

POLITECNICO DI TORINO

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

Gestione dei Rischi Naturali

Tesi di Laurea Magistrale

Valutazione su base climatica di soglie di allertamento per gli incendi boschivi in Piemonte.



**Politecnico
di Torino**

Relatore

Prof. Claps Pierluigi

.....

Correlatore

Prof. Ascoli Davide

.....

Candidato

Bogatto Daniele

.....

Luglio 2026

Sommario

0.	Abstract.....	3
1	Introduzione.....	4
1.1	Descrizione del fenomeno incendi boschivi.....	4
1.2	La situazione dell'arco Alpino	5
1.3	La previsione del pericolo meteorologico.....	6
1.4	Descrizione del caso studio: il Piemonte	8
1.4.1	Caratteristiche fisiche: geografia, clima, foreste.....	8
1.4.2	Statistiche incendi in Piemonte	9
1.4.3	Sistema di previsione attuale.....	13
1.5	Descrizione del problema di ricerca.....	16
2	Materiali e Metodi	18
2.1	Disegno sperimentale.....	18
2.1.1	Descrizione del metodo Alves	19
2.1.2	Ricerca di correlazione tra indici climatici ed area bruciata	23
2.1.3	Applicazione delle soglie e metodi di confronto.....	23
2.1.4	ROC Analysis	24
2.1.5	Distribuzioni per area bruciata.....	25
3	Risultati.....	27
3.1	Definizione delle soglie.....	28
3.2	Applicazione delle soglie.....	32
3.3	Analisi ROC.....	40
3.4	Confronto delle distribuzioni dell'area bruciata.....	49
4	Discussione dei risultati ottenuti.....	54
5	Conclusioni	56
6	Sitografia.....	57
7	Bibliografia.....	57
	Allegato A: risultati della calibrazione sull'indice FFMC.	59
0.1	Ricerca di Correlazione tra indici climatici ed area bruciata	59
0.2	Risultati della calibrazione di soglie di FFMC.....	61

0. ABSTRACT

Il Piemonte è una delle regioni del nord Italia maggiormente esposta al pericolo incendi boschivi. Se negli ultimi decenni il progresso delle strategie di prevenzione e di lotta attiva contro gli incendi hanno contribuito a far diminuire la superficie media, rimane il problema dei grandi incendi in condizioni meteo estreme con importanti impatti sulla società e l'ambiente. Le previsioni indicano che tale tendenza verrà mantenuta nei prossimi anni: sia a causa dell'aumento della biomassa vegetale disponibile come combustibile, conseguenza della spontanea ricolonizzazione da parte delle foreste dei territori antropizzati in passato e ormai in fase di spopolamento; sia per effetto dei cambiamenti climatici che sempre di più causeranno estremi meteorologici caratterizzati da temperature elevate, forti venti e periodi di siccità. Da ormai due decenni la regione Piemonte è dotata di un proprio sistema di previsione del pericolo meteorologico degli incendi boschivi che impiega il Canadian Fire Weather Index, indice oggi diffuso in tutto il mondo e adottato dai sistemi di previsione degli altri paesi dell'arco alpino. Tale indice viene calcolato giornalmente a partire dai parametri meteorologici e viene successivamente comparato con alcuni valori soglia per stabilire il livello di pericolo. Non c'è però uniformità tra i paesi europei o le altre regioni italiane sul metodo di calibrazione di tali soglie, che dipendono molto dalle condizioni ambientali dell'area di applicazione. L'obiettivo del presente studio di tesi consiste nell'introdurre un nuovo metodo di selezione delle soglie che sia differenziato per le macroaree di applicazione e che sia basato sui dati storici degli incendi, impiegando come dati l'indice FWI e i suoi sottoindici, il numero di incendi registrato e l'estensione dell'area bruciata per ogni giorno nel periodo di riferimento (2010-2024). Il test di nuove soglie potrà fornire un'analisi pilota utile a rivedere il sistema di allertamento da utilizzare in futuro nella Regione Piemonte.

TITLE: Climate-based assessment of alert thresholds for forest fires in Piedmont.

Piedmont is one of the regions in northern Italy most exposed to the danger of forest fires. While in recent decades, advances in fire prevention and active firefighting strategies have contributed to a decrease in average surface area, the problem of large fires in extreme weather conditions with significant impacts on society and the environment remains. Forecasts indicate that this trend will be maintained in the coming years: both due to the increase in plant biomass available as fuel, a consequence of the spontaneous recolonization by forests of previously populated and depopulated areas; and due to climate change, which will increasingly cause weather extremes characterized by high temperatures, strong winds, and periods of drought. For two decades now, the Piedmont region has had its own forest fire weather forecasting system, which uses the Canadian Fire Weather Index, an index now widespread throughout the world and adopted by the forecasting systems of other Alpine countries. This index is calculated daily from meteorological parameters and is subsequently compared with some threshold values to establish the level of danger. However, there is no uniformity among European countries or other Italian regions on the calibration method of these thresholds, which depend greatly on the environmental conditions of the application area. The aim of this thesis study is to introduce a new threshold selection method that is differentiated by the macro-areas of application and that is based on historical fire data, using as data the FWI index and its sub-indices, the number of recorded fires and the extent of the burned area for each day in the reference period (2010-2024). The testing of new thresholds may provide a pilot analysis useful in revising the warning system to be used in

1.1 DESCRIZIONE DEL FENOMENO INCENDI BOSCHIVI

Un incendio boschivo si verifica se coesistono i tre elementi del cosiddetto “triangolo del fuoco”, senza ciascuno dei quali non può esserci incendio: questi sono rispettivamente: (i) il combustibile, definito dall’insieme della biomassa vegetale viva o morta presente sul terreno; (ii) il comburente, ossia l’ossigeno atmosferico; (iii) una fonte di innesco che causi un aumento della temperatura del combustibile fino al punto di accensione. È necessario conoscere la disponibilità di questi elementi sul territorio per poter pianificare una corretta prevenzione degli incendi prima che si verifichino, e per aumentare le possibilità di successo nella fase di spegnimento una volta che il fuoco si sta propagando. Tra i numerosi elementi connessi al rischio di un incendio boschivo in un determinato territorio, si possono identificare due principali categorie: fattori predisponenti e fattori determinanti.

I fattori predisponenti sono proprietà intrinseche del territorio.

- la vegetazione: le specie vegetali costituiscono i comburenti per l’innesco e la propagazione del fuoco. Un incendio manifesta comportamenti differenti in base al tipo di vegetazione ed alle sue dimensioni e quantità. Anche il contenuto di umidità del combustibile può contribuire a ritardare enormemente la propagazione del fuoco.
- Il clima: influisce sul contenuto d’acqua presente nel combustibile mediante la temperatura, l’umidità atmosferica e le precipitazioni. Il vento favorisce la reazione di combustione, fornendo nuovo comburente e diffondendo i fumi caldi che propagano il fronte di fiamma favorendo alcune direzioni.
- Le caratteristiche geomorfologiche: influenzano a sua volta vegetazione e clima locale. La pendenza di un versante contribuisce di molto alla direzione di propagazione del fuoco, che per sua natura tende a svilupparsi verso l’alto. L’esposizione del pendio al sole aumenta l’effetto della radiazione solare, riducendo l’umidità ed innalzando la temperatura e favorendo l’innesco di incendi. Un terreno esposto è anche maggiormente interessato dal vento.

I fattori determinanti sono gli elementi che innescano la reazione di combustione. Possono essere distinti tra cause antropiche e cause naturali, come fulmini, eruzioni vulcaniche, autocombustione generata da condizioni climatiche particolarmente favorevoli. La grande maggioranza degli inneschi di incendi boschivi viene generata da attività umane. Gli incendi colposi si verificano per errore o ignoranza, mentre gli incendi dolosi sono appiccati con intenzione per procurare danno.

Una volta che l’innesco ha avviato un incendio, il fuoco si propaga secondo una delle quattro seguenti modalità, con cui si può classificare il tipo di incendio:

- Un incendio radente interessa la vegetazione sulla superficie del terreno, impiegando come combustibile i residui vegetali, le specie erbacee e arbustive. Le fiamme basse non riescono a coinvolgere le chiome delle specie arboree che comunque possono rimanere danneggiate a livello del tronco.
- Un incendio di chioma interessa gli strati alti del bosco, propagandosi dal terreno alla chioma o direttamente da chioma a chioma mediante l’effetto ponte. Si tratta di un tipo di incendio difficilmente contrastabile, che sprigiona grandi quantità di calore con un effetto distruttivo sulle piante.
- Un incendio sotterraneo interessa gli strati organici depositati sopra gli orizzonti minerali del terreno, propagandosi senza fiamma da radice a radice. Anche se non molto distruttivo, questo tipo di incendio è di difficile rilevazione e contenimento, e va continuamente monitorato per

evitare che origini nuovi focolai. La combustione di alcuni elementi strutturali del terreno comporta inoltre il pericolo di cedimenti localizzati.

- Quando incendio radente e incendio di chioma coesistono in un unico fronte di fiamma, si verifica un incendio totale o di barriera, che interessa tutti gli strati verticali del bosco.

1.2 LA SITUAZIONE DELL'ARCO ALPINO

La maggior parte delle foreste europee sono considerate semi-naturali a causa dell'influenza di secoli di gestione antropica. Il bosco è stato per generazioni una fonte di risorse come legname, frutti ed altri prodotti, oltre che una caratteristica del paesaggio che è stata modificata per adeguarla alle necessità agricole e di movimento della popolazione. Le foreste non antropizzate sono localizzate soprattutto all'interno delle aree più remote e difficilmente accessibili dell'Europa, in larga parte nelle regioni orientali e settentrionali. Nei millenni passati, la crescita in ambiente alpino degli insediamenti antropici e della rete di infrastrutture ha comportato la quasi scomparsa della maggior parte dei boschi ripariali situati nei territori di fondovalle. I boschi oggi sono localizzati soprattutto nelle aree montuose, caratterizzate da versanti: il 40% della superficie delle Alpi è ricoperto da foreste, e tale percentuale è in continuo aumento (Barbarino, et al., 2012).

Le foreste costituiscono un elemento fondamentale del paesaggio, a cui contribuiscono fornendo svariati servizi ecosistemici: stabilizzazione dei suoli e conseguente protezione dei pendii dall'erosione; regolazione del microclima locale, intervenendo su insolazione, umidità e circolazione dell'aria; rallentamento dell'azione di ruscellamento superficiale e cattura di acque meteoriche che alimentano la falda sotterranea. Le foreste sono inoltre grandi riserve di biodiversità, e ospitano una diversità genetica di migliaia di specie animali e vegetali che permette all'ambiente foresta di sopportare e adattarsi a grandi eventi come i cambiamenti climatici o i disastri naturali.

Al giorno d'oggi, le regioni alpine non sono interessate dal fenomeno degli incendi boschivi quanto le vicine regioni dell'area mediterranea, che sono più soggette allo sviluppo frequente di incendi a causa del clima secco e della presenza maggiore di popolazione, causa principale degli inneschi. Tuttavia, l'ambiente montano ostacola la lotta attiva, e gli incendi non domati possono minacciare rapidamente infrastrutture ed attività umane, provocando gravi danni immediati ed aumentando la probabilità di eventi successivi di diversa natura quali erosione superficiale, flussi di detrito, valanghe. Tutto questo senza contare i danni alla biodiversità, già severamente minacciata in alcune aree.

Gli effetti incendi sulle Alpi sono in progressivo aumento per intensità, con una frequenza maggiore di incendi particolarmente estesi. Tra le cause di questo aumento vi sono:

- L'inselvaticimento delle aree abbandonate e non più gestite dalla presenza antropica. Se pur la maggior parte degli incendi viene innescata da cause di origine antropica, lo spopolamento dei territori precedentemente abitati dalle comunità alpine comporta un aumento della biomassa combustibile sul territorio, che fornisce al fuoco combustibile per sprigionare molta energia (Valese, et al., 2014).
- Il cambiamento climatico. Secondo le previsioni climatiche, le Alpi sono considerate un'area particolarmente sensibile agli effetti del surriscaldamento globale (Cane, et al., 2013), con aumento della probabilità di eventi meteorologici estremi, tra i quali ondate di calore e prolungati periodi di siccità. In uno studio condotto su 25 stazioni meteorologiche situate in tutte le Alpi, è stato dimostrato che il rischio di incendi è aumentato in media dal 1951, ma con notevoli differenze regionali (Wastl, et al., 2012).

1.3 LA PREVISIONE DEL PERICOLO METEOROLOGICO

Secondo la definizione impiegata dal Dipartimento per la Protezione Civile, si intende con il termine rischio “la possibilità che un fenomeno naturale o indotto dalle attività dell’uomo possa causare effetti dannosi sulla popolazione, gli insediamenti abitativi e produttivi e le infrastrutture, all’interno di una particolare area, in un determinato periodo di tempo.” Similmente a come vengono trattate molte altre tipologie di rischi naturali, il rischio di incendi boschivi viene considerato il prodotto tra la pericolosità e la vulnerabilità del territorio.

La pericolosità statica è intesa generalmente come la probabilità che un fenomeno si manifesti nel territorio con una certa intensità lungo un intervallo di tempo; nel caso degli incendi boschivi, con questo termine viene considerata la presenza di fattori che aumentano o diminuiscono la probabilità che si verifichino le condizioni favorevoli all’insacco degli incendi.

Vulnerabilità è una proprietà intrinseca di un bene o di un territorio che rappresenta la sua predisposizione ad essere danneggiato se esposto ad un evento con un certo livello di intensità. Nel caso degli incendi boschivi, i danni che possono interessare un territorio sono di differente natura: se la componente principale è soprattutto forestale ed ecologica (si pensi alle perdite di biodiversità e del patrimonio vegetale, oltre agli impatti ambientali della liberazione di calore, fumi tossici e gas serra), non sono da sottovalutare anche le componenti di natura economica e sociale, quando i territori danneggiati sono abitati e valorizzati da comunità antropiche.

Il pericolo meteorologico di incendi boschivo (fire danger) si distingue dalla pericolosità statica in quanto questo esprime la probabilità che avvenga propagazione del fuoco in seguito ad un insacco, indipendentemente dalla disponibilità di combustibili presenti. Il pericolo meteorologico è determinato dalle condizioni meteorologiche, e pertanto variabili nel tempo, che rendono il combustibile predisposto alla combustione. Essendo una conseguenza delle condizioni meteorologiche, il pericolo meteorologico può essere previsto su una porzione di territorio, ma bisogna identificare le condizioni che influenzano tale pericolo e riassumerle in valori numerici. Al termine del ventesimo secolo, diversi paesi anche limitrofi avevano elaborato indici locali con diversa efficacia. Proprio visto il numero di enti di differenti nazionalità che operano sull’arco alpino, l’Unione Europea ha finanziato in passato il progetto ALP FFIRS - ALpine Forest Fire waRning System, nell’ambito del Programma INTERREG Spazio Alpino 2007-2013. L’obiettivo del progetto era la riduzione del rischio di incendi boschivi nel territorio alpino tramite la cooperazione dei differenti stati che ne fanno parte. Al progetto hanno aderito 15 enti provenienti da Italia, Francia, Svizzera, Germania, Austria e Slovenia, condividendo ciascuno le proprie strategie e tecniche nella gestione e nella lotta agli incendi boschivi. La collaborazione è stata ritenuta la via da seguire per fronteggiare la limitazione delle risorse economiche e i cambiamenti climatici, che comportano l’incremento delle condizioni predisponenti allo sviluppo e alla propagazione. Al termine del progetto, alcuni risultati raggiunti sono stati:

- La definizione di una scala comune per la valutazione del pericolo incendi boschivi.
- La realizzazione di un sistema di allertamento condiviso, per avvisare in anticipo gli stati confinanti sull’avvento di condizioni favorevoli allo sviluppo di incendi, e permettere loro di attuare per tempo le strategie di prevenzione.
- La creazione di una banca dati condivisa, per analizzare le caratteristiche degli incendi nel territorio alpino e identificare gli indici di pericolo più rappresentativi.
- Una pianificazione comune degli interventi nelle aree di confine, con la messa in opera di esercitazioni congiunte tra operatori di livelli regionali e transnazionali.

