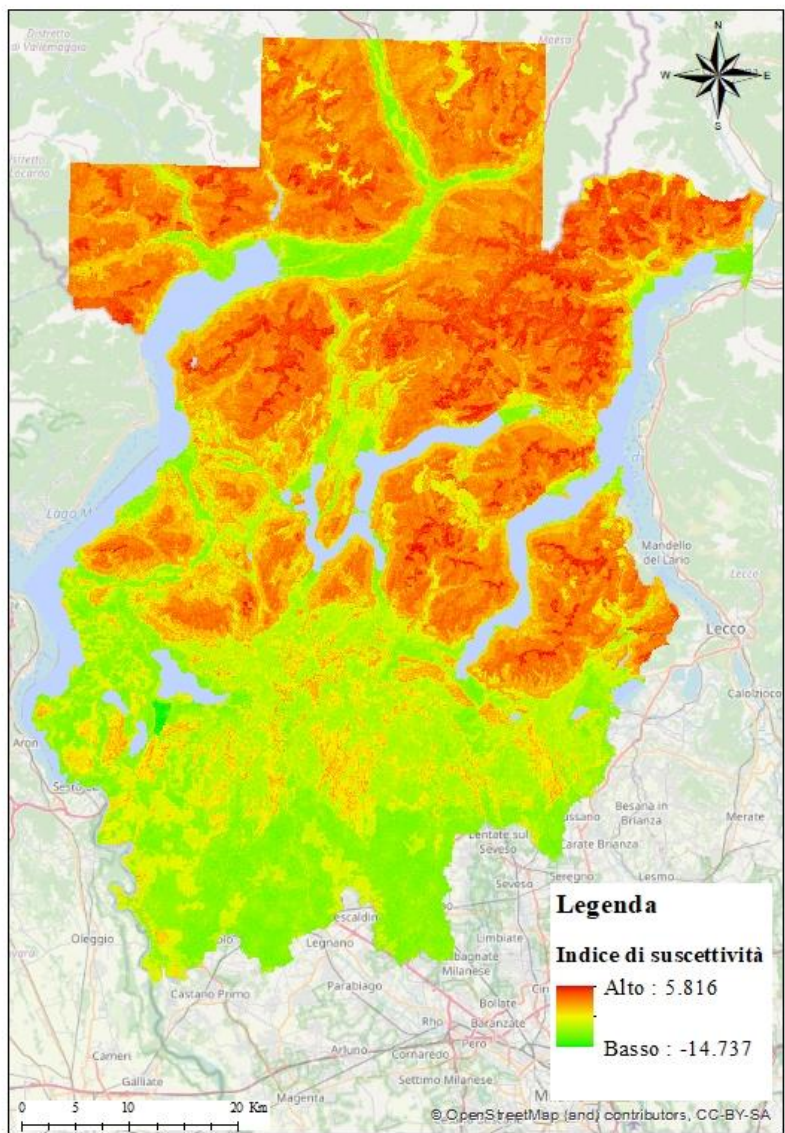


Figura 58: Rappresentazione dell'indice di suscettività per l'area di studio

Inizialmente i valori caratterizzanti la mappa, ottenuti come somma dei pesi di contrasto di ogni fattore predisponente, vengono suddivisi in dieci classi di uguale ampiezza e si osserva la distribuzione percentuale dei dati nelle classi (Tabella 17).

In seguito, si esegue un raggruppamento in modo da ottenere solo quattro intervalli di suscettività: trascurabile (2-3 %), bassa (circa 10%), media (20-30%) e alta (60-70%).

Tabella 17: Suddivisione in dieci intervalli

Intervallo	Etichetta	n. pixel	Percentuale
[5.816;3.761)	1	0	0.00%
[3.761;1.705)	2	0	0.00%
[1.705;-0.350)	3	1132	0.07%
[-0.350;-2.405)	4	5273	0.34%
[-2.405;-4.461)	5	18885	1.21%
[-4.461;-6.516)	6	31386	2.02%
[-6.516;-8.572)	7	143408	9.23%
[-8.572;-10.627)	8	261345	16.81%
[-10.627;-12.682)	9	489782	31.51%
[-12.682;-14.738]	10	603324	38.81%

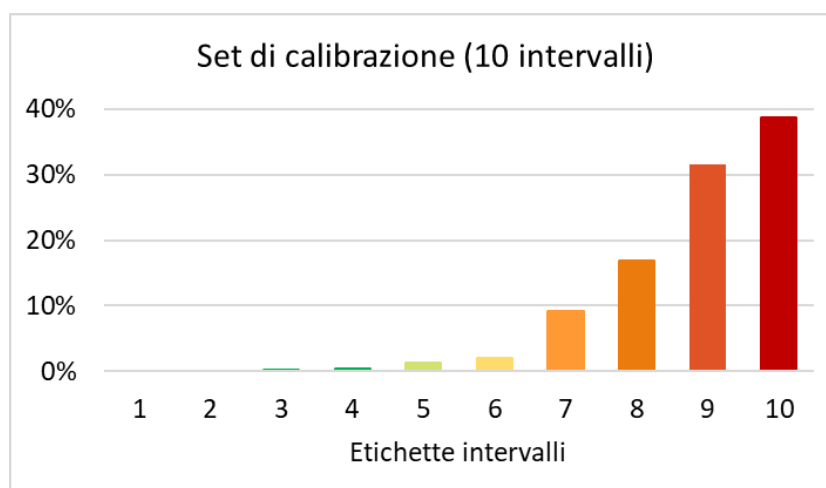


Figura 59: Distribuzione dei pixel bruciati nelle dieci classi di suscettività

La distribuzione dei dati storici degli incendi scelti per la calibrazione all'interno delle dieci classi ha andamento crescente (Figura 59). I primi sei intervalli contengono solo il 3.65% della totalità del dataset in esame e quindi sono raggruppate nella classe di suscettività trascurabile; per i valori percentuali già trovati, il settimo intervallo rappresenta la classe di suscettività bassa, mentre il livello medio coincide con l'ottavo intervallo; infine, gli ultimi due intervalli vengono accorpati (circa 70%) e rappresentano la classe di suscettività alta (Figura 60).

Infine, è possibile produrre la mappa di suscettività dell'area di studio adottando la suddivisione in soli quattro livelli di suscettività (Figura 61).

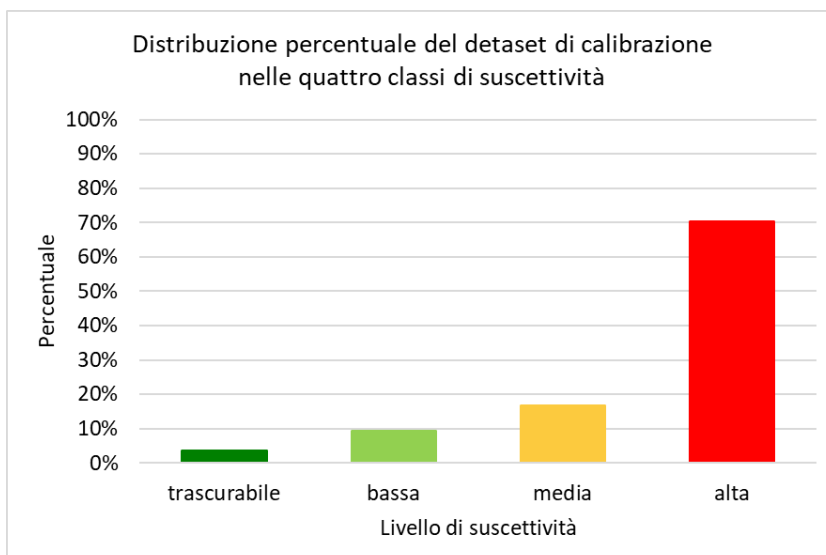


Figura 60: Distribuzione percentuale dei pixel di calibrazione nelle quattro classi di suscettività