Il progetto ALP FFIRS ha consentito di radunare abbastanza dati per poter valutare differenti metodi di calcolo del pericolo potenziale di incendi boschivi in ambiente alpino (Barbarino, et al., 2012). Confrontando i risultati ottenuti, l’indice con maggior capacità di discriminare le situazioni critiche per lo sviluppo di incendi boschivi è risultato essere il Canadian Fire Weather Index,

ideato nel secolo scorso per quantificare il pericolo nelle foreste canadesi (Van Wagner, 1987), e adottato oggi da diversi paesi in tutto il mondo.

Il Canadian Forest Fire Danger Rating Sistem (CFFDRS) progettato da Van Wagner è costituito dalla combinazione di sei indici meteorologici giornalieri, ciascuno dei quali misura un differente aspetto del pericolo incendi boschivi. Tali indici vengono calcolati quotidianamente a partire dalle variabili meteorologiche di temperatura, velocità del vento, umidità relativa e precipitazioni delle 24 ore precedenti, come riassunto in Figura 1.1. I primi tre indici esprimono il contenuto idrico dei combustibili vegetali a terra, ciascuno dotato di un suo tempo di essiccazione in base alle dimensioni, alla profondità e al compattamento. Da questi tre indici vengono poi calcolati a cascata i successivi, che descrivono il comportamento del fuoco in seguito all'innesco.

- Fine Fuel Moisture Code (FFMC): valuta l'umidità dei combustibili fini negli strati superficiali del terreno, immediatamente disponibili come combustibili, e la facilità con cui si infiammano.
- Duff Moisture Code (DMC): valuta il contenuto idrico degli strati organici a profondità moderata e compattati grossolanamente.
- Drought Code (DC): umidità degli strati organici profondi e compatti, dove il fuoco può resistere ai tentativi di soffocamento per propagarsi sotto forma di incendio sotterraneo.
- Initial Spread Index (ISI): stima della velocità di propagazione del fuoco nei combustibili leggeri, ottenuta combinando FFMC e la velocità del vento.
- Buildup Index (BUI): indica la quantità totale di materiale disponibile per la combustione, ottenuta combinando DMC e DC.
- Fire Weather Index (FWI): unendo le informazioni di ISI e BUI, valuta l'intensità del fronte di fiamma ed è generalmente impiegato come espressione del pericolo potenziale.

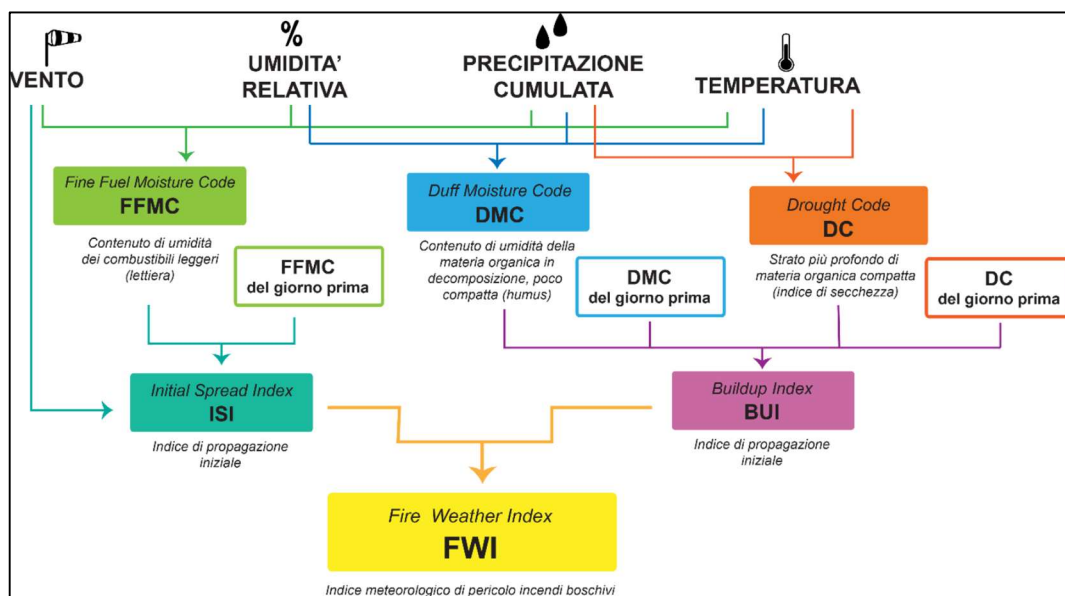


Figura 1.1: schema degli indici del CFFDRS, proposto nel Piano AIB Piemonte (Gottero, et al., 2024).

Negli anni successivi alla sua formulazione, l'indice FWI è stato adottato anche in differenti paesi europei come la Spagna (Pérez-Sánchez, et al., 2017), l'Austria (Müller, et al., 2015) e la Francia (Dupire, et al., 2017). Nonostante l'ideatore del CFFDRS avesse proposto inizialmente un sistema di soglie per indicare il livello del pericolo incendi nel territorio canadese (Van Wagner, 1987), tali soglie necessitano generalmente di essere adattate alle condizioni locali. In aggiunta al metodo

di calibrazione suggerito da Van Wagner, nel tempo sempre più studi hanno ipotizzato nuovi metodi per definire le soglie, impiegando anche sistemi automatici (Shmuel, et al., 2025)

1.4 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO: IL PIEMONTE

1.4.1 CARATTERISTICHE FISICHE: GEOGRAFIA, CLIMA, FORESTE

Il lavoro di tesi pone come caso studio la regione Piemonte, analizzando le sue peculiarità e specificità rispetto alle altre regioni dell'arco alpino. Come riportato nella descrizione della regione secondo l'enciclopedia Treccani (<https://www.treccani.it/enciclopedia/piemonte/>), il territorio piemontese si estende su una superficie di 25.387 km^2 , il 43% della quale è costituito da zone montane, il 30% da zone collinari e solo il 27% dalle zone pianiziali, che comprendono la porzione occidentale della pianura padana che si espande da Cuneo a Torino, passando per Vercelli e fino a Novara. Le zone montane sono costituite dalle Alpi Piemontesi (Marittime, Cozie, Graie, Pennine e Lepontine). I picchi possono sorpassare i 3000 m.s.l.m., ed in alta quota l'ambiente è quasi privo di vegetazione. Le valli piemontesi sono generalmente disposte trasversalmente alla curva tracciata dall'arco alpino, e pertanto presentano una grande varietà nella direzione di immersione dei versanti. A differenza di altre regioni dell'arco alpino, non è presente una zona collinare pedemontana a ridosso delle montagne, bensì sono distinguibili quattro aree collinari principali in Piemonte: il Monferrato, le Langhe e il Roero, le colline Torinesi, l'anfiteatro morenico canavesano. Da una tale alternanza di altitudine ed esposizione deriva una grande varietà di paesaggi, distinguibili in unità geografico-ambientali minori, come riportato in Figura 1.2.

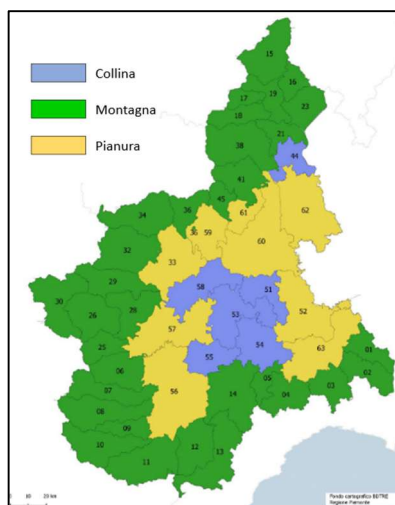


Figura 1.2: classificazione delle aree forestali in Piemonte secondo il piano AIB regionale (Gottero, et al., 2024)

Il clima piemontese è influenzato dalla morfologia della regione: la presenza dei rilievi montuosi alpini protegge il Piemonte dalle correnti di aria fredda provenienti dal nord Europa, mentre gli appennini liguri smorzano l'azione mitigatrice del Mar Mediterraneo. La grande diversità di ambienti si riscontra anche nel clima locale, prevalentemente di tipo continentale in pianura ma che diventa alpino salendo di quota. Anche il regime di precipitazioni varia sensibilmente, a causa anche della differente orientazione delle valli piemontesi; le aree a maggior piovosità sono quelle settentrionali, in particolare la provincia del Verbano-Cusio-Ossola, e in generale le zone di transizione tra pianura e montagna, dove le correnti umide sono ostacolate dai rilievi montuosi. I massimi annuali di precipitazione si verificano in primavera ed autunno, mentre le stagioni

invernali ed estive sono a minor piovosità. La presenza dell'arco alpino è causa del fenomeno meteorologico del vento di foehn, caratterizzato da movimenti di aria calda e secca provenienti dal continente europeo, che hanno perso il loro contenuto d'acqua nel cambio di quota per oltrepassare i rilievi montuosi.

La presenza millenaria dell'uomo nella regione ha modificato e modellato il territorio piemontese, impattando sull'estensione della superficie boscosa e sulla sua composizione. Le attività umane hanno infatti modellato monti e valli per secoli, convertendo aree boschive in terreni agricoli dedicati alla coltivazione o al pascolo e selezionando le specie arboree per poter estrarre risorse dal bosco (legname da costruzione, combustibile, produzione di frutti come castagne e tartufi). Con la fine del ventesimo secolo, lo spopolamento delle aree rurali (montane e collinari) a favore delle città in pianura ha comportato l'abbandono di ampie porzioni di territorio, che si sono rinselvatichite dopo secoli di uso agricolo. In seguito alla ricolonizzazione spontanea del bosco, si è osservato come la superficie forestale sia quasi raddoppiata dal secondo dopoguerra, fino a raggiungere la dimensione di 986.132 *ha* (fonte: Carta Forestale regionale 2025), pari al 38% della intera superficie piemontese. Secondo la Relazione Ambiente del 2021, pubblicata sul sito regionale (<https://relazione.ambiente.piemonte.it/2021/it/territorio/fattori/foreste>), tale estensione è ripartita in modo non omogeneo nel territorio: mentre la pianura ospita solo il 9% dei boschi, la maggior parte delle foreste piemontesi è situata in montagna (72%), dove viene misurato un indice di boscosità del 57%.

(<https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/foreste/foreste-piemonte-economia-ambiente/superfici-categorie-forestali>)

1.4.2 STATISTICHE INCENDI IN PIEMONTE

Come riportato nel Piano Regionale per la Programmazione delle Attività di Previsione, Prevenzione e Lotta Attiva contro gli incendi boschivi per il quinquennio 2021-2025 (Gottero, et al., 2024), il territorio piemontese è suddiviso in Aree di Base, unità territoriali soggette alla divisione amministrativa ed operativa prevista dal piano antincendi. La previsione degli incendi invece impiega una scala differente: la superficie regionale viene divisa in sei macroaree, unendo i territori di province limitrofe e dividendo le più grandi per ottenere zone omogenee a livello climatico ed amministrativo. Tali macroaree sono riportate in Figura 1.3.

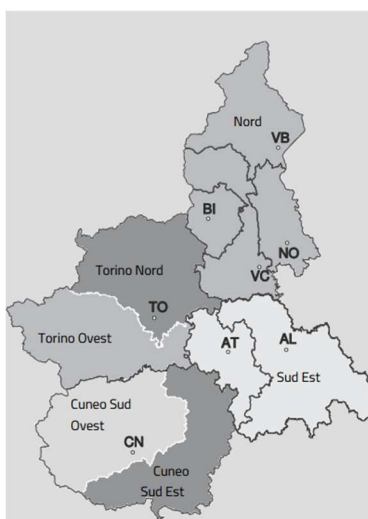


Figura 1.3: suddivisione della regione Piemonte nelle 6 zone climatiche, così come riportato dal bollettino ARPA Piemonte

I dati sugli incendi boschivi nella regione Piemonte sono stati forniti da IPLA (Istituto per le Piante da Legno e per l’Ambiente), e coprono un periodo di 16 anni, dal 2009 al 2024. Per ogni incendio registrato sono stati assegnati un codice identificativo, la data di innesco, il comune e la provincia, la posizione espressa in coordinate wgs84, e la superficie bruciata (chiamata anche Burned Area, BA), misurata in ettari e suddivisa nella sua componente boschiva e non boschiva. Dai valori in Tabella 1.1 è stato costruito il grafico in Figura 1.4.

Tabella 1.1: evoluzione nel tempo del fenomeno incendi boschivi in Piemonte

Anno	N° incendi (-)	Superficie totale (ha)	Area incendio medio (ha)
2009	117	334	2.9
2010	71	279	3.9
2011	235	1347	5.7
2012	194	303	1.6
2013	160	733	4.6
2014	120	171	1.4
2015	199	3326	16.7
2016	139	1377	9.9
2017	271	11492	42.4
2018	64	501	7.8
2019	147	4578	31.1
2020	142	759	5.3
2021	153	1052	6.9
2022	380	2628	6.9
2023	195	1029	5.3
2024	75	232	3.1
Media annua	166	1884	11.3

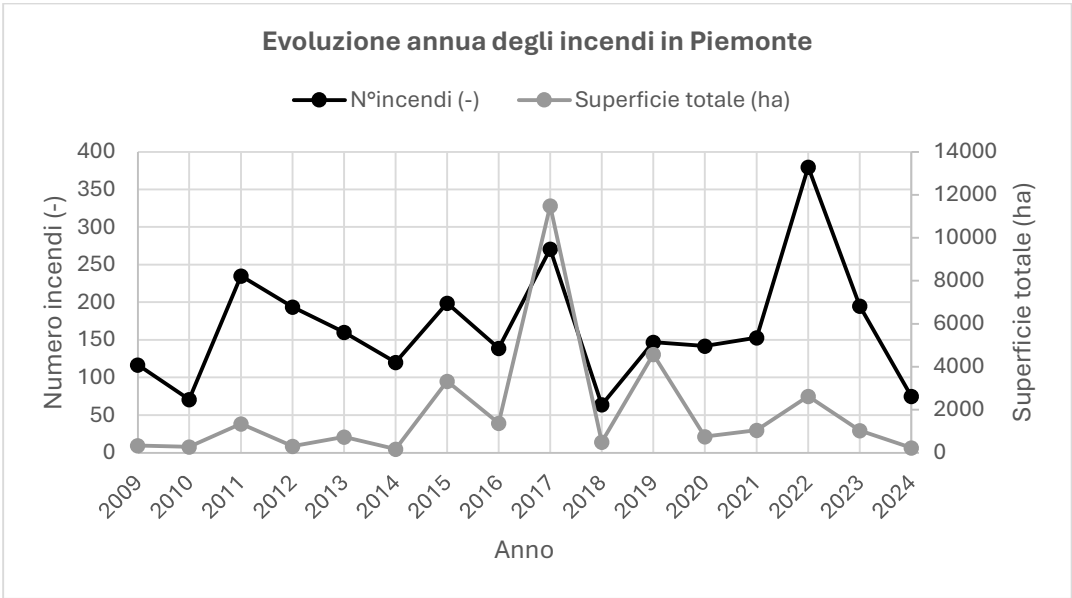


Figura 1.4: evoluzione del numero e dell’estensione degli incendi in Piemonte nel periodo 2009-2024.

Si può notare come la dimensione media degli incendi vari sensibilmente negli anni: mentre annate come il 2011 o il 2022, caratterizzate da condizioni di siccità particolarmente gravose, presentano un gran numero di incendi di modeste dimensioni (mediamente inferiori ai 7 ha di

estensione), la maggior parte della superficie bruciata nel periodo di riferimento si è verificata in alcuni anni caratterizzati da incendi di enorme portata; su tutti, il 2017, con incendi medi di oltre 40 ettari che costituiscono oltre il 38% dell'intera superficie incendiata durante i 16 anni di studio. Questo andamento conferma la tendenza registrata negli ultimi decenni dell'aumento dei mega-incendi in concomitanza con la diminuzione della gestione del combustibile (Valese, et al., 2014). I progressi nelle tecniche di prevenzione e lotta agli incendi hanno contribuito a ridurre la dimensione media degli incendi, causando così un accumulo sul territorio della biomassa vegetale combustibile; in corrispondenza di condizioni climatologiche particolarmente critiche (periodi siccitosi, presenza di venti di foehn) che ostacolano il contenimento dell'incendio, il fuoco si espande senza controllo consumando tutto il combustibile accumulatosi negli anni precedenti.