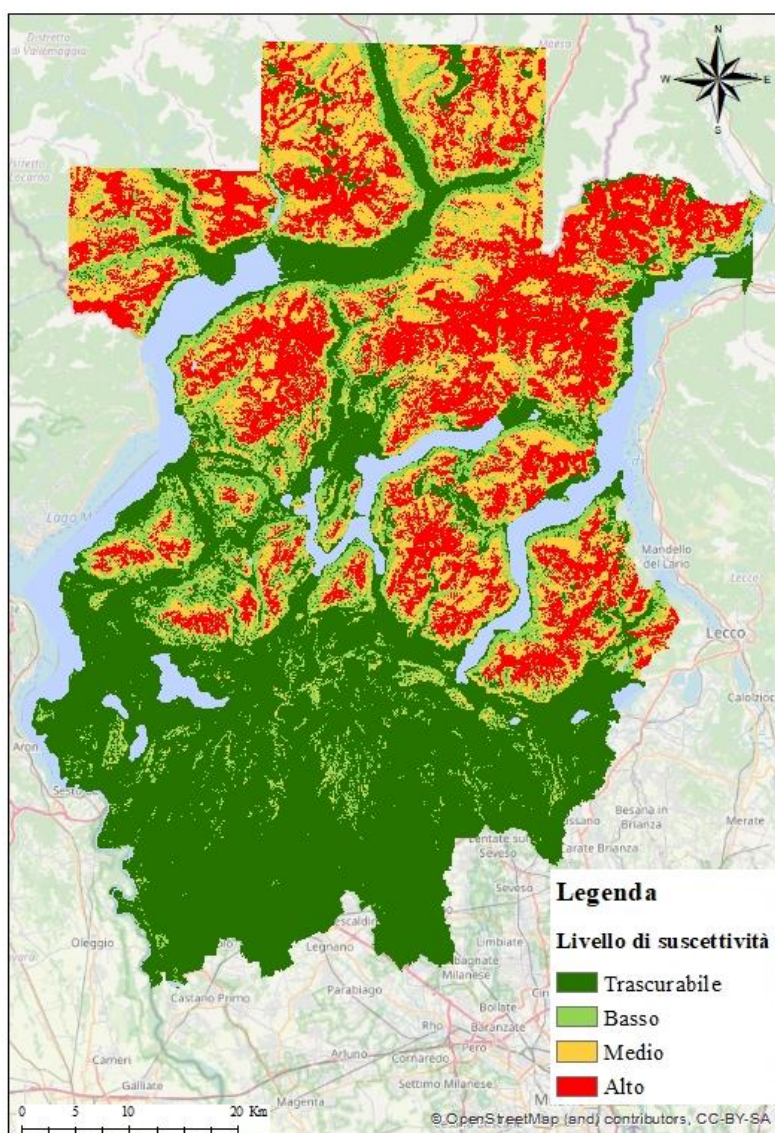


Figura 61: Mappa di suscettività su quattro livelli per l'area di studio

4.5.3 Fase di validazione

Una volta addestrato il modello statistico scelto, grazie al dataset di calibrazione, e ottenuta la mappa a quattro livelli di suscettività, si prosegue con la fase di validazione. Questa operazione viene svolta utilizzando la restante parte dei dati a disposizione, per verificare la stabilità del modello e valutarne la resa.

Attraverso la produzione di un grafico riassuntivo, contenente la distribuzione percentuale dei territori dell'area di indagine, dei dati di calibrazione e validazione nelle quattro classi di suscettività, è possibile valutare l'efficacia del modello nel descrivere il fenomeno analizzato e dei risultati prodotti.

Lo scopo del metodo applicato è quello di ottenere una mappa di suscettività in grado di differenziare le aree più predisposte al passaggio del fuoco da quelle meno suscettibili al fenomeno. Di conseguenza, appare evidente come l'efficacia del modello nell'individuare le aree più suscettibili sulla base dei dati osservati debba essere valutata insieme alla sua capacità di differenziare in maniera adeguata il territorio: risulterebbe infatti inutile uno strumento che produca una mappatura in cui gran parte del territorio in esame ricada, per esempio, ad alta suscettibilità.

Per questo motivo è necessario tenere in considerazione due aspetti: la percentuale di pixel individuati a suscettività bassa o trascurabile e la distribuzione dei dati di validazione nei quattro livelli definiti. In primo luogo, risulta che oltre il 50% dell'area di studio viene classificato come soggetto a suscettività bassa o trascurabile, mentre la restante porzione è ripartita tra gli altri due livelli. Il risultato ottenuto è positivo in quanto il modello non identifica porzioni eccessive di territorio all'interno delle classi a medio-alta suscettività, evitando così di vanificare l'efficacia della metodologia adottata.

Successivamente, si osserva la distribuzione percentuale del dataset di validazione nelle quattro classi: la percentuale di pixel a suscettività trascurabile è pari al 2%, il 10.3% ricade nel livello di bassa suscettività e il 16.2% nella fascia a media suscettività, mentre il dato più incoraggiante si evidenzia per il livello di alta suscettività, il quale contiene il 71.5% dei pixel bruciati di validazione.

L'osservazione della distribuzione dei pixel di validazione nei quattro livelli di suscettività conferma la capacità previsionale del modello e la sua stabilità, dal momento che il dataset utilizzato è diverso da quello impiegato nella fase di calibrazione (Figura 62).

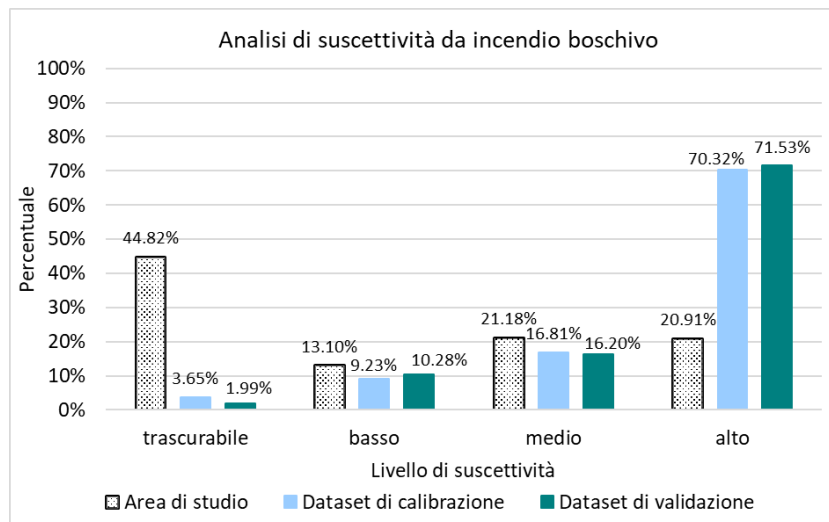


Figura 62: Distribuzione percentuale nelle quattro classi di suscettività dei pixel dell'area di studio, del dataset di calibrazione e di validazione

5. Discussione dei risultati

In seguito alla fase di validazione del modello, si analizza la sola ripartizione dei pixel dell'area di studio sui quattro livelli di suscettività. Dal grafico in Figura 63, si evince che circa la metà dei dati appartiene alla categoria di trascurabile o bassa propensione al fuoco; la restante è ripartita tra i livelli medio e alto. Tale risultato conferma quanto esposto in precedenza e dimostra quanto il modello elaborato rappresenti uno strumento attendibile, in grado di individuare quali sono le porzioni di territorio in esame potenzialmente più o meno predisposte all'incendio.

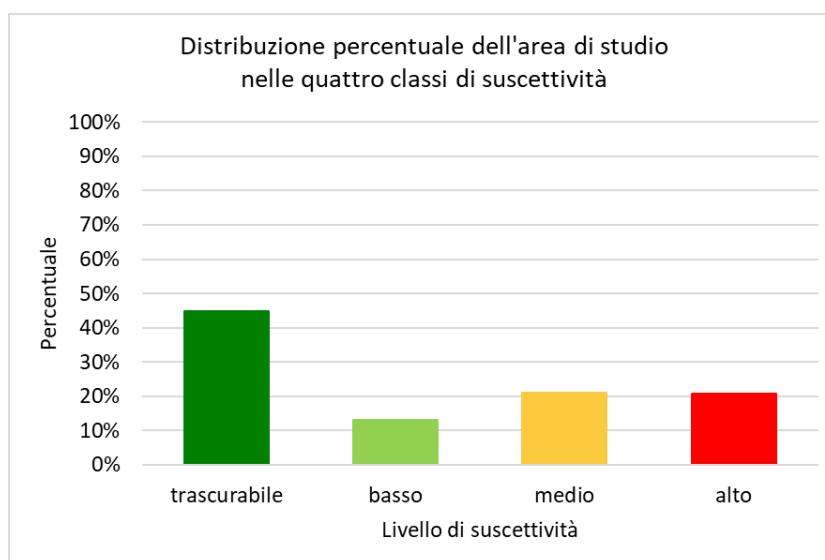


Figura 63: Distribuzione percentuale dei pixel dell'area di studio nelle quattro classi di suscettività

In generale, i pixel la cui suscettività risulta trascurabile sono localizzati nella porzione pianeggiante e di fondovalle dell'area di studio. In queste zone peraltro, si sono registrati un basso numero di incendi boschivi nel periodo 2009-2018, associati anche ad una estensione relativamente ridotta (Figura 64).

Il territorio classificato con livello di suscettività alto rappresenta il 20% del totale esaminato e come mostrato in Figura 64 coincide con le aree più colpite dagli incendi, in termini di numerosità e di superficie bruciata.

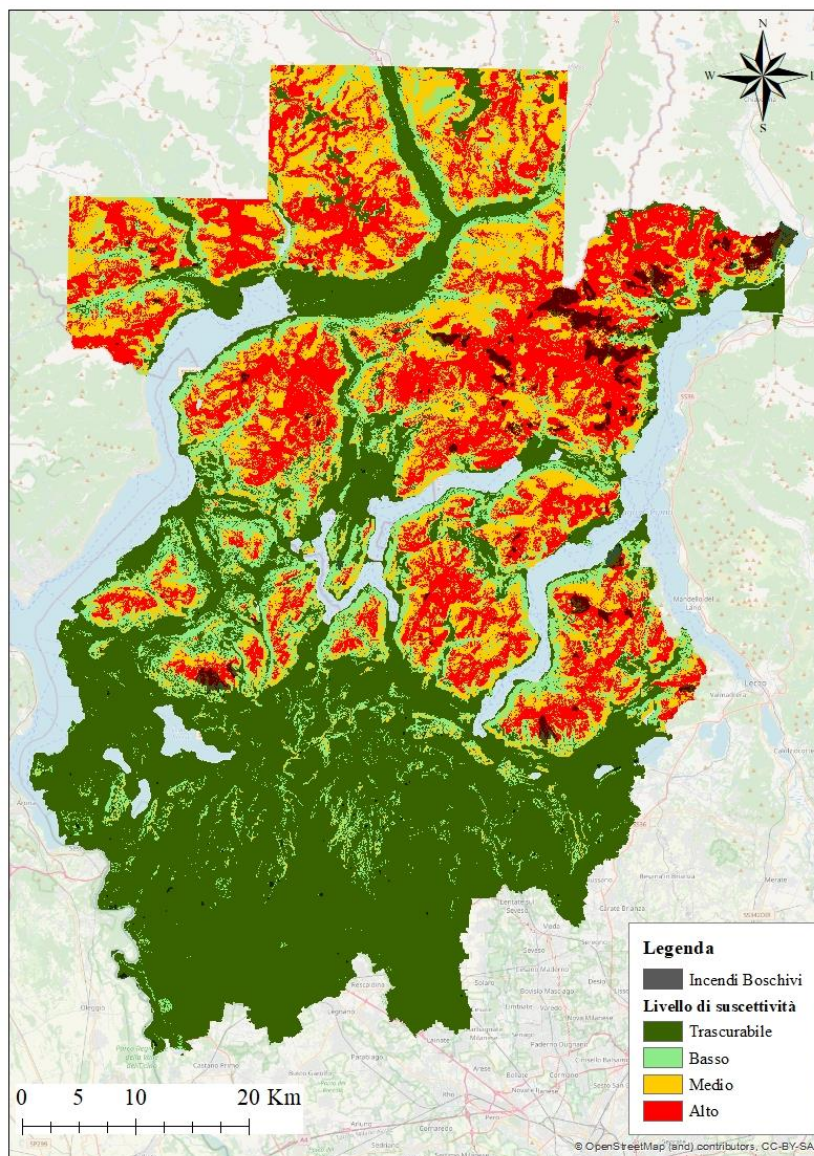


Figura 64: Distribuzione degli incendi boschivi per il decennio 2009-2018 sulla mappa di suscettività

Si effettua adesso una verifica a campione del risultato prodotto in relazione agli eventi storici, al fine di evidenziare le potenzialità e le criticità del metodo applicato per l'analisi di suscettività.

Nel primo esempio (Figura 65) si affronta il caso di un incendio situato in un'area classificata ad alta suscettività.

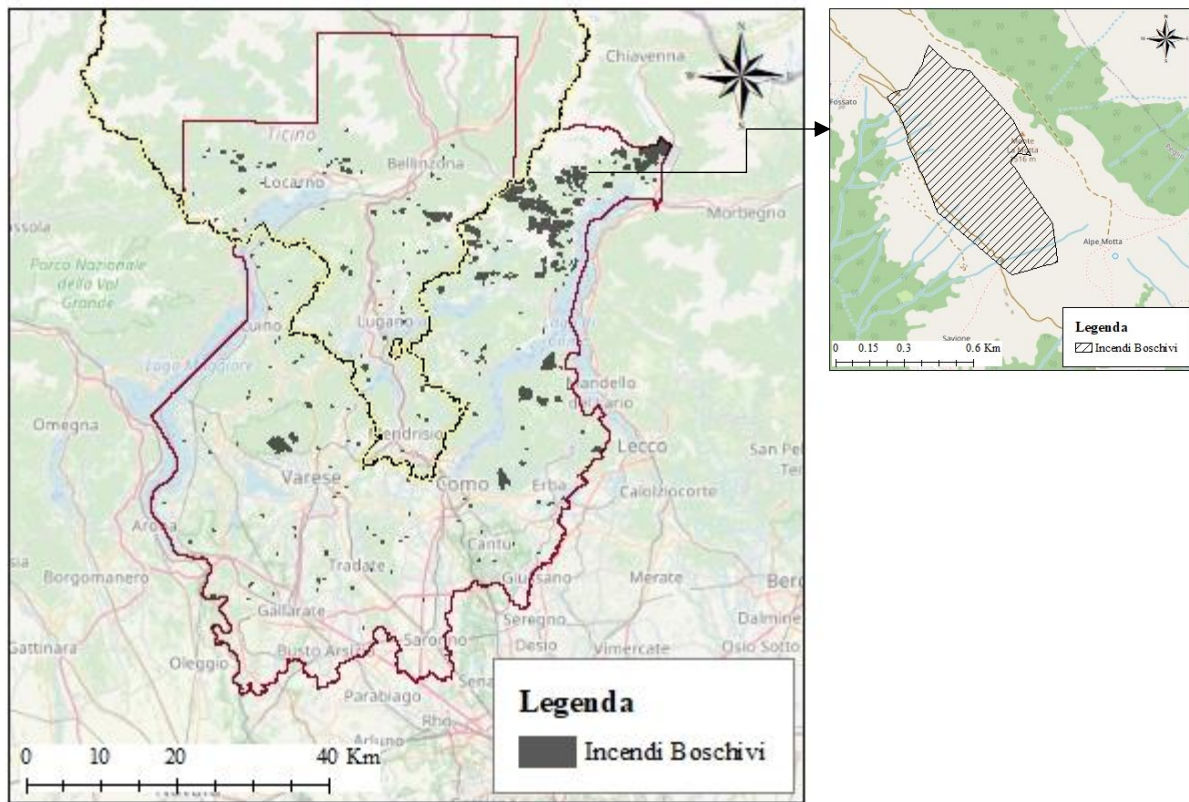


Figura 65: Esempio di un incendio boschivo in area classificata ad alto livello di suscettività

L'incendio illustrato si trova all'interno del territorio del comune di Peglio (CO). Le informazioni allegate al dato spaziale dell'evento riportano che l'incendio si è verificato in data 31/03/2012 ed ha estensione pari a 0.37 km^2 . In aggiunta è nota la causa dell'evento, classificata come volontaria.

I layer informativi che definiscono i fattori predisponenti e determinanti caratterizzanti l'area comunale sono riportati nelle seguenti mappe (Figura 66).