Spostando la scala di analisi dagli anni ai mesi, dalla Figura 1.5 emerge come la frequenza degli incendi non sia costante tra i differenti mesi, ma bensì la maggior parte degli incendi si concentri in alcuni periodi dell'anno.

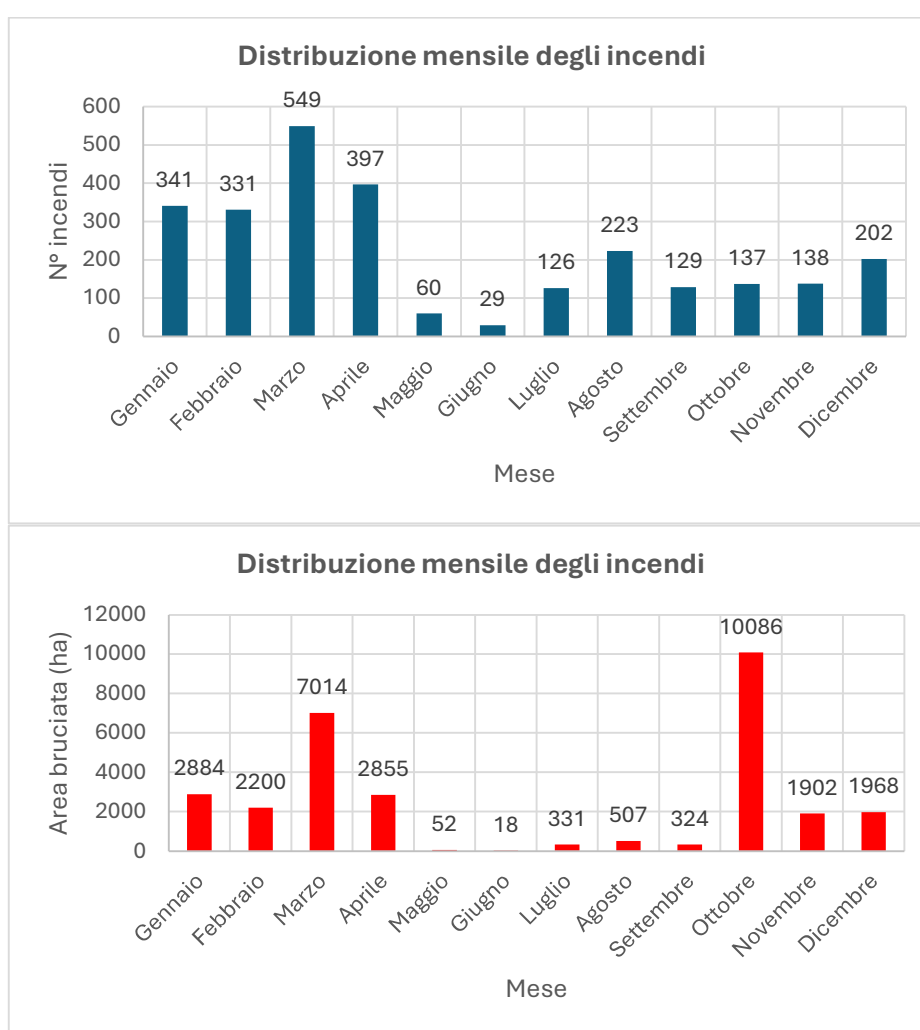


Figura 1.5: distribuzione mensile degli incendi in Piemonte, per numero di eventi e per superficie totale.

Il maggior numero di incendi si manifesta principalmente nei mesi invernali ed inizio primaverili, in contrasto con l'andamento registrato nelle regioni mediterranee, dove la stagione più soggetta ad incendi è quella estiva. Questo comportamento è dovuto alla peculiarità climatica del Piemonte, dove gli inverni sono caratterizzati da condizioni meteorologiche di lunga siccità e da grande

disponibilità di materiale combustibile fornito dalle specie arboree di latifoglie. Le condizioni di pericolo estremo sono inoltre influenzate dalla azione ciclica dei venti di foehn, flussi di aria calda e secca che hanno perso la loro umidità durante il cambio di quota necessario per oltrepassare i rilievi alpini (Cane, et al., 2012). Analizzando la superficie bruciata si registra un massimo nel mese di ottobre, ma questo è dovuto quasi esclusivamente alla crisi regionale dei grandi incendi del 2017; in un solo mese, i 5 grandi incendi che hanno interessato la provincia di Torino hanno bruciato quasi 8700 ettari di bosco, pari all'86% della superficie totale di tutti gli incendi avvenuti in tutti i mesi di ottobre, di cui il 40% unicamente nell'incendio della Val Susa (originato a Bussoleno, 22 ottobre 2017), che con oltre 4000 ettari incendiati in 14 giorni si classifica come il più grande incendio boschivo della storia recente in Piemonte.

Esaminando gli incendi suddivisi non più per la data ma bensì per la posizione geografica, emergono le differenze tra le sei zone climatiche in cui è suddiviso il Piemonte. La Figura 1.6 evidenzia come la frequenza e l'intensità degli incendi boschivi differiscono notevolmente tra le diverse macroaree: gli incendi maggiori si concentrano nelle aree settentrionali, sopra tutte la zona Nord e le zone torinesi, dove la superficie bruciata totale è di un ordine di grandezza superiore a quella registrata nelle macroaree meridionali. Inoltre, la zona del Piemonte SudEst presenta un comportamento peculiare: se infatti la maggior parte degli incendi piemontesi avviene in inverno o primavera, la macroarea SudEst mostra un comportamento tipico delle regioni mediterranee, con i mesi estivi più soggetti al fenomeno di incendi rispetto a quelli invernali, come mostrato nella Figura 1.7.

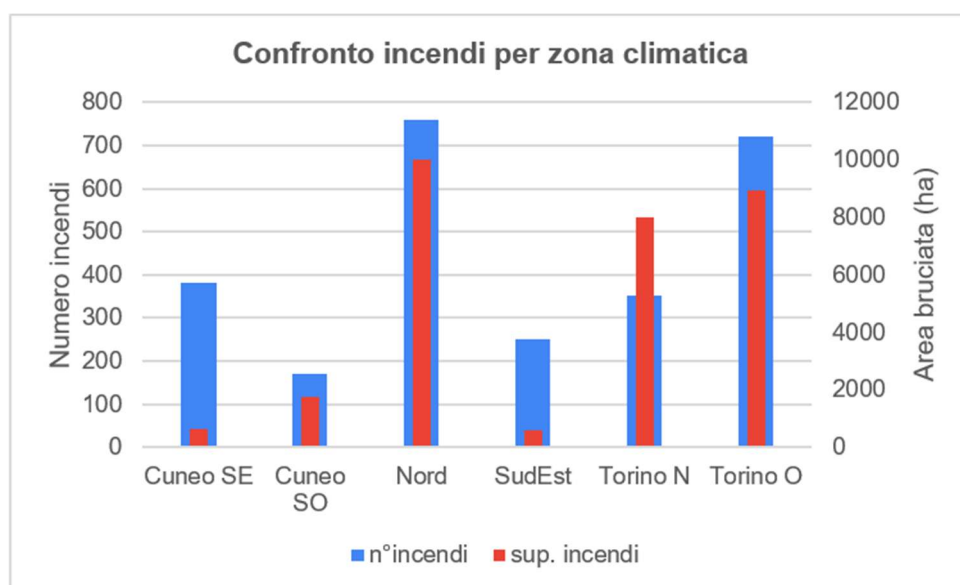


Figura 1.6: confronto tra le zone climatiche per numero e superficie degli incendi boschivi.

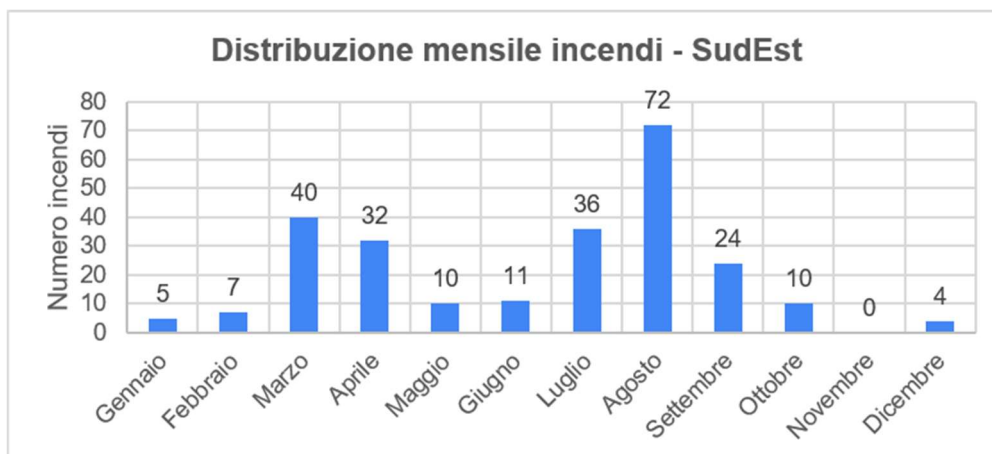


Figura 1.7: distribuzione per mesi del numero di incendi nella macroarea SudEst.

1.4.3 SISTEMA DI PREVISIONE ATTUALE

In Piemonte, la raccolta dei dati climatologici necessari al monitoraggio e alla prevenzione degli incendi boschivi è affidata alla rete meteoidrografica regionale. Come riportato nel piano AIB Piemonte, il territorio è suddiviso in 48 “aree forestali” sulle quali vengono calcolati i valori dell’indice FWI e dei suoi sottoindici, successivamente aggregati sull’intera macroarea di appartenenza. L’input del calcolo è costituito dai seguenti dati, registrati dalle stazioni meteorologiche ogni giorno alle ore 12 locali:

- Temperatura atmosferica a 2 metri dal suolo.
- Umidità relativa a 2 metri dal suolo.
- Velocità del vento a 10 metri dal suolo.
- Precipitazione cumulata nelle ultime 24 ore.

Non tutte le aree forestali sono dotate di stazioni meteorologiche; pertanto, a ciascuna è assegnata una stazione di riferimento rappresentativa delle caratteristiche meteo-climatiche e delle condizioni ambientali coerenti con l’area forestale interessata, così come riportato in Figura 1.8. Tutte le stazioni posizionate a quota superiore a 2000 m.s.l.m. sono state escluse in quanto ritenute poco rappresentative. La rete così definita comprende 38 stazioni con disponibilità dei dati superiore al 95%. Ogni area forestale è così fornita di un dataset di valori osservati su cui si calcola il valore degli indici osservati e previsti per i giorni successivi: ogni sottoindice del FWI deriva infatti dalle condizioni registrate nei giorni precedenti. Nel caso mancassero dei dati necessari al calcolo di FWI, la decisione presa da Arpa è stata di utilizzare la persistenza per tutte le variabili meteorologiche, considerando nullo solo il valore della precipitazione cumulata.

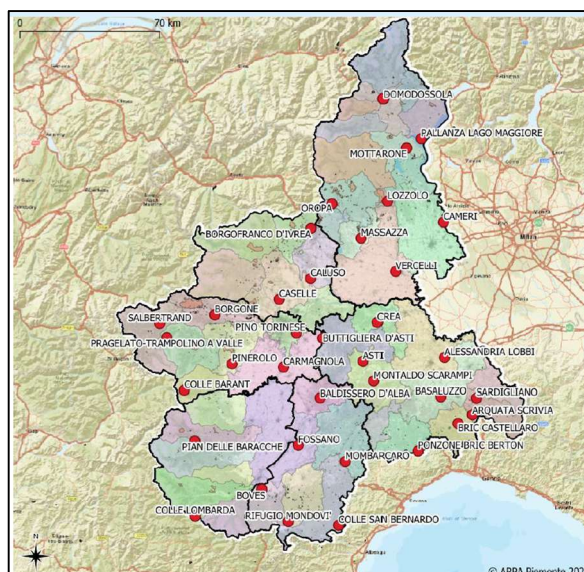


Figura 1.8: aree forestali e stazioni meteorologiche di riferimento per il calcolo di FWI (Piano AIB Piemonte 2021-2025).

Per determinare il pericolo di incendi boschivi, i valori di FWI calcolati giorno per giorno vengono confrontati con dei valori soglia che identificano cinque classi di pericolo, denominate con un nome e un colore identificativo in conformità con i sistemi di allarme implementati in tutte le regioni dell'arco alpino: molto basso (azzurro), basso (verde), moderato (giallo), elevato (arancione), molto elevato (rosso). Ciascuno dei livelli di pericolo è caratterizzato da condizioni predisponenti l'innesco e il comportamento dell'incendio, tramite la scala di classificazione definita in seguito al progetto europeo ALP FFIRS e adottata da tutti i paesi dell'area alpina. I livelli di pericolo adottati sono i seguenti, riportati nella Figura 1.9, e riportati con le seguenti definizioni nel bollettino incendi regionale:

1. Molto Basso: a fronte di un innesco non consegue necessariamente la propagazione di fiamma;
2. Basso: la propagazione avviene lentamente solo a seguito di un innesco importante. L'estinzione è facilmente realizzabile.
3. Moderato: gli eventuali incendi si propagano a velocità moderata. L'estinzione è efficace se attuata tempestivamente.
4. Elevato: a seguito di un innesco, il fronte di fiamma si può diffondere molto rapidamente e la sua estinzione risulta difficile.
5. Molto Elevato: a seguito di un innesco, possono verificarsi incendi che si propagano con violenza e la cui estinzione è oltremodo impegnativa e di difficile riuscita.

LIVELLI DI PERICOLO	POTENZIALE INNESCO	POTENZIALE COMPORTAMENTO DEL FUOCO
1 MOLTO BASSO	L'innescò è difficile, se non in presenza di materiale altamente infiammabile	Pennacchio di fumo bianco. Velocità di diffusione del fuoco molto bassa. Spotting non significativo
2 BASSO	Bassa probabilità di innescò	Pennacchio di fumo bianco e grigio. Velocità di diffusione del fuoco bassa. Spotting di bassa frequenza
3 MODERATO	Una singola fiammella può causare un incendio	Colonna di fumo grigio con base scura. Velocità di diffusione del fuoco moderata. Spotting di media intensità
4 ELEVATO	Una singola fiammella causa sicuramente un incendio	Colonna di fumo rossiccia e nera. Velocità di diffusione del fuoco alta. Spotting elevato.
5 MOLTO ELEVATO	Una singola scintilla può causare un incendio	Colonna di fumo nero. Velocità di diffusione del fuoco molto alta. Spotting intenso.

Figura 1.9: descrizione dei livelli di pericolo incendi boschivi secondo il Piano AIB Piemonte 2021-2025.

Il sistema di valutazione e previsione del pericolo incendi boschivi basato su dati climatologici è attivo in Piemonte dal 2007; il centro funzionale di Arpa Piemonte raccoglie i dati osservati dalla rete regionale, stabilendo in ognuna delle sei macroaree i livelli di pericolo giornaliero e la previsione per i sei giorni successivi. Tali informazioni sono pubblicate sul Bollettino di pericolo incendi giornaliero, consultabile liberamente presso il sito web di Arpa Piemonte. I livelli di pericolo previsti sono rappresentati tramite mappe della regione dove ogni macroarea è evidenziata con il colore della classe di pericolo corrispondente. Tale strumento è orientato non solamente come informazione alla popolazione, ma anche come supporto alle decisioni operative ed amministrative da applicare in grande scala sul territorio. Per ciascun livello di pericolo sono infatti individuate azioni di prevenzione, precauzioni da adottare, manovre e mezzi necessari alle operazioni di estinzione di incendi. Le mappe dei singoli parametri e sottoindici sono consultabili agli operatori del settore dotati di accesso riservato, fornendo le informazioni per ogni area forestale raccolte negli ultimi 30 giorni e le previsioni per i prossimi 10 giorni.