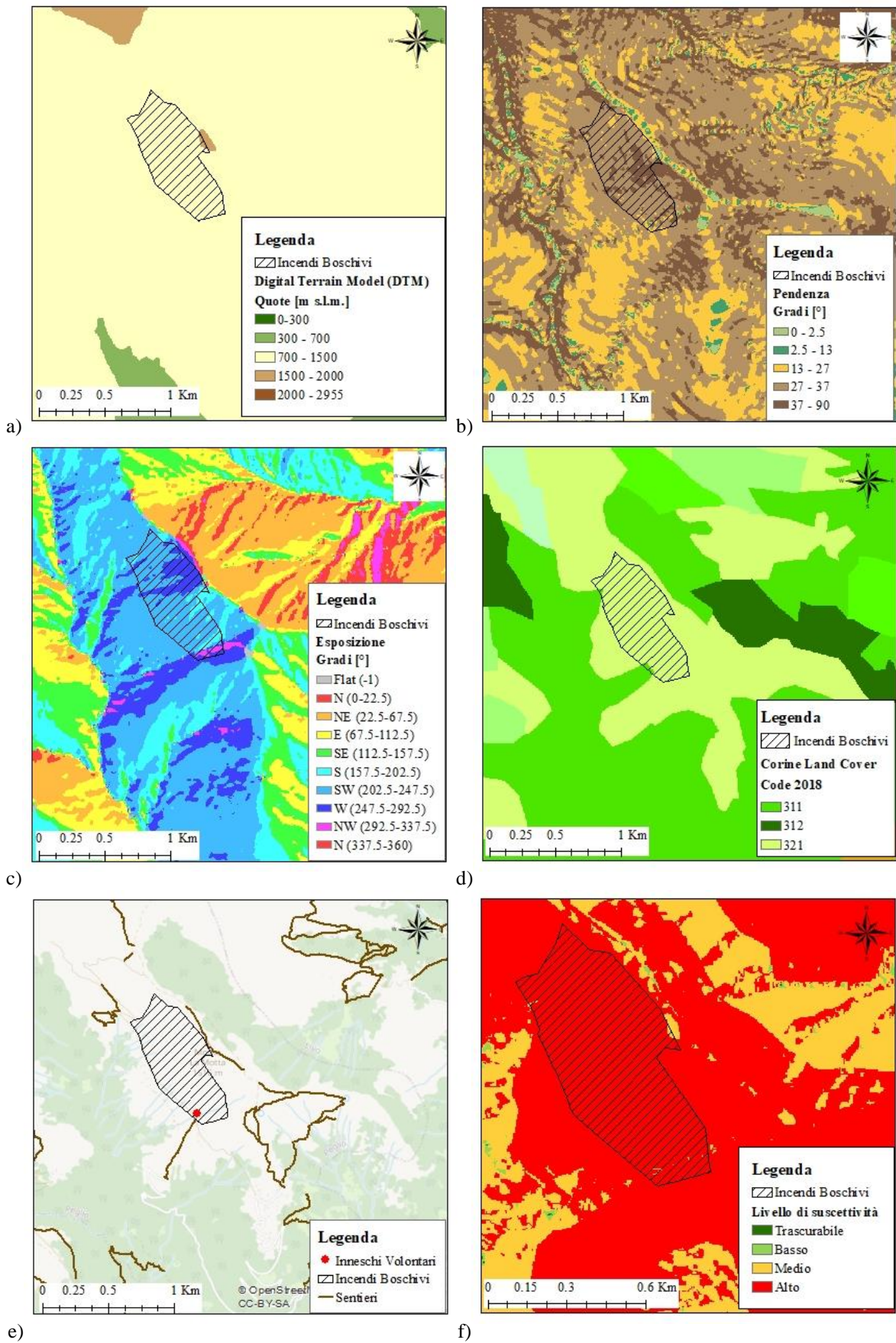


Figura 66: Incendio di Peglio (CO): dettaglio della quota (a), pendenza (b), esposizione (c), Corine Land Cover 2018 (d), punto di innesco e sentieri (e), suscettività (f)

Dalle mappe riportate in Figura 66, si osserva che l'incendio esaminato si sviluppa in un'area posta nel range di quota 700 - 1500 m s.l.m., in un territorio particolarmente acclive, con esposizione a Sud e Sudovest. La superficie bruciata interessa un'area a pascolo naturale o prateria ed è caratterizzata da una particolare geometria che può essere descritta a partire dall'osservazione del punto di innesco. Esso infatti è individuato in prossimità di un sentiero posto nella parte inferiore dell'area bruciata, la quale poi si sviluppa verso Nordovest assumendo la configurazione stretta e lunga. Questa geometria può essere associata al già citato "effetto camino", in cui si osserva il preriscaldamento di porzioni di territorio in salita a causa di moti ascensionali, che favoriscono la propagazione del fronte di fiamma verso l'alto. In aggiunta, quando l'incendio si estende verso l'una o l'altra direzione, è possibile che sia intervenuto il vento ad alimentarlo.

In questo caso specifico, si verifica la combinazione delle classi dei fattori predisponenti e determinanti alle quali corrispondono i più alti pesi di contrasto. L'area in esame risulta quindi essere definita da un livello di suscettività alto, in quanto presenta tutte le caratteristiche favorevoli all'innesco.

È necessario sottolineare che il territorio interessato dall'evento esaminato risulta particolarmente colpito da incendi boschivi nel corso del decennio 2009-2018, come è riportato in Figura 65. In un contesto di questo tipo, i modelli sperimentali sono facilmente in grado di individuare le aree maggiormente suscettibili al passaggio del fuoco. Infatti, la potenzialità di tali metodi risiede proprio nella quantità di dati storici a disposizione: più ampio è il dataset, più affidabile è il risultato prodotto dall'analisi di suscettività. Per il caso in esame, la presenza di molteplici eventi storici registrati rispetto ad un incendio isolato di grande estensione, fornisce un ulteriore strumento di validazione della correttezza dell'analisi condotta, definendo l'area in esempio come a media o alta suscettività.

Successivamente, si approfondisce il caso di un evento collocato in una porzione di territorio di studio classificato dal modello come a basso livello di suscettività (Figura 67), in modo da individuare le cause della discordanza tra l'analisi prodotta e il dato osservato, spiegando eventuali limiti del metodo in uso.

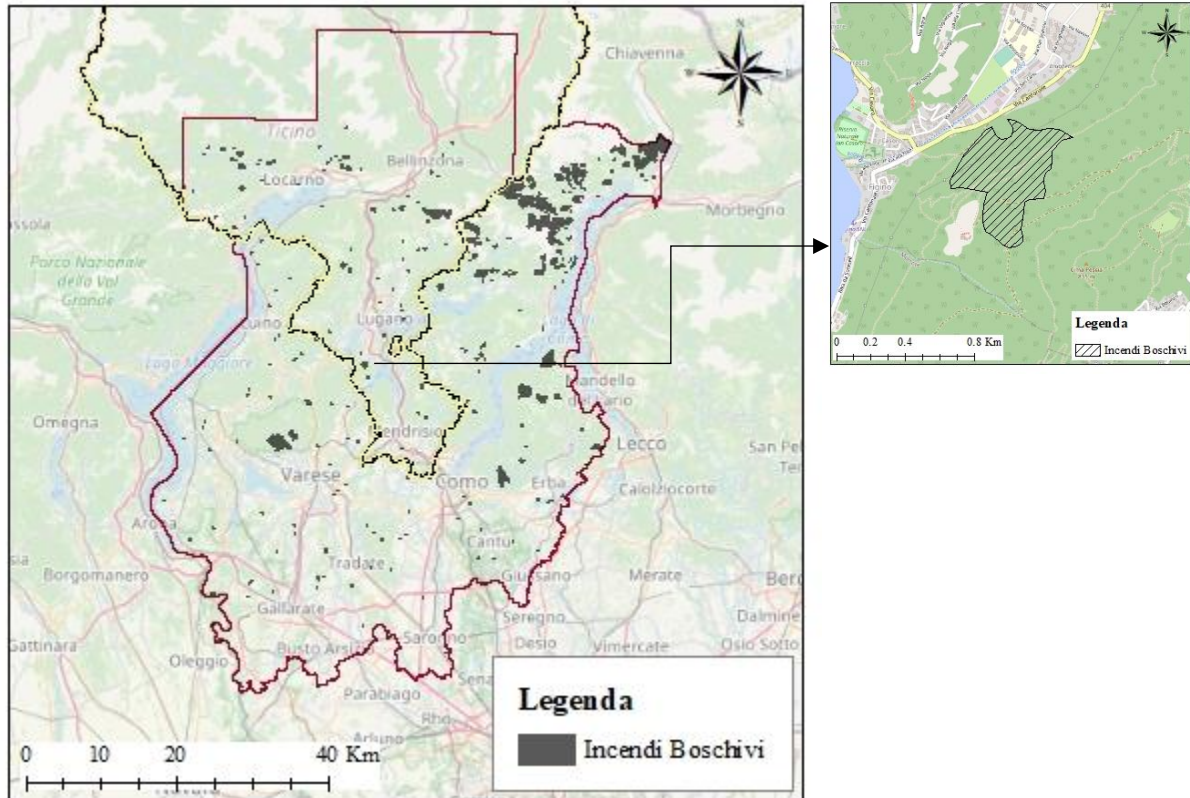


Figura 67: Esempio di un incendio boschivo in area classificata a basso livello di suscettività

Si tratta di un incendio situato nel territorio ticinese, in particolare all'interno del quartiere Barbengo del comune di Lugano. L'evento, di origine volontaria, si è verificato il 19 marzo 2009 e si è esteso su un'area di 0.26 km². Questo esempio, a differenza del precedente, costituisce un evento isolato situato in un'area in cui non sono stati registrati ulteriori dati storici.

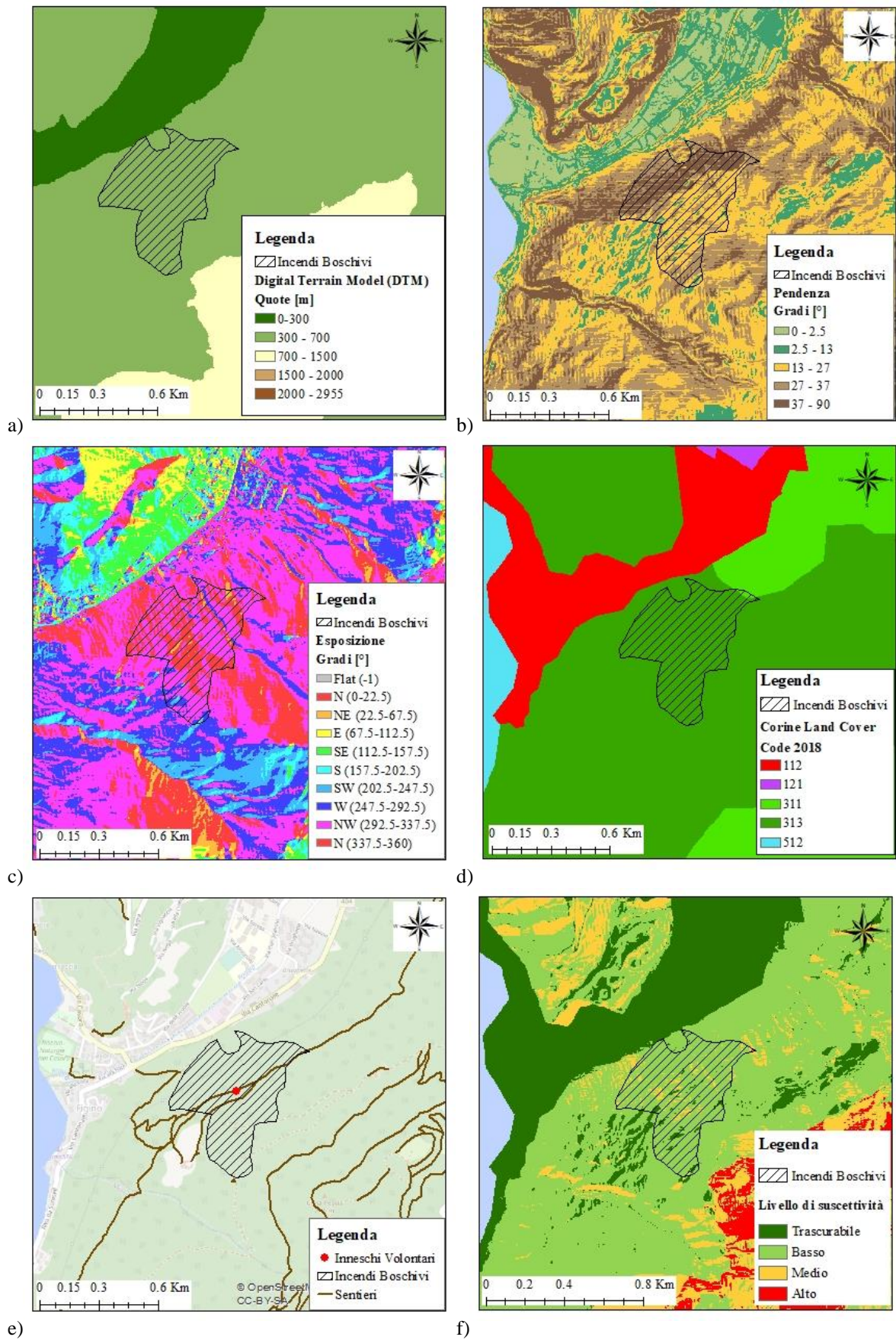


Figura 68: Incendio nel territorio di Lugano (quartiere Barbengo): dettaglio della quota (a), pendenza (b), esposizione (c), Corine Land Cover 2018 (d), punto di innesco e sentieri (e), suscettività (f)

Da quanto riportato in Figura 68, l'area in esame è situata in una zona collinare, con un'elevazione compresa tra 300 e 700 m s.l.m., una pendenza superiore a 13 gradi ed esposizione dei versanti in direzione Nord e Nord-Ovest. La superficie bruciata interessa un bosco misto di latifoglie e conifere, il quale è attraversato da un sentiero su cui è posizionato il punto di innesco.

L'incendio si sviluppa in un contesto in cui le classi relative a variabili come la prossimità ai sentieri e la pendenza del versante favoriscono il verificarsi dell'evento; tuttavia, i fattori predisponenti della quota, dell'esposizione e della copertura del suolo, in questo caso specifico, indicano una bassa predisposizione al fuoco. È proprio la combinazione di questi ultimi tre aspetti ad influire sulla bassa suscettività associata all'area.

Confrontando i due casi riportati in esempio (Figura 65, Figura 67), si evince che territori definiti ad alta suscettività sono caratterizzati negli anni dalla presenza di un alto numero di incendi; d'altra parte, aree interessate da pochi eventi isolati risultano classificate a suscettività bassa o trascurabile.

La configurazione geometrica di questo incendio non segue una direzione preferenziale di propagazione, verosimilmente a causa dell'assenza o della bassa intensità di vento.

L'episodio di Lugano (Figura 67), così come quello avvenuto a Peglio (Figura 65), è dovuto ad un atto volontario: il modello elaborato, però, classifica l'area bruciata con un alto livello di suscettività solo in uno dei due casi. Questo evidenzia uno dei limiti del metodo utilizzato per l'analisi del fenomeno in esame, in quanto la rappresentazione dell'influenza che l'azione umana ha nello sviluppo di un evento è un aspetto complesso da includere nel modello. Tale criticità può essere superata attraverso l'analisi delle relazioni esistenti tra gli incendi registrati ed ulteriori fattori determinanti, come la distanza da aree ricreative, da centri urbani o da zone industriali (Romero-Calcerrada, Novillo, Millington, & Gómez Jiménez, 2008).

Infine, si riporta un ulteriore esempio di area bruciata. In questo caso, l'incendio è collocato in corrispondenza del confine italo-svizzero.

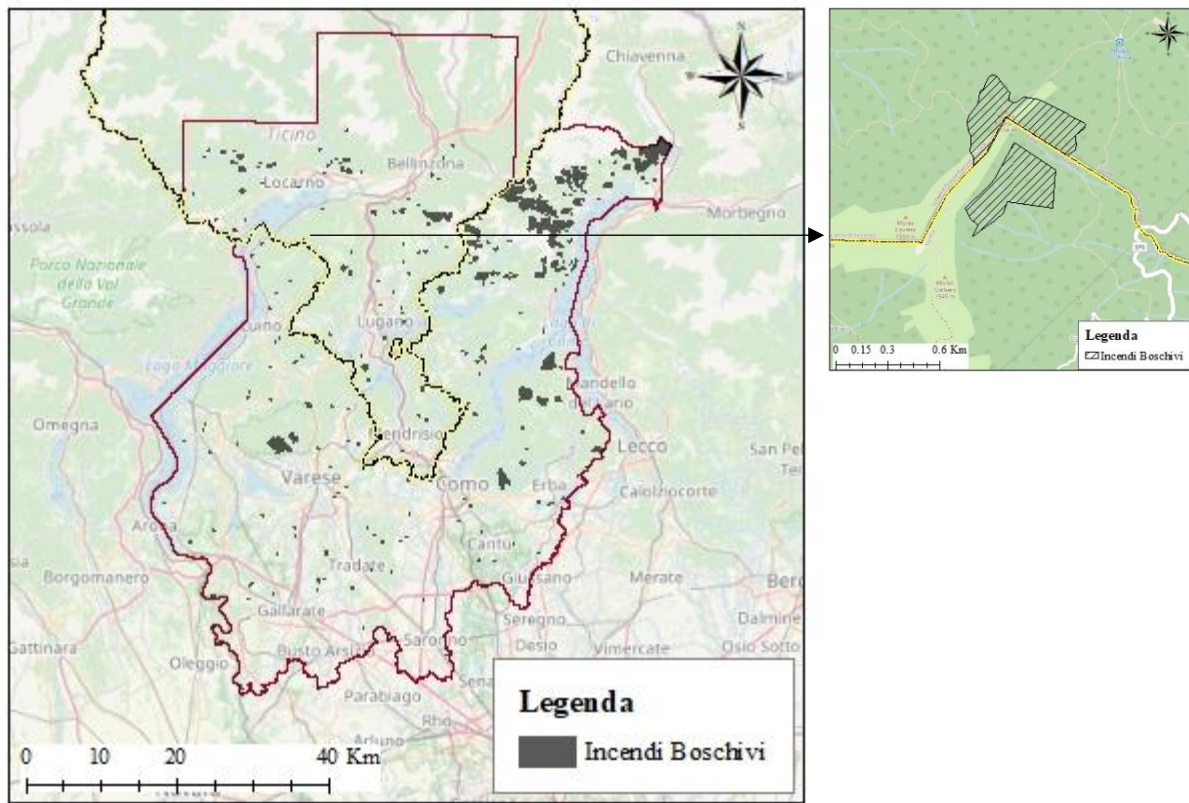


Figura 69: Esempio di un incendio boschivo transfrontaliero

L'evento riportato in Figura 69, sviluppandosi a ridosso del confine, è inserito sia nel dataset italiano sia in quello svizzero. Pertanto, la superficie bruciata risulta essere suddivisa in due poligoni distinti che fanno riferimento ad un unico episodio, avvenuto il 15 aprile 2017. Il punto di innesco è rilevato nel territorio italiano e, dalle informazioni disponibili, si evince che la causa è stata classificata come dubbia/non classificabile.