In seguito al progetto ALP-FFIRS, tutti gli enti competenti nelle diverse regioni alpine hanno adottato la medesima scala di pericolo a 5 classi, ma non è stata definita una metodologia comune da impiegare per stabilire il valore delle soglie che differenziano le varie classi, che devono essere calibrate su ogni regione. Coi tentativi di applicazione in Piemonte dell'indice FWI al termine dei primi anni 2000, è stato riscontrato che il comportamento del sistema di soglie proposto per il territorio canadese (Van Wagner, 1987) non era soddisfacentemente adeguato al contesto alpino, soprattutto nella stagione invernale. La presenza dei venti di foehn comporta misure di FWI elevate, di molto superiori alla media mensile, alle quali viene assegnato il massimo livello di allerta; le soglie definite su questi valori risultano molto alte, fallendo nell'individuare gli incendi che avvengono in condizioni non influenzate dal foehn (Cane, et al., 2012).

Le soglie impiegate in Piemonte durante la fase di aggiornamento del piano AIB 2021-2025 (riportate in Figura 1.10) sono state calcolate mediante il seguente procedimento, analogo a quello impiegato nella vicina regione Lombardia: dalla serie storica dei dati di FWI registrati dal 2002 al 2019 sono state ricavate le distribuzioni di FWI per ogni mese, considerando solamente i giorni per i quali si sono registrati incendi di qualsiasi dimensione. La soglia tra pericolo moderato ed elevato è stata posta pari al valore medio di FWI, mentre per la soglia inferiore è stato impiegato il criterio della metà del valor medio. Il novantesimo percentile è stato impiegato per separare la classe di pericolo elevato dal molto elevato. Successivamente, effettuando un'interpolazione di tipo cubic-spline sui valori mensili, sono stati ricavati i valori di ciascuna soglia per ogni giorno

dell'anno (1-366). La soglia che separa il pericolo molto basso da basso è invece stata imposta con un valore di $FWI=0.2$, costante per tutto l'anno.

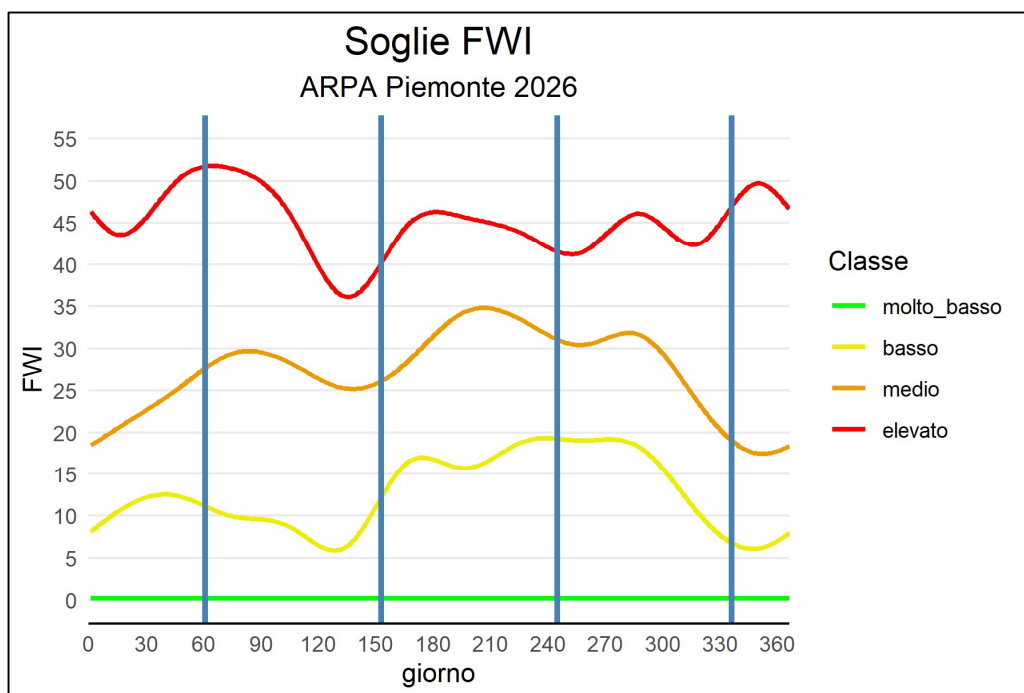


Figura 1.10: andamento delle soglie ARPA, in uso nell'anno 2026 sul territorio piemontese.

Analizzando l'andamento delle soglie, emerge che mediamente nei mesi estivi le soglie presentano valori maggiori. I mesi invernali esibiscono i valori medi più bassi tra tutti i mesi (curva arancione), ma se si analizza il 90° percentile (curva rossa) risulta che proprio in questi mesi le soglie per entrare nella classe di pericolo estremo mostrano i valori più alti con riferimento a tutto l'anno. Questo andamento sembra coincidere con quello degli incendi esaminato precedentemente in Figura 1.5: i mesi di fine inverno ed inizio primavera sono caratterizzati da valori maggiori di FWI e dalle maggiori superfici percorse da incendi.

1.5 DESCRIZIONE DEL PROBLEMA DI RICERCA

Il sistema di soglie impiegato attualmente nella previsione del pericolo incendi boschivi in Piemonte presenta delle peculiarità: tali soglie sono specifiche per ogni giorno dell'anno, mantenendo una continuità graduale senza bruschi cambi di valore da un mese all'altro che potrebbero far cambiare improvvisamente il livello di pericolo senza che si sia verificata una variazione considerevole di FWI. Tuttavia, alcune caratteristiche che potrebbero prestarsi a miglioramenti: le soglie sono uniche per tutto il territorio piemontese e, quando vengono applicate sulle singole macroaree, non rispecchiano le caratteristiche climatiche proprie della zona su cui vengono impiegate. Inoltre, la calibrazione è stata effettuata considerando il solo criterio meteorologico e senza osservare il corrispondente storico degli incendi, che sono stati considerati indipendentemente dalla loro estensione.

L'obiettivo del presente studio di tesi consiste nell'applicare un metodo di calibrazione già testato da studi precedenti per ottenere dei nuovi set di soglie che siano specifici delle macroaree di applicazione e che considerino la storia degli incendi locale. Tali soglie verranno poi comparate

con quelle attualmente in uso in Piemonte, e si cercherà di stabilire dei criteri per selezionare il più adatte al sistema di allertamento.

2 MATERIALI E METODI

2.1 DISEGNO SPERIMENTALE

Lo studio di tesi ha utilizzato due tipologie principali di dati:

- (i) le informazioni meteorologiche raccolte a cadenza giornaliera dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente in ciascuna delle macroaree climatiche piemontesi, coprendo il periodo dal 2010 al 2024.
- (ii) Gli elenchi degli incendi che sono stati registrati negli stessi 15 anni forniti da IPLA, Istituto per le Piante da Legno e l'Ambiente.

Questi dati sono stati raccolti riferendoli alle 6 zone climatiche omogenee in cui è divisa la regione Piemonte, riportate in Tabella 2.1, ottenute unendo e dividendo i territori provinciali in zone omogenee a livello climatico ed amministrativo; a ciascuna macroarea è stata pertanto assegnata una serie di valori giornalieri degli indicatori climatici e un elenco storico della frequenza di incendi.

Tabella 2.1: elenco delle macroaree climatiche in uso in Piemonte

ID	Nome Macroarea	Territorio
1	Cuneo SudOvest	Provincia di Cuneo: bacino del Po
2	Piemonte Nord	Province di Biella, Novara, Verbano-Cusio-Ossola, Vercelli
3	Torino Nord	Città metropolitana di Torino: Canavese
4	Torino Ovest	Città metropolitana di Torino: Val Susa
5	Piemonte SudEst	Province di Alessandria ed Asti
6	Cuneo SudEst	Provincia di Cuneo: bacino del Tanaro

Il procedimento è riassunto dal diagramma di flusso in Figura 2.1: i dati di partenza sono stati aggregati in un unico database, sul quale è stato applicato il metodo di calibrazione ispirato ad Alves et al. (2018); una volta ottenuti i valori dei set di soglie, questi sono stati impiegati per classificare il database storico, assegnando ad ogni giorno una delle cinque classi di pericolo incendio. I risultati delle distribuzioni così ottenute sono stati raccolti per poter confrontare le soglie ottenute dallo studio con quelle di altri sistemi di allertamento.

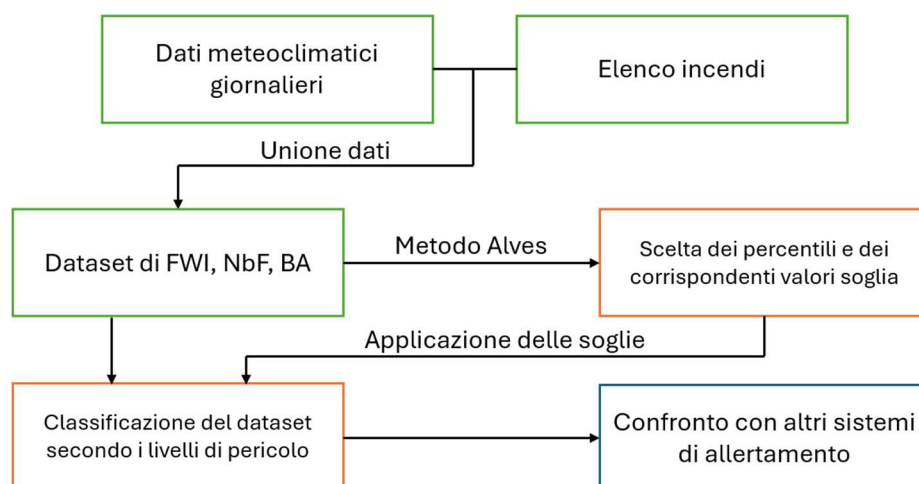


Figura 2.1: diagramma di flusso del lavoro di tesi.

Oltre ai dati di partenza, sono state fornite da ARPA Piemonte anche i valori delle soglie attualmente impiegate nel sistema di allertamento incendi boschivi. Queste consistono in un set di 5 valori (ciascuno corrispondente al massimo FWI per ciascuna classe di pericolo) per ogni giorno dell'anno, comuni in tutto il territorio regionale. Un esempio di tali soglie è riportato nella Tabella 2.2.

Tabella 2.2: estratto del file delle soglie di allertamento usate da ARPA

Giorno	Molto Basso	Basso	Medio	Elevato	Molto Elevato
1	0.2	8.118	18.481	46.406	99990
2	0.2	8.288	18.607	46.123	99990
3	0.2	8.460	18.739	45.845	99990
...	...	...	...	...	...
364	0.2	7.628	18.133	47.256	99990
365	0.2	7.788	18.243	46.974	99990
366	0.2	7.951	18.359	46.690	99990

2.1.1 DESCRIZIONE DEL METODO ALVES

Uno dei modi più semplici per definire delle soglie è usare i percentili della distribuzione dei parametri climatici ottenute dalle serie storiche. Tuttavia, questo metodo non considera la storia degli incendi dell'area di studio, e la sua relazione con l'indice FWI.

Nel 2018, all'interno del libro "Advances in forest fire research" è stato pubblicato l'articolo "Calibration of the Canadian FWI system for the territory of Europe" (Alves et al., 2018), frutto di uno studio richiesto dal Joint Research Centre of Europe (JRC) che si poneva come obiettivo l'individuazione di un metodo di calibrazione basato sulla storia degli incendi boschivi da applicare sull'intero continente europeo, utilizzando la scala delle NUTS3 (Nomenclature of Territorial Units for Statistics, level 3), che nel caso dell'Italia corrispondono alle province. Nello studio sono stati analizzati solamente i paesi europei dotati di registri di incendi con almeno 3 anni di longevità, ma per i paesi mediterranei erano disponibili 10 anni di misure.

I dati di input impiegati nell'analisi sono i valori giornalieri di FWI, del numero di incendi (Number of Fire NbF) e dell'area bruciata (Burned Area BA) misurata in ettari. Lo studio di Alves

è stato condotto sulle serie storiche del decennio 2006-2015, che sono state separate in due differenti dataset in base al periodo dell'anno di appartenenza. Analizzando infatti le tendenze dei paesi considerati, i più soggetti ad incendi si sono rivelati essere quelli meridionali (in ordine: Portogallo PT, Spagna ES, Italia IT, Grecia EL), dove è presente un clima mediterraneo. Lo studio ha pertanto provveduto ad esaminare separatamente la stagione estiva (dal 15 maggio al 30 settembre), più soggetta ad incendi, da quella invernale (dal 1° ottobre al 14 maggio). Tale divisione è stata ulteriormente marcata scegliendo di identificare un differente numero di classi di pericolo nelle due stagioni: 5 classi per la stagione estiva, solo 3 per quella invernale.

Definita l'area di studio, per ogni giorno per il periodo di riferimento (indicato nella colonna Data) sono stati raccolti i dati di FWI, numero incendi e area bruciata misurati (o, se FWI mancanti per quella NUTS3, interpolati). Questo database è stato suddiviso prima secondo le macroaree, e successivamente secondo le due stagioni, secondo i criteri esposti precedentemente.

Per ogni dataset così ottenuto, si è proceduto ordinando i dati secondo l'ordine di FWI crescente, ed assegnando poi un valore incrementale per ogni giorno in base alla sua posizione nella distribuzione. Il valore con FWI minore ha ricevuto 1, e consecutivamente si è aggiunto 1 a tutti i campioni successivi. È stata poi aggiunta una nuova colonna alla tabella dove, dal valore del giorno incrementale di ogni riga, è stata ottenuta la probabilità di occorrenza P_n del corrispondente valore di FWI, ottenuta dalla formula riportata in Equazione 1.

Equazione 1: formula della Probabilità di occorrenza, come riportato nello studio di Alves

$$P_n = \frac{\text{Giorno incrementale } (d_n)}{\text{giorno incrementale totale } (d_{tot})}$$

Sui dataset così ordinati, si è provveduto a creare due nuove colonne dove rappresentare il valore cumulato di NbF e di BA. La distribuzione ordinata di FWI è stata successivamente rappresentata in un grafico, affiancandola alle distribuzioni cumulate delle statistiche degli incendi, così come riportato in Figura 2.2 e Figura 2.3. Scelta una probabilità di non superamento P , i grafici permettono di individuare i valori di FWI corrispondenti a tale probabilità, e il totale del numero di incendi e dell'area bruciata ottenuti sommando tutti gli incendi che si sono verificati in corrispondenza di valori di FWI minori a quello selezionato. Si noti che, tendenzialmente, i valori corrispondenti a maggiori NbF e BA crescono insieme all'aumento di FWI: a maggiori FWI si verificano più incendi.

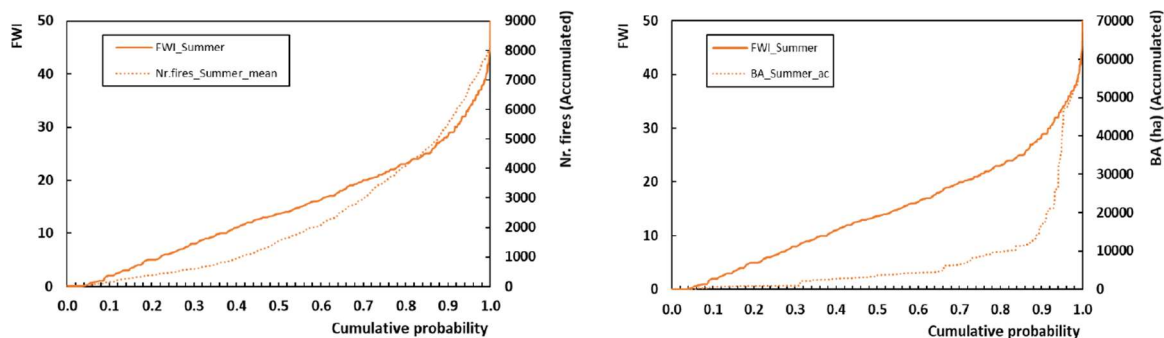


Figura 2.2: esempio di grafici dell'andamento di FWI e le cumulate di incendi e area bruciata, presenti nell'articolo di Alves et al. (2018).

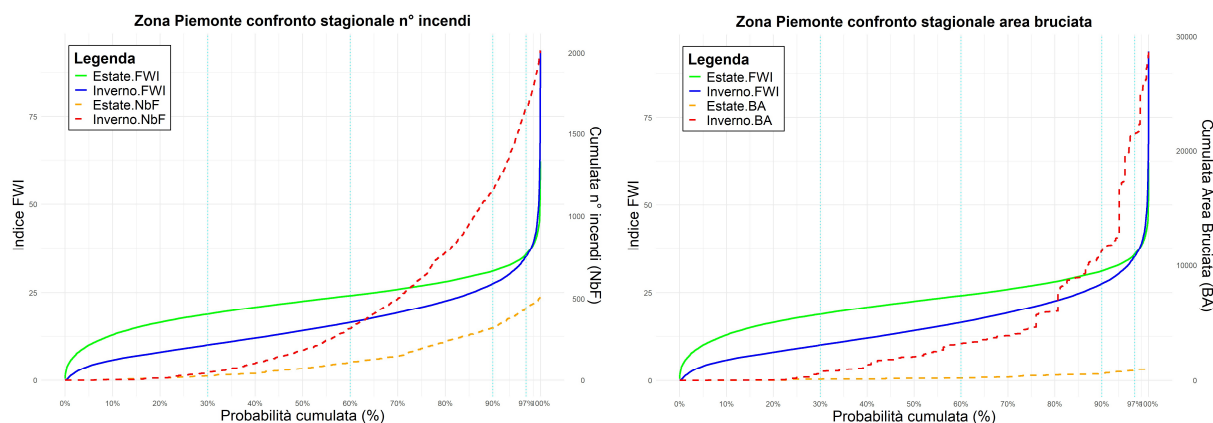


Figura 2.3: esempio di grafici prodotti nel lavoro di tesi, riportando le curve per entrambe le stagioni.

Successivamente si osserva l'andamento delle curve cumulate, cercando di individuare dei punti dove avviene un brusco cambio di pendenza. Tali punti separano tratti di curva con differente inclinazione, e pertanto identificano soglie di FWI per i quali il comportamento degli incendi si intensifica. Selezionati i punti di break-point con cui dividere la cumulata, si calcolano i corrispondenti valori di FWI tramite interpolazione, ottenendo così le classi di pericolo identificate ciascuna da un valore di FWI massimo che corrisponde al percentile di riferimento della soglia. Al termine dell'articolo di Alves, gli autori scelgono di impiegare i seguenti percentili su tutte le NUTS3 oggetto di studio, come riportato in Tabella 2.3:

- per la stagione estiva: 0.3, 0.6, 0.9, 0.97
- per la stagione invernale: 0.5, 0.9

Tabella 2.3: percentili selezionati nello studio di Alves.

Risk Level	a. Summer		b. Winter	
	Risk class	Historical probability	Risk class	Historical probability
1	Very Low	$P < 0.30$	Low	$P < 0.50$
2	Low	$0.30 \leq P < 0.60$	Moderate	$0.50 \leq P < 0.90$
3	Moderate	$0.60 \leq P < 0.90$	High	$P \geq 0.90$
4	High	$0.90 \leq P < 0.97$	—	—
5	Very High	$P \geq 0.97$	—	—

Nelle conclusioni dell'articolo, viene esplicitato che tali valori di soglie possiedono una buona correlazione con il verificarsi di grandi incendi nelle regioni più interessate, ma che tale correlazione non sembra essere così buona in altre regioni, dove l'indice FWI andrebbe affiancato ad altri indici per cercare di prevedere i giorni con grandi incendi.

È bene notare che, nel tentativo di replicare il metodo sul territorio piemontese, ci si è voluti lievemente discostare dal procedimento descritto nell'articolo di Alves et al. (2018), che meglio si adatta alle regioni con clima mediterraneo dove gli incendi sono più comuni nella stagione estiva. Nell'applicazione sul Piemonte, al posto di selezionare solamente 3 classi per la stagione invernale, si è deciso di mantenere un numero di 4 soglie per entrambe le stagioni, identificando così 5 classi di pericolo e mantenendo continuità con l'attuale sistema di allertamento.

Prima di applicare il metodo su ognuna delle singole zone climatiche, sono stati realizzati i grafici utilizzando tutti i dati disponibili per il Piemonte, cercando di osservare dei comportamenti generali ascrivibili all'intera regione. Il confronto tra le stagioni è apparso difficoltoso a causa dei diversi ordini di grandezza tra le curve cumulate, con la curva della stagione con meno incendi

che appare come compressa verso l'asse delle ascisse. Per poter osservare al meglio l'andamento delle curve cumulate stagionali, si è deciso di rappresentarle usando non i valori assoluti di NbF e BA ma bensì quelli relativi, ottenuti dividendo ogni valore per il valore massimo della cumulata stagionale; in questo modo, impiegato nella realizzazione dei grafici in Figura 2.4, entrambe le cumulate sono contenute in un intervallo adimensionale compreso tra 0 ed 1, ed è più agevole osservare i cambi di pendenza.

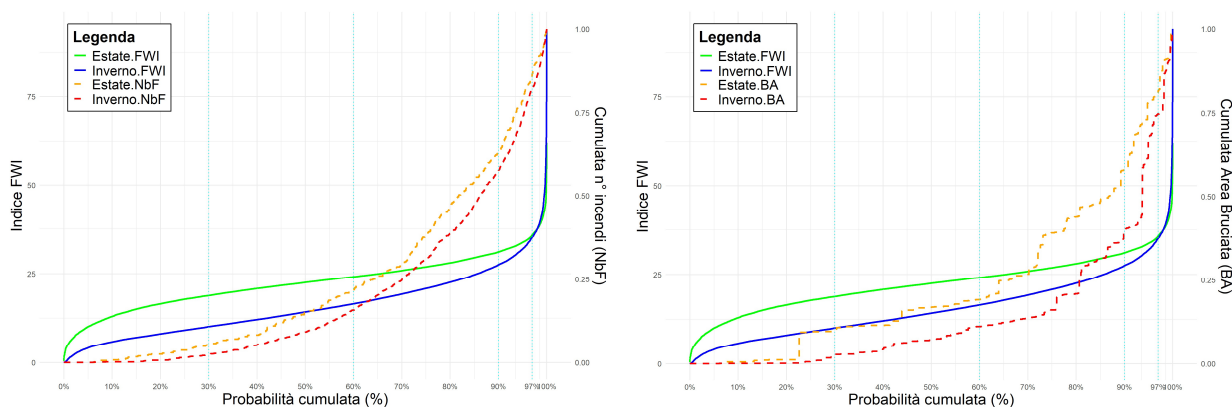


Figura 2.4: esempi di curve cumulate rappresentate in scala relativa, con le ordinate comprese tra 0 e 1.

L'articolo non specifica quale delle due curve cumulate, una per gli incendi e l'altra per la superficie, sia stata impiegata per identificare i percentili di break. Le differenze tra le due curve sono evidenti: mentre la curva NbF cresce dolcemente, la curva BA presenta numerosi salti verticali in corrispondenza delle giornate dove è stata bruciata una grande superficie; infatti, mentre non si riscontrano mai più di 7 incendi avvenuti lo stesso giorno nella stessa macroarea, i valori delle aree bruciate presentano una variabilità decisamente maggiore che si alterna tra i numerosi incendi di pochi ettari e i grandi incendi di dimensioni particolarmente rilevanti. Si è scelto pertanto di impiegare una nuova grandezza, la BA media giornaliera, che verrà chiamata successivamente come BA/day; questa è stata calcolata per ogni giorno effettuando rapporto tra l'area bruciata totale e il numero di incendi. Questa nuova grandezza rappresenta la dimensione media dell'incendio giornaliero, ed esprime la difficoltà di estinzione del fuoco una volta innescato. Come si può osservare nell'esempio di Figura 2.5, a nuova curva cumulata ottenuta presenta gradini di minor pendenza in corrispondenza dei giorni dove si sono verificati multipli incendi, ma contribuisce a far risaltare maggiormente i grandi incendi singoli.

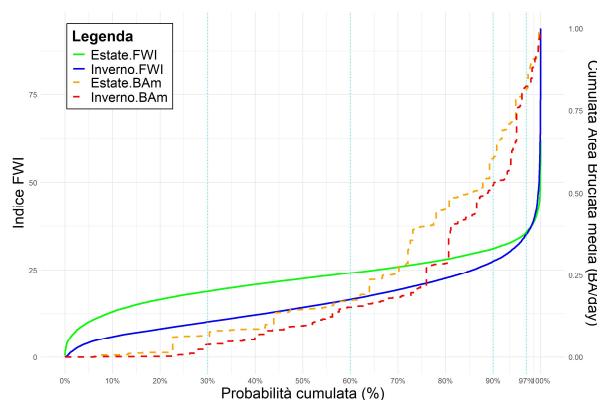


Figura 2.5: esempio di grafico con cumulate della Area Bruciata dell'incendio medio.

Il metodo è stato applicato prima sull'intero database della regione Piemonte, e poi singolarmente su ciascuna macroarea climatica, ricavando ogni volta due set di soglie: uno che utilizza i percentili consigliati dall'articolo di Alves et al. (2018) per la stagione con più incendi, e uno dove i punti di break-point sono stati ottenuti su interpretazione del tesista in corrispondenza dei cambi di pendenza della curva cumulata.

2.1.2 RICERCA DI CORRELAZIONE TRA INDICI CLIMATICI ED AREA BRUCIATA

Osservando la distribuzione dei grandi incendi ordinata secondo il Fire Weather Index, emerge come non sempre gli incendi più estesi avvengano in concomitanza dei giorni con valori più alti di FWI. Alcuni grandi incendi si sono manifestati in condizioni di FWI non allarmanti. In fase di analisi preliminare, è stata ricercata la correlazione tra Fire Weather Index e l'area degli incendi, utilizzando la rappresentazione tramite scatter-plot per rappresentare tutti gli incendi con superficie maggiore di un ettaro. Da tale grafico è stato confermato che, nonostante FWI sia riconosciuto come uno dei migliori indici per capacità predittiva, non è presente una forte correlazione tra valori elevati di FWI e superficie di incendio. Tale procedimento è stato ripetuto anche sugli altri indici del CFFDRS, di cui FWI è la combinazione finale. Tra i vari sottoindici, una traccia di correlazione per i grandi incendi è stata osservata per il Fine Fuel Moisture Code, per il quale gli incendi di superficie maggiore si collocano in corrispondenza ai valori più elevati.

Vista la possibilità di ritrovare una correlazione tra FFMC ed area degli incendi, è stato ritenuto interessante ripetere il metodo di calibrazione proposto da Alves, ma impiegando come indicatore FFMC al posto di FWI. Le tabelle ed i grafici ottenuti dal procedimento di calibrazione sono raccolti nell'Allegato A.

2.1.3 APPLICAZIONE DELLE SOGLIE E METODI DI CONFRONTO

Ottenuti i valori delle soglie al termine della fase di interpolazione, questi sono stati applicati sul dataset per classificare ciascun giorno con un livello di pericolo per ciascuno dei tre set di soglie impiegate: (i) il set con i percentili di Alves et al. (2018); (ii) il set con i percentili definiti nello studio di tesi; (iii) le soglie Arpa attualmente impiegate dalla regione Piemonte.

I seguenti passaggi sono stati applicati per ogni macroarea allo stesso modo: i set di soglie sono stati applicati sulle serie storiche di incendi, comparando i valori giornalieri di FWI con le soglie e assegnando ad ogni giorno del periodo di studio una singola classe di pericolo incendi boschivi tra le 5 individuate dalle 4 soglie. Successivamente, sono state create delle tabelle dove per ciascuna classe sono stati riportate le seguenti grandezze:

- I percentili scelti e soglie di FWI ricavate; per le soglie Arpa, questa colonna non presenta valori in quanto le soglie non sono costanti nella stagione ma bensì variano giorno per giorno.
- Il n° di giorni che sono stati classificati con quella classe di pericolo, e la percentuale sull'intero periodo di studio
- Il numero di giorni nei quali si sono verificati incendi.
- Il numero di incendi boschivi, pari o superiore se presenti multipli incendi al giorno.
- La probabilità di innesco di un incendio per ogni giorno della classe di pericolo, ottenuta dividendo il numero di incendi per il numero di giorni di allarme.

- La percentuale degli incendi avvenuti all'interno di tale classe di pericolo rispetto a tutti gli incendi della macroarea nella stagione considerata, e la conseguente probabilità di non superamento.

È stato possibile effettuare un primo confronto tra i 3 sistemi di allertamento a partire da queste informazioni.

2.1.4 ROC ANALYSIS

Uno dei metodi utilizzati in statistica per confrontare le prestazioni di differenti sistemi di allarme è la Receiver Operating Characteristic Analysis, conosciuta anche come analisi ROC. Tale analisi è impiegata per valutare l'accuratezza e l'affidabilità di un modello di classificazione binaria, misurando quanto tale modello si discosta da una previsione casuale. Gli ambiti di applicazione di questo metodo sono molteplici e comprendono medicina, psicologia, fisica e meteorologia. Recenti studi hanno impiegato l'analisi ROC per comparare l'efficacia di diversi indici meteorologici nella previsione del pericolo incendi boschivi nel territorio semiarido della regione spagnola della Murcia (Pérez-Sánchez, et al., 2017).

Il seguente procedimento è stato applicato su ogni singola soglia per ogni set di soglie individuato, considerando come appartenenti ad una classe anche tutti i giorni classificati con le classi di pericolo superiori. Ad esempio, per valutare la soglia che separa la classe di pericolo Basso da Moderato, sono stati considerati come giorni di allarme tutti quelli con valore di FWI superiore della soglia, e pertanto anche quelli considerati come pericolo Elevato o Molto Elevato. Di conseguenza, tutte le analisi condotte sulla classe di pericolo Molto Basso non hanno significato, in quanto non è presente una soglia minima e pertanto tale classe comprende tutti i giorni del periodo di riferimento.

Per ogni giorno, sono state poste due condizioni a risposta binaria (Positive/Negative): se sia stata superata la soglia di allarme, e se si siano verificati incendi di qualsiasi entità. Viene costruita così la tabella di contingenza di Tabella 2.4, assegnando ad ogni giorno del dataset una delle seguenti categorie:

- CA: corretti allarmi, o True Positive. Incendio previsto ed avvenuto.
- FA: falsi allarmi, o False Positive. Incendio previsto ma non avvenuto.
- MA: mancati allarmi, o False Negative. Incendio non previsto, ma avvenuto.
- CN: corretti negativi, o True Positive. Incendi non previsti e non avvenuti.

Tabella 2.4: tabella di contingenza per valutare la soglia di allarme incendi boschivi.

Tabella di Contingenza	Presenza di Incendi	Assenza di Incendi
Condizioni di Allarme (soglia superata)	CA	FA
Condizione di non Allarme (soglia non superata)	MA	CN

Ottenuto il numero di giorni classificati per ciascuno di queste categorie, si procede a calcolare i seguenti indici statistici secondo le formule riportate in Equazione 2:

- Hit Ratio HR, oppure True Positive Ratio TPR; indica la percentuale incendi correttamente previsti sul totale di tutti gli incendi verificatisi.
- False Alarm Ratio FAR, oppure False Negative Ratio FNR; rappresenta invece la percentuale di falsi allarmi su tutti i giorni di allarme.
- True Skill Statistic TSS, che incorpora entrambi gli indici precedenti, permettendo di valutare la capacità del sistema di predizione.

Equazione 2: formule degli indici statistici impiegati nell'analisi ROC

$$HR = \frac{TP}{TP+F} \qquad FAR = \frac{FP}{FP+T} \qquad TSS = HR - FAR$$

Tutti i valori ottenuti nello svolgimento dell'analisi ROC sono stati riportati in tabelle per un più facile confronto tra i set di soglie. Per ogni soglia esaminata si ottiene una coppia di valori, corrispondente ad un punto all'interno del grafico HR-FAR; dai punti ottenuti usando le 5 classi di pericolo si traccia la curva AUC corrispondente ad ogni set di soglie esaminato, come in Figura 2.6. Maggiore è l'area contenuta al di sotto la curva (compresa tra 0 e 1), migliore è la capacità previsionale del sistema.

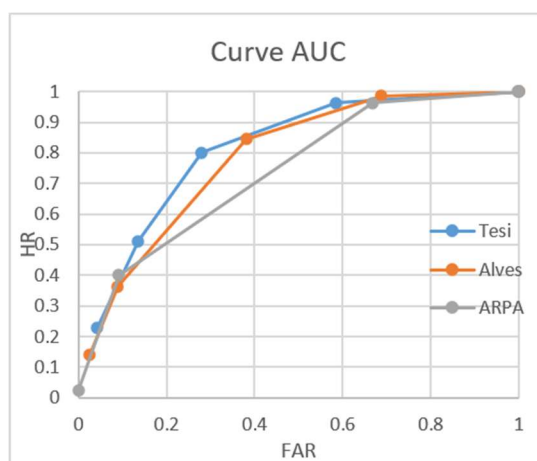


Figura 2.6: esempio di curve AUC ottenute effettuando l'analisi ROC su ciascun set di soglie.