Dall'osservazione dell'incendio riportato in esempio, si possono notare le problematiche associate alla perimetrazione di casi che si verificano in corrispondenza del confine. Infatti, la rappresentazione dell'evento appare discontinua: il poligono svizzero è precisamente tagliato sul bordo della frontiera, mentre al dato italiano manca la parte di rilievo che consentirebbe di ottenere un'impronta continua dell'area bruciata dove, peraltro, è situato il punto di innesco (Figura 70).

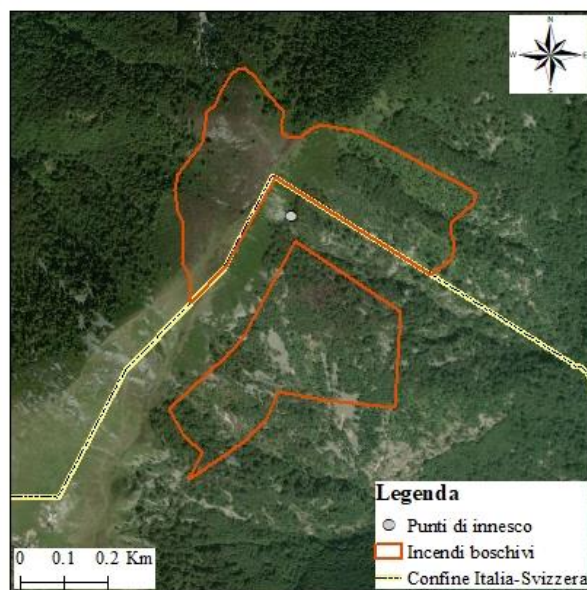


Figura 70: Dettaglio del territorio interessato dall'incendio transfrontaliero

Il motivo di tali incoerenze risiede probabilmente nella metodologia di perimetrazione: il rilievo delle aree bruciate viene generalmente eseguito tramite l'osservazione di immagini satellitari e sopralluoghi, effettuati spesso a distanza di mesi dall'evento. Pertanto, è possibile che l'area percorsa dal fuoco non fosse perfettamente visibile. Inoltre, in questo caso specifico l'indagine in sito può essersi rivelata difficoltosa a causa della posizione dell'area colpita, situata in cima ad un versante (Figura 70).

La mappa di suscettività, ottenuta utilizzando dati nativi del territorio, mostra le sue potenzialità soprattutto in ambito transfrontaliero, in quanto fornisce un'informazione continua sulla predisposizione al fuoco del territorio (Figura 71).

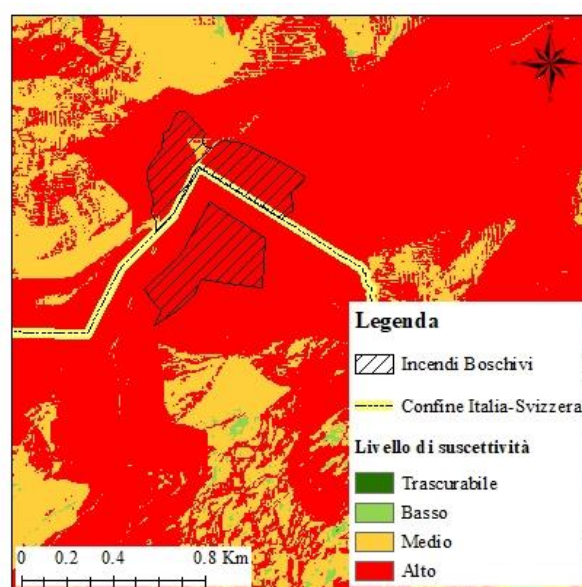


Figura 71: Dettaglio della mappa di suscettività per l'incendio boschivo transfrontaliero

5.1 Confronto con la mappatura esistente

È possibile eseguire un'ulteriore considerazione analizzando le carte di rischio incendio boschivo già realizzate per la regione Lombardia e per il Canton Ticino, in modo da confrontarle con la mappa di suscettività prodotta in questo studio.

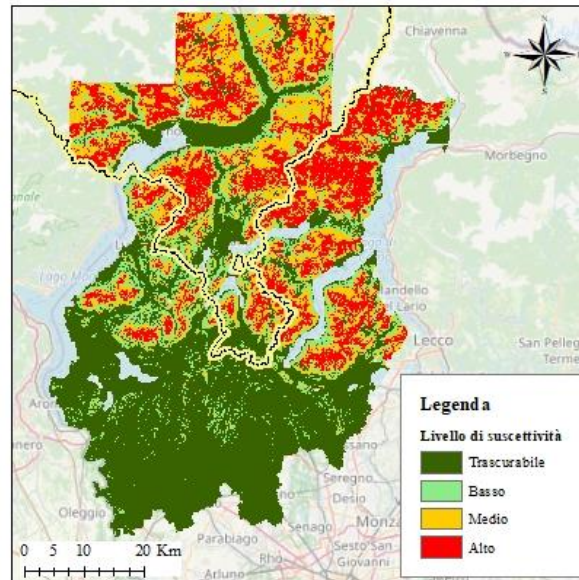


Figura 72: Mappa di suscettività prodotta per l'area di studio

Innanzitutto, è importante sottolineare che suscettività e rischio sono due concetti molto differenti. La prima rappresenta la predisposizione di un territorio con determinate caratteristiche ad essere percorso dal fuoco. Il rischio, invece, è legato al concetto di probabilità di occorrenza di un evento di una data intensità in una specifica area, con effetto sui beni, sull'ambiente, sulle risorse economiche e quindi sulla vita umana. Infatti, le mappe di rischio considerano l'esposto sul territorio: di conseguenza, la classificazione è strettamente connessa alla presenza di zone urbanizzate, aree industriali, infrastrutture.

Per quanto riguarda le mappe di rischio realizzate dai due Paesi, è necessario ricordare che vengono utilizzati due metodi diversi di classificazione: la regione Lombardia propone una suddivisione in cinque categorie (Figura 73); dall'altra parte, il Ticino utilizza un criterio differente, distinguendo le aree a rischio basso rispetto a quelle a rischio variabile da medio a molto alto per due diversi regimi stagionali di incendio (Figura 74).

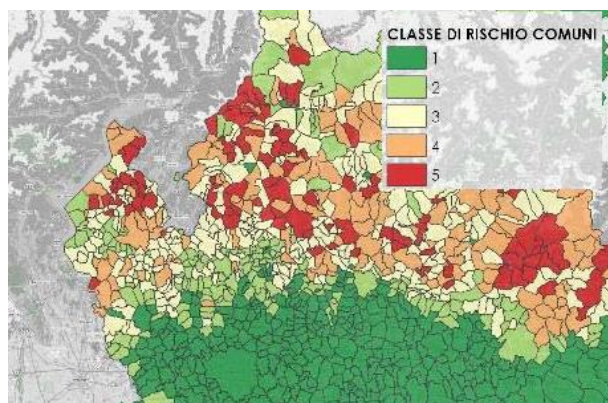


Figura 73: Carta di rischio incendio boschivo della regione Lombardia - zoom sulla porzione italiana dell'area di studio (Regione Lombardia, 2020)

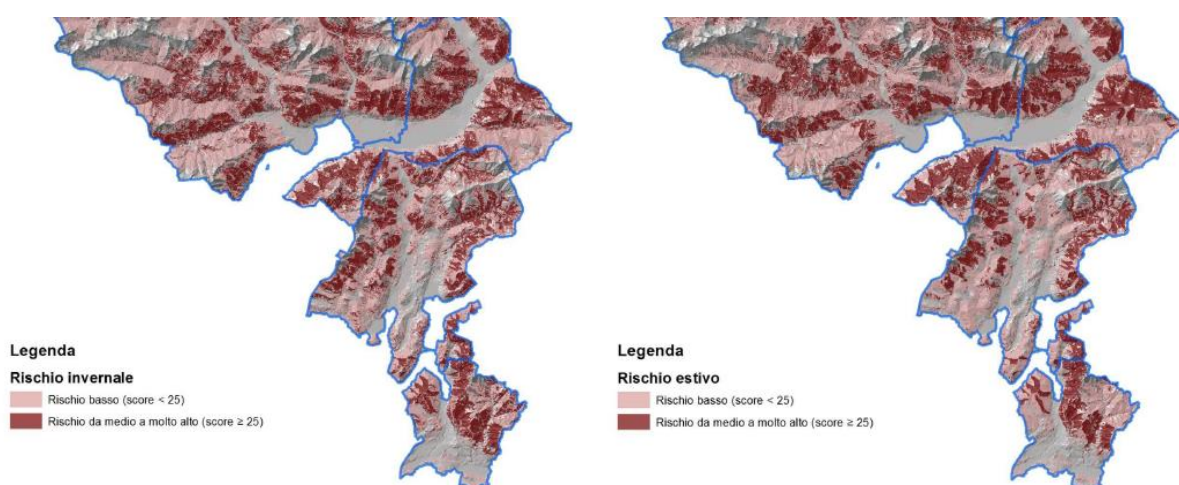


Figura 74: Carta di rischio incendio invernale (a sinistra) ed estivo (a destra) per il Canton Ticino – zoom sulla porzione svizzera dell'area di studio (Ghiringhelli, Guerini, Ortelli, Sacchi, & Bertogliati, 2016)

Da un primo confronto visivo delle mappe in esame sulla porzione italiana, emerge una corrispondenza tra i risultati per il territorio pianeggiante tra le province di Varese e Como: alle classi di suscettività trascurabile o bassa si associano aree a rischio 1 o 2.