2.1.5 DISTRIBUZIONI PER AREA BRUCIATA

Uno degli obiettivi del metodo di calibrazione impiegato nello studio di tesi era l'utilizzo non solo dei dati climatologici, ma anche delle serie storiche di incendi. Una volta ottenuti i set di soglie, si è provato a confrontare le classi di pericolo ottenute utilizzando proprio l'area bruciata degli incendi in esse classificati. Per poter visualizzare contemporaneamente le distribuzioni di una variabile nelle 5 diverse classi di pericolo incendi boschivi, è stata impiegata la rappresentazione mediante "diagramma a scatola e baffi", altrimenti nota come box-plot. Questa tipologia di rappresentazione permette infatti di visualizzare in una sola volta diverse proprietà delle distribuzioni analizzate:

- La linea della mediana, il valore che divide il campione di dati in due insiemi con pari numero di elementi.

- La scatola o box, rappresentante l'intervallo contenente il 50% dei punti, compresi tra 1° e 3° quartile.
- I baffi, ossia i segmenti posti esterni alla scatola che raffigurano la variabilità del campione nelle code della distribuzione. I punti posti oltre i baffi sono considerati outliers.

Nel realizzare i diagrammi box-plot sono stati considerati solamente i giorni con presenza di incendi, imponendo la condizione $NbF \geq 1$. I grafici così ottenuti sono stati affiancati per confrontare come variassero le aree bruciate usando i diversi sistemi di allertamento all'interno della stessa macroarea e stagione, come nell'esempio di Figura 2.7.

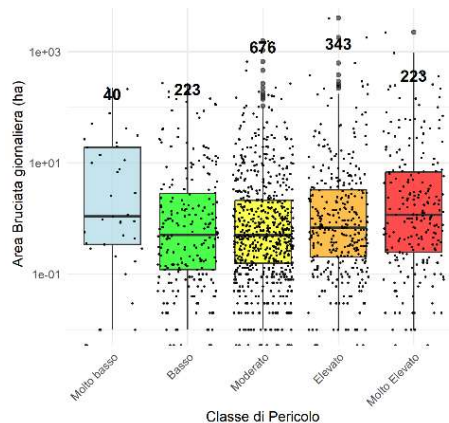


Figura 2.7: esempio di rappresentazione mediante box-plot dell'area bruciata degli incendi, divisi nelle 5 classi di pericolo.

Nei grafici sono stati aggiunti il numero degli elementi di ciascuna distribuzione, ossia il numero di giorni con incendio per ogni classe di allarme. È stato inoltre scelto di rappresentare l'asse delle ordinate in scala logaritmica a causa dell'estrema variabilità del campione; le dimensioni degli incendi considerati spaziano oltre i tre ordini di grandezza. Mentre il 64% dei casi di incendio è caratterizzata da area bruciata inferiore all'ettaro, all'interno dello stesso database sono presenti grandi incendi con migliaia di ettari di estensione.

Le aspettative della rappresentazione box-plot di un buon sistema di allertamento con le distribuzioni progressivamente spostate verso valori maggiori man mano che la classe di allarme si fa più severa.

3 RISULTATI

Nel presente capitolo vengono riportati i risultati ottenuti applicando i metodi descritti nel Capitolo 2. Nonostante il metodo proposto da Alves et al. (2018) sia riferito alla scala europea delle unità territoriali NTUS3, simile a quella delle zone climatiche piemontesi, si è deciso di applicare il metodo anche sull'intero database regionale, per osservare il comportamento generale del territorio Piemontese, e solo successivamente sulle singole macroaree, osservando le loro peculiarità.

Il database ottenuto unendo i dati forniti da ARPA e da IPLA è stato diviso in due stagioni, secondo il criterio impiegato dal metodo Alves: (i) Inverno dal 1° ottobre al 14 maggio; (ii) estate dal 15 maggio al 30 settembre. Per ogni macroarea è stato effettuato un confronto su come si distribuiscono gli incendi nelle due stagioni selezionate, come riportato in Figura 3.1.

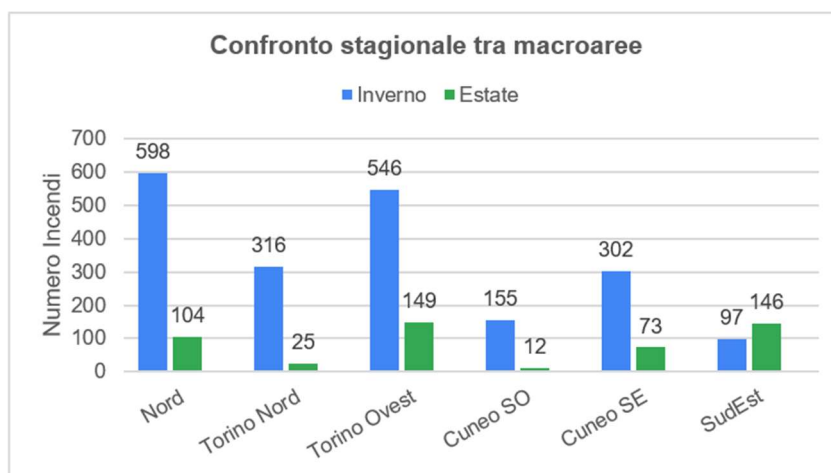


Figura 3.1: grafico a barre con frequenza stagionale degli incendi per zona climatica.

Per quasi tutte le zone climatiche, la divisione in due stagioni ha separato le serie di incendi concentrando il numero maggiore nella stagione invernale. Dalla Tabella 3.1 emerge infatti che, mentre a livello regionale gli incendi invernali sono l'80% del totale, in alcune zone questa percentuale è ancora maggiore. Se si osserva la superficie totale percorsa dagli incendi, la percentuale della componente invernale aumenta drasticamente fino a superare il 95° percentile.

L'unica eccezione a questa tendenza regionale è costituita dalla zona del Piemonte SudEst: oltre a trattarsi della seconda macroarea con meno incendi e la prima per minor area bruciata in assoluto, si tratta dell'unica zona climatica dove i rapporti stagionali sono invertiti. La maggior parte degli incendi si verifica nei mesi estivi, costituendo i due terzi della superficie bruciata totale. I motivi di questo comportamento anomalo sono da ricercarsi in diverse caratteristiche del territorio, come la presenza dell'Appennino come rilievo montuoso principale, il clima maggiormente di tipo continentale e di conseguenza la differente tipologia di vegetazione.

Tabella 3.1: distribuzione degli incendi per stagione e zona climatica.

Distribuzione incendi sul territorio					
Macroarea	Inverno		Estate		Annua
Nord	598	85%	104	15%	702
Torino Nord	316	93%	25	7%	341
Torino Ovest	546	79%	149	21%	695
Cuneo SO	155	93%	12	7%	167
Cuneo SE	302	81%	73	19%	375
SudEst	97	40%	146	60%	243
Piemonte	2014	80%	509	20%	2523

Distribuzione superfici bruciate BATot (ha)					
Macroarea	Inverno		Estate		Annua
Nord	9398.8	96%	434.1	4%	9832.9
Torino Nord	8093.22	99%	79.38	1%	8172.6
Torino Ovest	8698.26	99%	119.6	1%	8817.86
Cuneo SO	1736.04	100%	5.16	0%	1741.2
Cuneo SE	597.4	91%	57.06	9%	654.46
SudEst	197.5	34%	388.24	66%	585.74
Piemonte	28721.22	96%	1083.54	4%	29804.76

3.1 DEFINIZIONE DELLE SOGLIE

Nel presente capitolo sono riportati i grafici ottenuti impiegando il metodo Alves zona per zona, e vengono commentate le decisioni effettuate nella scelta dei percentili da cui ottenere le soglie. Per ogni macroarea analizzata è stato prodotto un grafico dove sono rappresentate contemporaneamente le curve dei valori di FWI in ordine crescente (invernali in blu, estivi in verde) e le curve cumulate dell'area bruciata per l'incendio medio giornaliero (invernali in rosso, estive in arancione). La superficie è stata resa adimensionale per poter rappresentare le cumulate di entrambe le stagioni con gli estremi in comune (0-1). Questo ha permesso di individuare più facilmente i tratti di cambio di pendenza comuni alle due curve. I break-point della stagione invernale, più interessata da incendi boschivi, sono stati segnati con delle linee verticali azzurre che, dal percentile selezionato sull'asse delle ascisse, risalgono intercettando le curve nel punto il cui valore di FWI viene assegnato alla soglia desiderata.

La prima analisi è stata condotta sul grafico ottenuto usando l'intero database della regione Piemonte (Figura 3.2). Essendo la curva cumulata costituita da tutti gli incendi avvenuti durante il periodo di riferimento, ne consegue che i grandi incendi formano degli scalini molto meno ripidi rispetto a quando vengono valutati nei campioni ridotti delle singole macroaree. Per separarsi dai percentili di Alves, si è scelto di porre il primo break-point in corrispondenza del primo innalzamento della curva cumulata, e di porre l'ultimo al 90° percentile.

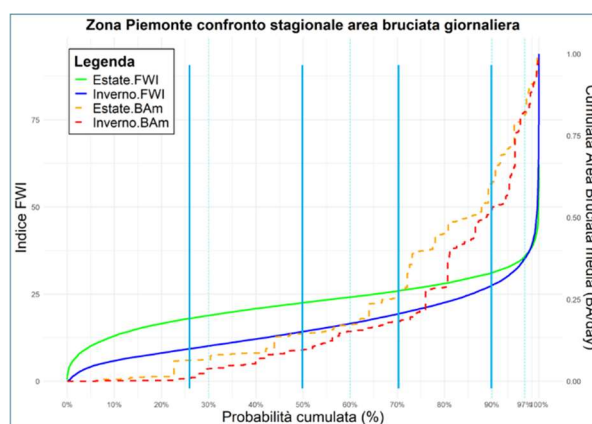


Figura 3.2: scelta percentili su curve della regione Piemonte

La prima macroarea ad essere stata esaminata è la zona Nord, maggiormente soggetta al fenomeno degli incendi boschivi. Dalla Figura 3.3 emerge che, in linea con l'andamento regionale, la superficie bruciata estiva è quasi trascurabile se comparata a quella dei mesi invernali, nonostante il fatto che i valori di FWI siano quasi sempre maggiori nella stagione estiva; solamente oltre il 95° percentile le misure massime di FWI invernali superano quelle estive. I percentili individuati dallo studio di Alves sono adatti per dividere la prima parte della cumulata, ma la soglia che separa il pericolo Moderato da Elevato è stata abbassata fino al 80° percentile, per far rientrare nel pericolo alto un maggior numero di incendi.

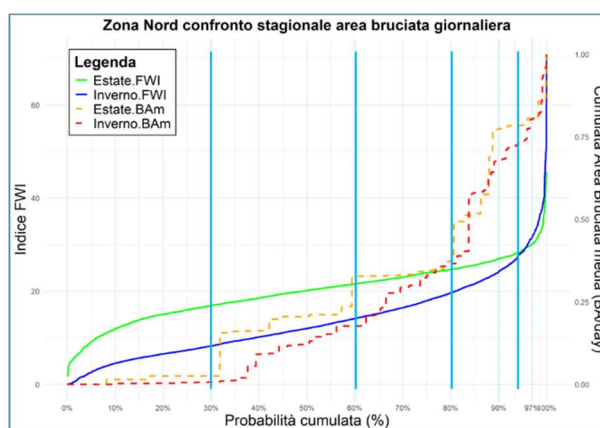


Figura 3.3: scelta percentili su curve della zona Nord

Si è proceduto confrontando i grafici ottenuti per le due macroaree in cui è diviso il territorio della provincia di Torino (Figura 3.4). Le distribuzioni di FWI sono molto simili, seppur con valori maggiori per la zona settentrionale. Entrambe le curve cumulate sono caratterizzate da gradoni particolarmente ripidi che alterano bruscamente la pendenza della curva, in concomitanza con episodi di incendi gravosi dalla grande estensione (una buona parte dei quali avvenuti nel mese di ottobre del 2017). È stato pertanto deciso di posizionare i break-point in corrispondenza di questi grandi incendi, così da farli rientrare nelle classi di pericolo più elevate. Nel caso della macroarea Torino Ovest, questa scelta ha comportato l'attribuzione del pericolo Molto Elevato per tutti i casi superiori al 90° percentile, e di conseguenza il 10% dei giorni nel periodo di studio verrà classificato con allerta massima.

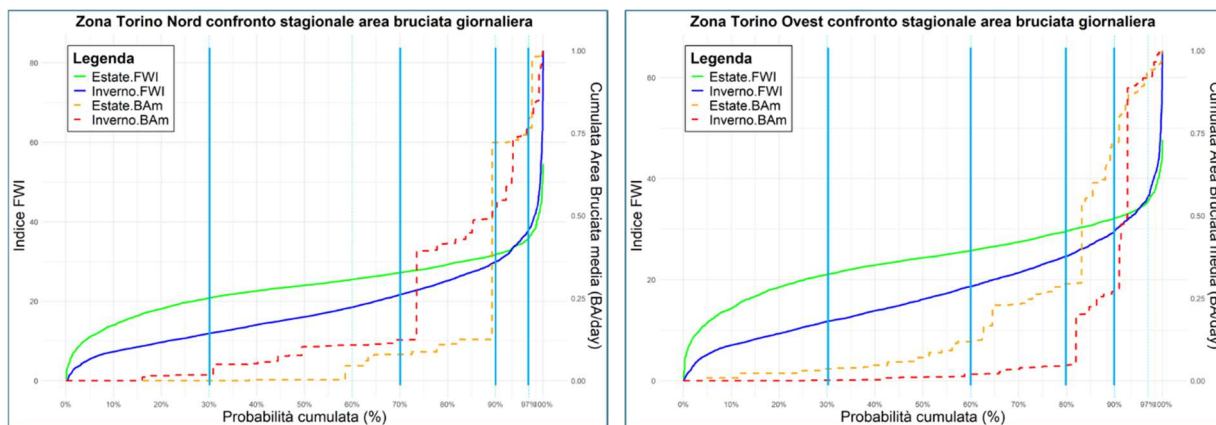


Figura 3.4: scelta percentili su curve delle zone Torino Nord e Torino Ovest

Sono state analizzate in contemporanea anche le due macroaree che dividono la provincia di Cuneo in due parti, orientale e occidentale (Figura 3.5). Come già emerso precedentemente per entrambe le stagioni, i dati rivelano che Cuneo SO presenta un minor numero di incendi rispetto a Cuneo SE, eppure l'area bruciata è maggiore. I valori di FWI per Cuneo SO sono inoltre minori sia nella media, sia soprattutto negli estremi. Osservando l'andamento delle cumulate della BA giornaliera, viene individuata una assenza di incendi per i valori inferiori di FWI, e il primo break-point viene posto appena la cumulata inizia a crescere. Per la macroarea Cuneo SE si scelgono valori di percentili prossimi a quelli suggeriti dall'articolo di Alves, mentre la presenza di bruschi salti fa divergere maggiormente i break-point selezionati per Cuneo SO.