Inoltre, la zona settentrionale della provincia di Como, particolarmente interessata da incendi, risulta sia ad alta suscettività che ad elevato rischio.

Si può riscontrare lo stesso risultato per la porzione svizzera dell'area di studio e le rispettive mappe di rischio, sia invernale che estivo.

Sebbene le mappe siano concettualmente diverse, la distribuzione spaziale della suscettività non si discosta molto da quella proposta dalla mappatura del rischio: infatti, le classificazioni del territorio non mostrano discrepanze particolarmente vistose.

6. Conclusioni e Sviluppi futuri

Questa tesi presenta l'analisi di suscettività da incendio boschivo quale strumento di supporto alla pianificazione di protezione civile in un contesto transfrontaliero. Il risultato si affianca alle carte esistenti di pericolosità disponibili per la medesima area tematica presso gli enti competenti. Il territorio è quello dell'Alto Ticino al confine tra Italia e Svizzera.

La cartografia prodotta dai due Stati in materia di calamità naturali è per molti aspetti diversa, oltre che nella rappresentazione grafica, anche nei criteri di classificazione del territorio così come sono diverse le strutture organizzative che presidiano la gestione delle emergenze. La scelta di procedere con una analisi di suscettività è dettata dalla possibilità di attingere a dati territoriali omogenei, provenienti dalla stessa fonte o comunque riconducibili ad una sostanziale uniformità. La Svizzera non rientra tra i paesi comunitari e i dati territoriali sono censiti, prodotti e rappresentati secondo direttive e fonti diverse da quelle che orientano e vincolano le stesse attività in Europa. In questo senso l'analisi presentata può configurarsi come una mappa "nativamente transfrontaliera" nel senso che attinge a dati e metodi sostanzialmente uniformi sull'intera area considerata. Il territorio in esame, peraltro, è effettivamente omogeneo dal punto di vista geomorfologico, trattando del medesimo contesto idrografico. Altresì è interessata dalla medesima esposizione ai rischi naturali tra i quali quello di incendio boschivo.

Non è infrequente che una specifica emergenza venga a interessare porzioni di territorio comuni sui due lati del confine. Queste osservazioni sono alla base del lavoro svolto che si colloca, come detto, a supporto alla gestione del rischio transfrontaliero nella misura in cui può essere usato in maniera parallela dalle strutture operative di entrambi i paesi.

La procedura proposta si fonda sulla individuazione di fattori predisponenti e determinanti di varia natura. Un modello statistico viene così addestrato sulle relazioni tra le diverse combinazioni di questi fattori e le osservazioni disponibili. Le variabili scelte sono di tipo morfologico, di copertura ed uso del suolo e la prossimità alla rete stradale.

Il risultato prodotto è una mappa che propone una classificazione del territorio secondo quattro livelli di suscettività: trascurabile, basso, medio e alto. Tale rappresentazione è poi validata con un set di osservazioni indipendenti offrendo risultati assolutamente confortanti.

È necessario considerare che gran parte degli eventi registrati sul territorio in esame è associata ad azioni antropiche di ordine colposo o doloso: si tratta di un aspetto complesso e di difficile

concettualizzazione che, nel metodo seguito, è indirizzato dalla prossimità alla rete viaria e dunque dalla effettiva accessibilità dei siti.

Il modello proposto, come del resto accade per ogni analisi di suscettività, dipende fortemente dalla disponibilità di dati storici: più corposo è il dataset più affidabile è il risultato nell'assegnazione del corretto livello di suscettività.

Il confronto tra la mappa proposta e le carte esistenti, legate al tema degli incendi boschivi, realizzate per la regione Lombardia e per il Canton Ticino, mostra una sostanziale concordanza dei risultati. Infatti, a zone ad alta suscettività corrispondono generalmente aree a rischio elevato. Il valore aggiunto in questo caso, come più sopra accennato, è l'omogeneità della mappa in termini di dati di origine, metodologia seguita e rappresentazione cartografica. Da questo fatto discende la produzione di un altrettanto omogeneo strumento di valutazione a supporto della pianificazione e gestione dell'emergenza tra i due Stati.

L'analisi del territorio e lo studio della sua suscettività può essere ampliata ed approfondita, valutando l'influenza dei fattori di tipo dinamico (e cioè derivanti dalla situazione meteorologica, dello stato dei suoli e della vegetazione) sull'occorrenza degli eventi. In letteratura sono presenti diversi studi che considerano questi temi. Spesso infatti si decide di includere nelle analisi fattori come pioggia, temperatura, umidità, azione del vento (valutato in termini di direzione ed intensità) ed indici in grado di definire l'umidità del combustibile. Questi parametri mostrano variazioni nel breve termine, per cui vengono generalmente integrati nei modelli statistici di predizione di tempo reale ottenendo una mappa di suscettività in continuo aggiornamento. Una volta definiti i fattori dinamici di rilievo, è possibile raffinare il modello statistico includendo nell'analisi le variabili ottenendo, appunto, una mappa di suscettività dinamica su diversa base temporale.

È altresì possibile seguire un percorso differente, che prevede di affiancare al modello originale un secondo modello interamente dedicato alla parte dinamica e disporre di due mappe con una rappresentazione più efficace della predisposizione al fuoco del territorio.

Un ulteriore aspetto da approfondire nell'ambito degli incendi boschivi riguarda l'impatto che il cambiamento climatico ha su di essi.

Uno studio eseguito per la regione mediterranea (De Rigo, Libertà, Houston Durrant, Artés Vivancos, & San-Miguel-Ayanz, 2017), analizza l'effetto delle interazioni tra dinamica generale del clima sugli incendi. Si dimostra che il cambiamento climatico incide sul tipo di vegetazione: in particolare si evince che aree caratterizzate da combustibile vegetale ad alto

contenuto di umidità, come nel caso della regione alpina, sono destinate a ridursi. Di conseguenza, la maggiore aridità del suolo e della vegetazione presente facilita la fase di innesco e la potenziale propagazione del fuoco.

L'impatto che il cambiamento climatico ha sugli incendi boschivi è un argomento di particolare interesse per l'area qui esaminata: ricerche in questo campo hanno permesso di determinare che le regioni più settentrionali dell'Europa mediterranea, tra le quali l'Italia del Nord, sono esposte ad un maggiore rischio legato allo scarso adattamento mostrato dagli ecosistemi all'aumentare della siccità (CNR, 2017).

Bibliografia e Sitografia

- Amraoui, M., Pereira, M., DaCamara, C., & Calado, T. (2015). Atmospheric conditions associated with extreme fire activity in the Western Mediterranean region. *Science of the total environment* 524, 32-39.
- Antonietti, A. (1974). Gli incendi di boschi nel Cantone Ticino.
- Arienti, M., Cumming, S., Krawchuk, M., & Boutin, S. (2009). Road network density correlated with increased lightning fire incidence in the Canadian western boreal forest. *International Journal of Wildland Fire*, 970-982.
- Badia, A., Pallares-Barbera, M., Valldeperas, N., & Gisbert, M. (2019). Wildfires in the wildland-urban interface in Catalonia: Vulnerability analysis based on land use and land cover change. *Science of the total environment* 673, 184-196.
- Bartolomei, A., Brugioni, M., Canuti, P., Casagli, N., Catani, F., Ermini, L., . . . Tofani, V. (2006). Analisi della suscettibilità da frana a scala di bacino (Bacino del Fiume Arno, Toscana-Umbria, Italia). *Giornale di geologia applicata*, 189-195.
- Blasi, C., & Biondi, E. (2017). *La flora in Italia. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare*. Roma: Sapienza Università Editrice.
- Blasi, C., Bovio, G., Corona, P., Marchetti, M., & Maturani, A. (2004). *Incendi e complessità ecosistemica. Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*. Roma: Palombi Editore.
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists - Modelling with GIS*. Pergamon.
- Bovio, G. (2010). *Indagine sulle caratteristiche degli incendi boschivi e sulle dinamiche di risposta degli ecosistemi forestali - Relazione finale*.
- Ceschi, I. (1975/76). Gli incendi boschivi in Canton Ticino.
- Chang, K.-t., & Tsai, B.-w. (1991). The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping. *Cartography and geographic information system* 18, 69-77.
- CNR. (2017, 07 11). *Più incendi con i cambiamenti climatici*. Tratto da <https://www.cnr.it/>: <https://www.cnr.it/en/press-note/n-7583/piu-incendi-con-i-cambiamenti-climatici>

- Conedera, M. (1996). *Incendi boschivi al Sud delle Alpi: passato, presente e possibili sviluppi futuri*. Zurigo: vdf Hochschulverlag.
- Conedera, M., & Pezzatti, G. B. (2005, Gennaio). Tratto da https://www.researchgate.net/publication/313185773_Gli_incendi_di_bosco_Cosa_ci_dice_la_statistica
- Conedera, M., Corti, G., Piccini, P., Ryser, D., Guerini, F., & Ceschi, I. (2004). La gestione degli incendi boschivi in Canton Ticino: tentativo di una sintesi storica. *Schweiz. Z. Forstwes*, 263-277.
- Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco. (s.d.). *Attività istituzionale*. Tratto da <http://www.vigilfuoco.it/asp/asp/Page.aspx?IdPage=282>
- Corti, G. (1993). L'incendio del 4-7 dicembre 1973. *Forestaviva*, 16-18.
- Dantonio, C., & Vitousek, P. (1992). Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 63-87.
- De Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T., Artés Vivancos, T., & San-Miguel-Ayanz, J. (2017). *Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty - JRC technical reports*. Publications office of the European Union.
- Dipartimento del territorio - Sezione forestale. (2005). *Direttiva cantonale sugli incendi di bosco*.
- Dipartimento della Protezione Civile. (s.d.). Tratto da Sito del Dipartimento della Protezione Civile - Presidenza del Consiglio dei Ministri: <http://www.protezionecivile.gov.it/attivita-rischi/rischio-incendi>
- Dipartimento della Protezione Civile. (s.d.). *Vigili del fuoco*. Tratto da <http://www.protezionecivile.gov.it/servizio-nazionale/strutture-operative/vigili-fuoco>
- Direzione Regionale Foreste ed Economia Montana - Servizio Antincendio Boschivi. (2009). *Tipologie di incendio*. Regione del Veneto.
- Diritto penale - Codice penale svizzero del 21 dicembre 1937*. (s.d.). Tratto da Il Consiglio federale - il portale del Governo svizzero: <https://www.admin.ch/gov/it/pagina-iniziale.html>
- ERSAF e Regione Lombardia. (2018). *Rapporto sullo stato delle foreste in Lombardia*.
- FCTCP Pompieri Ticino*. (s.d.). Tratto da <https://www.pompieriticino.ch/it/caserm>

- Forman, R., Sperling, D., Bissonette, J., Clevenger, A., Cutshall, C., Dale, V., . . . Winter, T. (2003). Road ecology: science and solutions. *Island Press: Washington, DC*.
- Ghiringhelli, A., Guerini, F., Ortelli, N., Sacchi, L., & Bertogliati, M. (2016). *Concetto cantonale incendi di bosco 2020*. WSL.
- ISPRA. (s.d.). *Rischio Naturale*.
- Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL . (s.d.). Tratto da Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio WSL : <https://www.wsl.ch/it/foresta.html>
- Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura. (2003). *Guida alla classificazione della vegetazione forestale*.
- Jaiswal, R. K., Mukherjee, S., Raju, K., & Saxena, R. (2002). Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1-10.
- Janbaz Ghobadi, G., Gholizadeh, B., & Majidi Dashliburun, O. (2012, Aprile 12). Forest fire riskzone mapping from geographic information system in Northern Forests of Iran(Case study, Golestan province). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, p. 818-824.
- Letey, J. (2001). Causes and consequences of fire-induced soil water repellency. *Hydrological Processes*, 2867-2875.
- Leuenberger, M., Parente, J., Tonini, M., Gonzalez Pereira, M., & Kanevski, M. (2018). Wildfire susceptibility mapping: Deterministic vs. stochastic approaches. *Environmental Modelling & Software 101*, 194-203.
- Li, S., Zhang, Z., Xie, M., & Wang, Y. (2010). Investigating spatial non-stationary and scale-dependent relationship between urban surface temperature and environmental factors using geographically weighted regression. *Environmental modelling and software 25*, 1789-1800.
- Lin, J., & Rinaldi, S. (2009). A derivation of the statistical characteristics of forest fires. *Ecological Modelling*, 898–903.

- Magnani, T., Del Cas, L., Fede, S., Pellegrino, C., Peretti, G., Songini, F., & Tavelli, M. (2005/2006). *Rischi naturali e tecnologici - Rapporto dello Stato sull'ambiente in provincia di Sondrio*.
- Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare. (s.d.). *Manuale tecnico per la pianificazione antincendi boschivi nelle aree protette*.
- Montiel Molina, C., Karlsson Martìn, O., & Galiana Martìn, L. (2019). Regional fire scenarios in Spain: Linking landscape dynamics and fire regime for wildfire risk management. *Journal of environmental management* 233, 427-439.
- Moretti, M., & Conedera, M. (2005). Ecologia degli incendi nella Svizzera sudalpina: effetti su suolo, vegetazione e fauna. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 338-344.
- Narayanaraj, G., & Wimberly, M. C. (2011). Influences of forest roads on the spatial pattern of wildfire boundaries. *International journal of wildland fire*, 792-803.
- Neteler, M., Rocchini, D., Castellani, C., & Roiz, D. (2011). Terra and Aqua satellites track tiger mosquitos invasion: modelling the potential distribution of *Aedes albopictus* in north-eastern Italy. *International journal of health geographics* 10.
- Oulad Sayad, Y., Mousannif, H., & Al Moatassime, H. (2019). Predictive modeling of wildfires: a new dataset and machine learning approach. *Fire safety journal* 104, 130-146.
- Parente, J., & Pereira, M. (2016). Structural fire risk: the case of Portugal. *Science of the total environment* 573, 883-893.
- Pereira, M., Calado, T., DaCamara, C., & Calheiros, T. (2013). Effects of regional climate change on rural fires in Portugal. *Clim Res* 57, 187-200.
- Piacentini, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., & Strada, C. (2012). Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy). *Elsevier*, 196-206.
- Pourtaghi, Z., Pourghasemi, H., Aretano, R., & Semeraro, T. (2016). Investigation of general indicators influencing on forest fire and its susceptibility modeling using different data mining techniques. *Elsevier*, 72-84.
- Regione Lombardia. (2017). *Programma Regionale Integrato di Mitigazione dei rischi (PRIM)*.

- Regione Lombardia. (2020). *Piano Regionale delle attività di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi 2020-2022*.
- Regione Toscana. (2009). *Incendi boschivi - Prevenzione, lotta e controllo con i nuovi strumenti tecnologici*.
- Ricotta, C., Bajocco, S., Guglietta, D., & Conedera, M. (2018). Assessing the influence of roads on fire ignition: does land cover matter? *MDPI*.
- Rizzolo, R., Salis, M., Bacciu, V., Lingua, E., Rech, F., Brognaro, A., & Bacchini, M. (2020). La mappatura del rischio di incendi boschivi basata sulla previsione del comportamento degli incendi. Applicazione nella regione del Veneto. *Italian journal of forest and mountain environments* 75, 83-96.
- Romero-Calcerrada, R., Novillo, C., Millington, J., & Gómez Jiménez, I. (2008). GIS analysis of spatial patterns of human-caused wildfire ignition risk in the SW of Madrid (Central Spain). *Landscape ecology* 23, 341-354.
- Syphard, A., Radeloff, V., Keuler, N., Taylor, R., Hawbaker, T., Stewart, S., & Clayton, M. (2008). Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International journal of wildland fire*.
- Syphard, A., Redeloff, V., Keeley, J., Hawbaker, T., Clayton, M., Stewart, S., & Hammer, R. (2007). Human influence on California fire regimes. *Ecological Applications*.
- Ufficio federale di topografia swisstopo. (s.d.). *I confini artificiali e naturali*. Tratto da Ufficio federale di topografia swisstopo: <https://www.swisstopo.admin.ch/it>
- Verde, J., & Zêzere, J. (2010). Assessment and validation of wildfire susceptibility and hazard in Portugal. *Natural hazards and Earth system sciences* 10, 485-497.
- Viegas, D. (2009). Recent forest fire related accidents in Europe. *JRC Scientific and technical reports*.