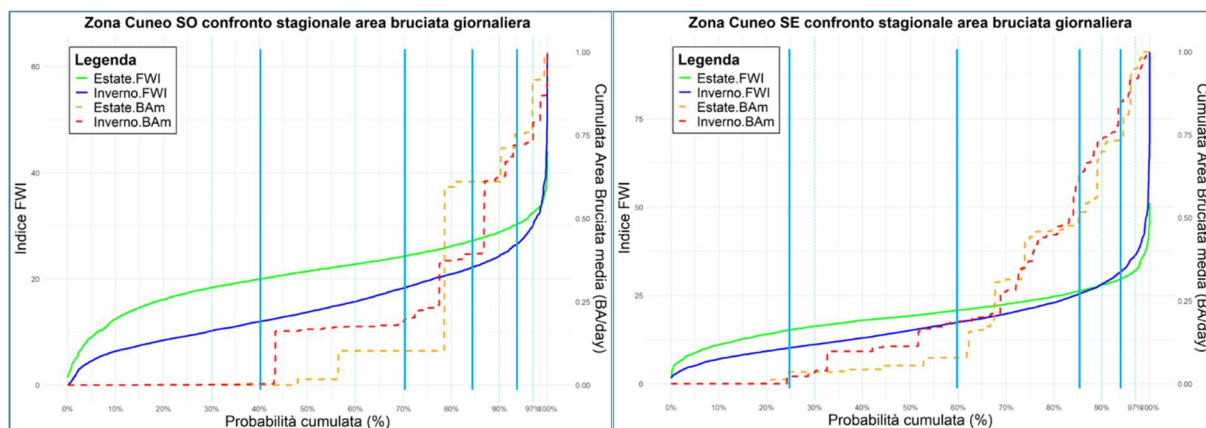


Figura 3.5: scelta percentili su curve delle zone Cuneo SudOvest e Cuneo SudEst

Come già emerso nel primo confronto tra le macroaree, la zona del Piemonte SudEst è l'unica che manifesta un comportamento anomalo rispetto all'andamento regionale; il numero di area bruciata è maggiore nella stagione estiva, che è caratterizzata da valori di FWI più alti rispetto a quelli misurati in altre macroaree. Nella Figura 3.6 sono state pertanto rappresentate le linee che individuano i break-point per la stagione estiva, in colore verde. Nella stagione invernale le misure di FWI sono inizialmente più basse rispetto alla media piemontese, ma avvicinandosi alla coda della distribuzione i valori massimi di FWI sono stati comunque misurati durante i mesi invernali, in conformità con quanto osservato a livello regionale. La scelta dei percentili, sia per la stagione estiva sia per quella invernale, ha mantenuto il 90° come soglia per il pericolo Molto Elevato.

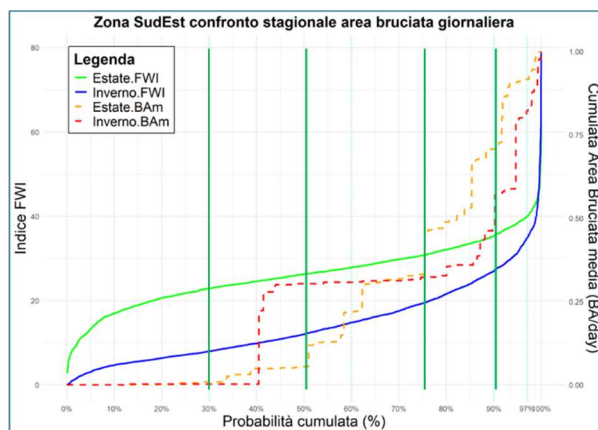


Figura 3.6: scelta percentili su curve della zona Piemonte SudEst

Tutti i percentili individuati nel lavoro di tesi, e i valori di FWI ad essi associati, sono stati raccolti in Tabella 3.2. Lo stesso è stato fatto con i valori dei percentili suggeriti da Alves in Tabella 3.3, uguali in tutte le zone climatiche. Si può notare come, in entrambi i modelli proposti, le soglie estive siano tendenzialmente più alte di quelle invernali, visto che in estate FWI assume valori maggiori per i primi tre quartili della distribuzione. Quando si osserva la proposta secondo i percentili di Alves, questo rapporto però non vale per le soglie del pericolo Molto Elevato di alcune zone come Nord, Torino Nord, Torino Ovest e Cuneo SE; questo è dovuto al fatto che in tali zone una percentuale superiore al 3% degli estremi di FWI sono stati registrati nella stagione invernale.

Tabella 3.2: percentili e soglie per macroarea, proposta di tesi

Percentili Tesi									
Macroarea		Stagione Invernale				Stagione Estiva			
		Basso	Moderato	Elevato	Molto Elevato	Basso	Moderato	Elevato	Molto Elevato
Nord	Percentile	30%	60%	80%	95%	30%	55%	70%	97%
	Soglia FWI	8.3	14.1	19.6	28.4	16.9	20.8	23.0	30.1
Torino N	Percentile	30%	70%	90%	97%	30%	55%	80%	95%
	Soglia FWI	11.9	21.6	29.9	38.0	20.8	24.6	29.2	34.3
Torino O	Percentile	40%	60%	80%	90%	30%	60%	80%	95%
	Soglia FWI	13.8	18.6	24.6	29.5	21.0	25.7	29.6	34.0
Cuneo SO	Percentile	40%	70%	85%	95%	40%	75%	85%	95%
	Soglia FWI	11.9	18.2	22.4	27.6	19.9	25.1	27.3	32.4
Cuneo SE	Percentile	25%	60%	85%	95%	25%	60%	85%	97%
	Soglia FWI	10.2	17.4	25.3	32.9	15.3	20.8	26.1	32.0
SudEst	Percentile	40%	70%	80%	90%	30%	50%	75%	90%
	Soglia FWI	9.8	17.5	21.5	27.0	22.8	26.2	30.7	35.3
Piemonte	Percentile	25%	50%	70%	90%	20%	40%	60%	85%
	Soglia FWI	9.1	14.2	19.3	27.5	16.5	20.8	24.1	29.5

Tabella 3.3: percentili e soglie per macroarea, proposta di Alves.

Percentili Alves									
Macroarea		Stagione Invernale				Stagione Estiva			
		Basso	Moderato	Elevato	Molto Elevato	Basso	Moderato	Elevato	Molto Elevato
Nord	Percentile	30%	60%	90%	97%	30%	60%	90%	97%
	Soglia FWI	8.2	14.1	24.2	31.6	16.9	21.5	26.9	30.2
Torino N	Percentile	30%	60%	90%	97%	30%	60%	90%	97%
	Soglia FWI	11.9	18.4	29.9	38.1	20.8	25.5	31.8	36.0
Torino O	Percentile	30%	60%	90%	97%	30%	60%	90%	97%
	Soglia FWI	11.7	18.6	29.6	36.5	21.0	25.7	32.2	35.4
Cuneo SO	Percentile	30%	60%	90%	97%	30%	60%	90%	97%
	Soglia FWI	10.2	15.7	24.3	30.2	18.4	22.8	28.8	32.5
Cuneo SE	Percentile	30%	60%	90%	97%	30%	60%	90%	97%
	Soglia FWI	11.1	17.4	28.2	36.5	16.3	20.8	28.0	32.1
SudEst	Percentile	30%	60%	90%	97%	30%	60%	90%	97%
	Soglia FWI	8.0	14.8	27.0	34.8	22.9	27.9	35.3	39.9
Piemonte	Percentile	30%	60%	90%	97%	30%	60%	90%	97%
	Soglia FWI	10.1	16.5	27.5	35.3	18.8	24.1	31.1	35.8

3.2 APPLICAZIONE DELLE SOGLIE

Il passo successivo è stato applicare su ciascuna macroarea di tutti e tre i seguenti modelli di soglie: proposta di Tesi, proposta di Alves e infine le soglie ARPA attuali. I giorni del periodo storico di studio sono stati divisi in 5 insiemi, ognuno per ogni classe di pericolo, e per ciascuno dei quali sono state individuate le seguenti caratteristiche:

- I percentili scelti e soglie di FWI ricavate; per le soglie Arpa, questa colonna non presenta valori in quanto le soglie non sono costanti nella stagione ma bensì variano giorno per giorno.
- Il n° di giorni che sono stati classificati con quella classe di pericolo, e la percentuale sull'intero periodo di studio.
- Il numero di giorni nei quali si sono verificati incendi ed il numero di incendi boschivi.
- La probabilità di innesco di un incendio per ogni giorno della classe di pericolo, ottenuta dividendo il numero di incendi per il numero di giorni di allarme.
- La percentuale degli incendi avvenuti all'interno di tale classe di pericolo rispetto a tutti gli incendi della macroarea nella stagione considerata, e la conseguente probabilità di non superamento (somma delle percentuali di incendi di tutte le classi sottostanti la soglia).

Partendo da queste informazioni, è stato possibile effettuare un primo confronto tra i 3 sistemi di allertamento prima sull'intero database piemontese, e poi aumentando il livello di dettaglio nelle singole zone climatiche.

3.2.1. Piemonte

Una prima considerazione che si effettua osservando i risultati sull'intero territorio piemontese (Tabella 3.4) è che il sistema di monitoraggio attualmente impiegato da Arpa concentra oltre la metà del campione nella classe di pericolo Moderato, lasciando pochissimi giorni nelle classi di pericolo Molto Basso e Molto Elevato. Avendo posto una condizione molto esigente per la soglia di allarme massimo, la probabilità incendi/giorno invernale di allerta rossa secondo le soglie Arpa è pari al 78%, decisamente più alta rispetto a quella ottenuta impiegando gli altri sistemi di allertamento, pari a 59% per Alves e 42% per Tesi. Tuttavia, solo il 4% degli incendi totali viene classificato in tale classe, mentre quasi la metà (49%) rientra nel pericolo Moderato. Questo comportamento è ancora più accentuato nella stagione estiva: i giorni considerati di pericolo Moderato costituiscono il 68% del campione, e in essi si verificano due terzi degli incendi estivi.

Confrontando le due stagioni, emerge una marcata differenza tra le probabilità di incendi/giorno per tutte le 3 proposte di soglie; i valori di tale probabilità sono decisamente inferiori in estate, anche per i giorni a massimo allarme, a causa del fatto che rispetto ai mesi invernali sono presenti molti meno incendi (solo 509 su 2523, il 20%).

Tabella 3.4: tabelle classi per l'intero territorio piemontese.

Piemonte Inverno										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme	giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. non superamento	
Tesi	Molto basso	0.25	9.1	5090	25%	25	33	1%	2%	2%
	Basso	0.50	14.2	5091	25%	124	151	3%	7%	9%
	Moderato	0.70	19.3	4073	20%	270	315	8%	16%	25%
	Elevato	0.90	27.5	4073	20%	520	660	16%	33%	58%
	Molto Elevato	1.00	999.0	2037	10%	566	855	42%	42%	100%
Alves	Molto basso	0.30	10.1	6109	30%	40	48	1%	2%	2%
	Basso	0.60	16.5	6109	30%	223	268	4%	13%	16%
	Moderato	0.90	27.5	6109	30%	676	843	14%	42%	58%
	Elevato	0.97	35.2	1426	7%	343	497	35%	25%	82%
	Molto Elevato	1.00	999.0	611	3%	223	358	59%	18%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	65	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	6570	32%	42	48	1%	2%	2%
	Moderato	NA	NA	10852	53%	801	993	9%	49%	52%
	Elevato	NA	NA	2766	14%	618	886	32%	44%	96%
	Molto Elevato	NA	NA	111	1%	44	87	78%	4%	100%
Piemonte Estate										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme	giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. Non superamento	
Tesi	Molto basso	0.20	16.5	2501	20%	13	13	1%	3%	3%
	Basso	0.40	20.8	2502	20%	27	29	1%	6%	8%
	Moderato	0.60	24.1	2502	20%	63	69	3%	14%	22%
	Elevato	0.85	29.5	3128	25%	146	167	5%	33%	55%
	Molto Elevato	1.00	999.0	1877	15%	194	231	12%	45%	100%
Alves	Molto basso	0.30	18.8	3752	30%	26	27	1%	5%	5%
	Basso	0.60	24.1	3753	30%	77	84	2%	17%	22%
	Moderato	0.90	31.1	3753	30%	185	209	6%	41%	63%
	Elevato	0.97	35.8	876	7%	100	122	14%	24%	87%
	Molto Elevato	1.00	999.0	376	3%	55	67	18%	13%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	0	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	2594	21%	13	13	1%	3%	3%
	Moderato	NA	NA	8548	68%	296	338	4%	66%	69%
	Elevato	NA	NA	1297	10%	122	140	11%	28%	96%
	Molto Elevato	NA	NA	71	1%	12	18	25%	4%	100%

3.2.2. Piemonte Nord

Analizzando i risultati per la zona climatica Piemonte Nord (Tabella 3.5), dove la divisione stagionale è netta; dei 702 incendi registrati nel periodo di studio l'85% è invernale e solo il 15% estivo. Sono tendenzialmente confermate le considerazioni effettuate sull'intera regione Piemonte. In inverno, i giorni con pericolo Molto Basso sono maggiormente presenti rispetto alla percentuale regionale, probabilmente a causa delle condizioni climatiche che favoriscono una frequenza maggiore di giorni con meteo umido con precipitazioni abbondanti o addirittura nevicate. Nonostante il Nord Piemonte sia la macroarea più focosa in assoluto, le soglie ARPA invernali presentano pochissimi giorni con pericolo massimo, solo 7 in 15 anni, con una percentuale di predizione del 89% che però in questa macroarea è inferiore da quella ottenuta dalle soglie dei percentili; la caratteristica più significativa che emerge infatti dalla Tabella 3.5: tabelle classi per la macroarea Piemonte Nord. è che la probabilità di incendi /giorno nelle classi di pericolo Molto Elevato ottenute dai metodi dei percentili eccede l'unità: in media, ci sono stati più incendi che giorni di allarme. Tale valore è lievemente più basso per la classificazione ARPA,

ma rimane elevato anche per il pericolo Elevato (80%). In generale, le soglie che restituiscono probabilità più alta sembrano essere quelle dei percentili di Alves.

In estate, solo il 4% dei giorni è stato classificato da ARPA con pericolo Elevato, mentre l'allerta massima è stata usata pochissimo e la minima per nulla; nuovamente quasi due terzi del campione estivo appartengono alla classe Moderata, dove è contenuto l'82% degli incendi ma fornisce solo il 6% di probabilità di accadimento dell'incendio. La probabilità incendi per il pericolo massimo è costante in tutti e tre i set di soglie valutati.

Tabella 3.5: tabelle classi per la macroarea Piemonte Nord.

Nord Inverno										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme		giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. non superamento
Tesi	Molto basso	0.30	8.2	1018	30%	10	10	1%	2%	2%
	Basso	0.60	14.1	1018	30%	57	74	7%	12%	14%
	Moderato	0.80	19.7	679	20%	108	131	19%	22%	36%
	Elevato	0.95	28.4	509	15%	142	211	41%	35%	71%
	Molto Elevato	1.00	999.0	170	5%	88	172	101%	29%	100%
Alves	Molto basso	0.30	8.2	1018	30%	10	10	1%	2%	2%
	Basso	0.60	14.1	1018	30%	57	74	7%	12%	14%
	Moderato	0.90	24.2	1018	30%	193	258	25%	43%	57%
	Elevato	0.97	31.6	238	7%	90	143	60%	24%	81%
	Molto Elevato	1.00	999.0	102	3%	55	113	111%	19%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	28	1%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	1401	41%	18	22	2%	4%	4%
	Moderato	NA	NA	1702	50%	276	366	22%	61%	65%
	Elevato	NA	NA	254	7%	107	202	80%	34%	99%
	Molto Elevato	NA	NA	9	0%	4	8	89%	1%	100%
Nord Estate										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme		giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. Non superamento
Tesi	Molto basso	0.30	16.9	625	30%	3	3	0%	3%	3%
	Basso	0.55	20.9	521	25%	14	15	3%	14%	17%
	Moderato	0.70	23.0	313	15%	13	16	5%	15%	33%
	Elevato	0.97	30.1	563	27%	47	52	9%	50%	83%
	Molto Elevato	1.00	999.0	63	3%	13	18	29%	17%	100%
Alves	Molto basso	0.30	16.9	625	30%	3	3	0%	3%	3%
	Basso	0.60	21.5	625	30%	20	23	4%	22%	25%
	Moderato	0.90	26.9	626	30%	39	40	6%	38%	63%
	Elevato	0.97	30.1	146	7%	15	20	14%	19%	83%
	Molto Elevato	1.00	999.0	63	3%	13	18	29%	17%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	0	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	634	30%	6	6	1%	6%	6%
	Moderato	NA	NA	1361	65%	73	85	6%	82%	88%
	Elevato	NA	NA	83	4%	9	11	13%	11%	98%
	Molto Elevato	NA	NA	7	0%	2	2	29%	2%	100%

3.2.3. Torino Ovest

In Tabella 3.6 viene esaminata la zona climatica Torino Ovest, la seconda macroarea più interessata da incendi boschivi: in totale 695, di cui 79% estivi e 21% invernali. Le percentuali della probabilità incendi/giorno ottenute dalle soglie ARPA sono le migliori in inverno e ancora di più in estate, nonostante i numeri esigui di giorni classificati nelle fasce di pericolo estreme. Interessante notare che, mentre questa tendenza regionale viene mantenuta per il pericolo Molto Elevato, le soglie ottenute impiegando i percentili di Alves classificano meno giorni col pericolo Elevato rispetto ad ARPA, ma mantengono una probabilità di predizione incendi/giorno migliore (53%).

Tabella 3.6: tabelle classi per la macroarea Torino Ovest.

Torino Ovest Inverno										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme		giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. non superamento
Tesi	Molto basso	0.40	13.9	1357	40%	32	36	3%	7%	7%
	Basso	0.60	18.6	679	20%	67	86	13%	16%	22%
	Moderato	0.80	24.7	679	20%	93	121	18%	22%	45%
	Elevato	0.90	29.6	339	10%	73	98	29%	18%	62%
	Molto Elevato	1.00	999.0	340	10%	135	205	60%	38%	100%
Alves	Molto basso	0.30	11.7	1018	30%	15	16	2%	3%	3%
	Basso	0.60	18.6	1018	30%	84	106	10%	19%	22%
	Moderato	0.90	29.6	1018	30%	166	219	22%	40%	62%
	Elevato	0.97	36.5	238	7%	83	125	53%	23%	85%
	Molto Elevato	1.00	999.0	102	3%	52	80	78%	15%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	6	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	871	26%	10	10	1%	2%	2%
	Moderato	NA	NA	1895	56%	193	249	13%	46%	47%
	Elevato	NA	NA	605	18%	189	269	44%	49%	97%
	Molto Elevato	NA	NA	17	1%	8	18	106%	3%	100%
Torino Ovest Estate										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme		giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. Non superamento
Tesi	Molto basso	0.30	21.0	625	30%	10	11	2%	7%	7%
	Basso	0.60	25.7	625	30%	20	24	4%	16%	23%
	Moderato	0.80	29.6	417	20%	30	37	9%	25%	48%
	Elevato	0.95	34.1	313	15%	40	48	15%	32%	81%
	Molto Elevato	1.00	999.0	105	5%	19	29	28%	19%	100%
Alves	Molto basso	0.30	21.0	625	30%	10	11	2%	7%	7%
	Basso	0.60	25.7	625	30%	20	24	4%	16%	23%
	Moderato	0.90	32.2	626	30%	54	64	10%	43%	66%
	Elevato	0.97	35.4	146	7%	26	34	23%	23%	89%
	Molto Elevato	1.00	999.0	63	3%	9	16	25%	11%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	0	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	284	14%	1	1	0%	1%	1%
	Moderato	NA	NA	1512	73%	82	98	6%	66%	66%
	Elevato	NA	NA	277	13%	32	40	14%	27%	93%
	Molto Elevato	NA	NA	12	1%	4	10	83%	7%	100%

3.2.4. Torino Nord

Pur presentando un numero complessivo di incendi inferiore (341), la zona di Torino Nord è quella con il maggior sbilanciamento stagionale: 93% invernali, solo 25 (il 7%) estivi. Nonostante il rischio estivo sia basso, non ci sono casi di giorni classificati con pericolo minimo secondo le soglie ARPA, come si osserva dalla Tabella 3.7.

In inverno, sono le soglie ARPA ad ottenere la probabilità di incendi maggiore per la classe ad allerta massima, superando l'unità grazie ad un numero di incendi maggiore del numero di giorni di pericolo Molto Elevato. I risultati dei set ottenuti dai percentili invece quasi si equivalgono. In estate, il ridotto numero di giorni con incendi favorisce l'adozione delle soglie ARPA che sono più precise e meno frequenti nel tempo.

Tabella 3.7: tabelle classi per la macroarea Torino Nord.

Torino Nord Inverno										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme		giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. non superamento
Tesi	Molto basso	0.30	11.9	1018	30%	7	9	1%	3%	3%
	Basso	0.70	21.7	1357	40%	50	56	4%	18%	21%
	Moderato	0.90	29.9	679	20%	79	99	15%	31%	52%
	Elevato	0.97	38.1	238	7%	56	74	31%	23%	75%
	Molto Elevato	1.00	999.0	102	3%	48	78	76%	25%	100%
Alves	Molto basso	0.30	11.9	1018	30%	7	9	1%	3%	3%
	Basso	0.60	18.5	1018	30%	33	38	4%	12%	15%
	Moderato	0.90	29.9	1018	30%	96	117	11%	37%	52%
	Elevato	0.97	38.1	238	7%	56	74	31%	23%	75%
	Molto Elevato	1.00	999.0	102	3%	48	78	76%	25%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	12	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	840	25%	4	6	1%	2%	2%
	Moderato	NA	NA	1853	55%	91	104	6%	33%	35%
	Elevato	NA	NA	656	19%	128	166	25%	53%	87%
	Molto Elevato	NA	NA	33	1%	17	40	121%	13%	100%
Torino Nord Estate										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme		giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. Non superamento
Tesi	Molto basso	0.30	20.8	625	30%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	0.55	24.7	521	25%	1	1	0%	4%	4%
	Moderato	0.80	29.3	521	25%	8	8	2%	32%	36%
	Elevato	0.95	34.3	313	15%	8	8	3%	32%	68%
	Molto Elevato	1.00	999.0	105	5%	7	8	8%	32%	100%
Alves	Molto basso	0.30	20.8	625	30%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	0.60	25.5	625	30%	2	2	0%	8%	8%
	Moderato	0.90	31.8	626	30%	11	11	2%	44%	52%
	Elevato	0.97	36.0	146	7%	5	5	3%	20%	72%
	Molto Elevato	1.00	999.0	63	3%	6	7	11%	28%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	0	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	319	15%	0	0	0%	0%	0%
	Moderato	NA	NA	1504	72%	12	12	1%	48%	48%
	Elevato	NA	NA	244	12%	9	10	4%	40%	88%
	Molto Elevato	NA	NA	18	1%	3	3	17%	12%	100%

3.2.5. Cuneo Sud-Ovest

Spostandoci nella provincia di Cuneo, osserviamo i risultati per la zona climatica Cuneo Sud-Ovest (Tabella 3.8). Si tratta della macroarea dove è stato registrato il minor numero di incendi in assoluto, solamente 167 nei 15 anni di riferimento, e la maggioranza sempre nei mesi invernali; nella stagione estiva sono solo 12 (il 7%). Un tale numero esiguo di incendi estivi non consente un'analisi significativa delle classificazioni ottenute: le soglie ARPA non si rivelano adeguate ad intercettare nemmeno un singolo incendio nella classe di allerta massima. Il miglior risultato è restituito dalle soglie ottenute dai percentili proposti nel lavoro di tesi, che però assegnano tale livello di allerta a un numero di giorni pari al 5% del totale.

Analizzando i risultati invernali, emerge un comportamento coerente con la tendenza regionale; le soglie ARPA sono caratterizzate da alta probabilità di incendi giornalieri per l'allerta massima, ma concentrano la maggior parte dei giorni e degli incendi nella classe di pericolo Moderato. Le soglie ottenute da percentili fissi classificano più giorni ed incendi nel pericolo Elevato, diminuendo in questo modo la probabilità di incendio giornaliera.

Tabella 3.8: tabelle classi per la macroarea Cuneo Sud-Ovest.

Cuneo SO Inverno										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme	giorni con incendi	incendi	probabilità incerti/giorno	percentuale Incendi	perc. non superamento	
Tesi	Molto basso	0.40	12.0	1357	40%	5	5	0%	3%	3%
	Basso	0.70	18.3	1018	30%	22	23	2%	15%	18%
	Moderato	0.85	22.4	509	15%	39	44	9%	28%	46%
	Elevato	0.95	27.7	340	10%	38	43	13%	28%	74%
	Molto Elevato	1.00	999.0	170	5%	31	40	24%	26%	100%
Alves	Molto basso	0.30	10.2	1018	30%	2	2	0%	1%	1%
	Basso	0.60	15.7	1018	30%	19	20	2%	13%	14%
	Moderato	0.90	24.3	1018	30%	65	71	7%	46%	60%
	Elevato	0.97	30.2	238	7%	30	34	14%	22%	82%
	Molto Elevato	1.00	999.0	102	3%	19	28	27%	18%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	9	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	1077	32%	5	5	0%	3%	3%
	Moderato	NA	NA	1956	58%	76	84	4%	54%	57%
	Elevato	NA	NA	348	10%	51	63	18%	41%	98%
	Molto Elevato	NA	NA	4	0%	3	3	75%	2%	100%
Cuneo SO Estate										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme	giorni con incendi	incendi	probabilità incerti/giorno	percentuale Incendi	perc. Non superamento	
Tesi	Molto basso	0.40	20.0	833	40%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	0.75	25.2	730	35%	2	2	0%	17%	17%
	Moderato	0.85	27.3	209	10%	3	3	1%	25%	42%
	Elevato	0.95	31.0	208	10%	3	3	1%	25%	67%
	Molto Elevato	1.00	999.0	105	5%	4	4	4%	33%	100%
Alves	Molto basso	0.30	18.4	625	30%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	0.60	22.8	625	30%	2	2	0%	17%	17%
	Moderato	0.90	28.8	626	30%	3	3	0%	25%	42%
	Elevato	0.97	32.4	146	7%	5	5	3%	42%	83%
	Molto Elevato	1.00	999.0	63	3%	2	2	3%	17%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	0	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	471	23%	0	0	0%	0%	0%
	Moderato	NA	NA	1493	72%	9	9	1%	75%	75%
	Elevato	NA	NA	121	6%	3	3	2%	25%	100%
	Molto Elevato	NA	NA	0	0%	0	0	0%	0%	100%

3.2.6. Cuneo Sud-Est

Nonostante la macroarea Cuneo Sud-Est abbia un numero di incendi paragonabile a quelli verificatisi nella Torino Nord, e con simile distribuzione stagionale, l'area bruciata complessiva è inferiore di circa un ordine di grandezza. La superficie bruciata dall'incendio medio è infatti la più esigua in assoluto, pari a 1.7 ha per incendio.

Osservando la probabilità giornaliera di incendi invernali riportata in Tabella 3.9, si vede come tutte e tre le proposte di soglie presentino valori simili per il pericolo Elevato e Molto Elevato, pur mantenendo una divisione degli incendi tra le classi in linea con la tendenza regionale. In estate le soglie ottenute dai percentili restituiscono addirittura valori migliori della probabilità incendi/giorno nella classe di pericolo Molto Elevato.

Tabella 3.9: tabelle classi per la macroarea Cuneo Sud-Est.

Cuneo SE Inverno										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme		giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. non superamento
Tesi	Molto basso	0.25	10.2	848	25%	2	2	0%	1%	1%
	Basso	0.60	17.4	1188	35%	31	39	3%	13%	14%
	Moderato	0.85	25.3	848	25%	90	104	12%	34%	48%
	Elevato	0.95	32.9	340	10%	71	87	26%	29%	77%
	Molto Elevato	1.00	999.0	170	5%	47	70	41%	23%	100%
Alves	Molto basso	0.30	11.1	1018	30%	3	3	0%	1%	1%
	Basso	0.60	17.4	1018	30%	30	38	4%	13%	14%
	Moderato	0.90	28.2	1018	30%	120	139	14%	46%	60%
	Elevato	0.97	36.5	238	7%	56	74	31%	25%	84%
	Molto Elevato	1.00	999.0	102	3%	32	48	47%	16%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	0	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	932	27%	2	2	0%	1%	1%
	Moderato	NA	NA	1852	55%	118	138	7%	46%	46%
	Elevato	NA	NA	585	17%	113	150	26%	50%	96%
	Molto Elevato	NA	NA	25	1%	8	12	48%	4%	100%
Cuneo SE Estate										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme		giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. Non superamento
Tesi	Molto basso	0.25	15.3	521	25%	4	4	1%	5%	5%
	Basso	0.60	20.8	729	35%	9	9	1%	12%	18%
	Moderato	0.85	26.2	522	25%	22	24	5%	33%	51%
	Elevato	0.97	32.1	250	12%	27	28	11%	38%	89%
	Molto Elevato	1.00	999.0	63	3%	5	8	13%	11%	100%
Alves	Molto basso	0.30	16.3	625	30%	5	5	1%	7%	7%
	Basso	0.60	20.8	625	30%	8	8	1%	11%	18%
	Moderato	0.90	28.0	626	30%	34	37	6%	51%	68%
	Elevato	0.97	32.1	146	7%	15	15	10%	21%	89%
	Molto Elevato	1.00	999.0	63	3%	5	8	13%	11%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	0	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	682	33%	6	6	1%	8%	8%
	Moderato	NA	NA	1311	63%	53	57	4%	78%	86%
	Elevato	NA	NA	86	4%	8	10	12%	14%	100%
	Molto Elevato	NA	NA	6	0%	0	0	0%	0%	100%

3.2.7. Piemonte Sud-Est

La zona climatica del Piemonte sud-orientale (riportata in Tabella 3.10) è quella più particolare: maggiori valori medi di FWI, e minor numero incendi e di area bruciata. Nonostante ci siano pochi incendi in generale, le soglie ARPA non hanno mai assegnato a nessun giorno la classe di allerta minima, proprio a causa dei valori elevati di FWI. La maggior peculiarità di questa macroarea è però la sovversione del comportamento stagionale finora valido in tutta la regione: il 60% dei 243 incendi registrati appartiene ai mesi estivi, e solo il 40% a quelli invernali.

Analizzando la probabilità di incendi giornalieri estiva, emerge come le soglie ARPA non riescano a classificare con efficacia gli incendi nell'allerta massima, ottenendo valori inferiori rispetto alle soglie dei percentili. In inverno le soglie di ARPA mantengono ancora una predizione del 26% di incendi/giorno (mentre le soglie tesi, pur meno precise comprendono più della metà degli incendi in tale classe); in estate le soglie ARPA sono ancora meno accurate, predicendo correttamente incendi solo il 2% delle volte, mentre entrambe le soglie da percentili sono corrette nel più del 20% dei casi.

Tabella 3.10: tabelle classi per la macroarea Piemonte SudEst.

SudEst Inverno										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme	giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. non superamento	
Tesi	Molto basso	0.40	9.8	1357	40%	2	2	0%	2%	2%
	Basso	0.70	17.6	1018	30%	13	15	1%	15%	18%
	Moderato	0.80	21.6	340	10%	7	7	2%	7%	25%
	Elevato	0.90	27.0	339	10%	19	21	6%	22%	46%
	Molto Elevato	1.00	999.0	340	10%	43	52	15%	54%	100%
Alves	Molto basso	0.30	8.0	1018	30%	2	2	0%	2%	2%
	Basso	0.60	14.8	1018	30%	8	10	1%	10%	12%
	Moderato	0.90	27.0	1018	30%	31	33	3%	34%	46%
	Elevato	0.97	34.8	238	7%	25	32	13%	33%	79%
	Molto Elevato	1.00	999.0	102	3%	18	20	20%	21%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	10	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	1449	43%	3	3	0%	3%	3%
	Moderato	NA	NA	1594	47%	47	52	3%	54%	57%
	Elevato	NA	NA	318	9%	30	36	11%	37%	94%
	Molto Elevato	NA	NA	23	1%	4	6	26%	6%	100%
SudEst Estate										
	classe	percentili	soglia FWI max	giorni di allarme	giorni con incendi	incendi	probabilità incendi/giorno	percentuale Incendi	perc. Non superamento	
Tesi	Molto basso	0.30	22.9	625	30%	5	5	1%	3%	3%
	Basso	0.50	26.2	417	20%	14	17	4%	12%	15%
	Moderato	0.75	30.7	521	25%	38	43	8%	29%	45%
	Elevato	0.90	35.3	313	15%	35	37	12%	25%	70%
	Molto Elevato	1.00	999.0	209	10%	39	44	21%	30%	100%
Alves	Molto basso	0.30	22.9	625	30%	5	5	1%	3%	3%
	Basso	0.60	27.9	625	30%	26	33	5%	23%	26%
	Moderato	0.90	35.3	626	30%	61	64	10%	44%	70%
	Elevato	0.97	39.9	146	7%	26	30	21%	21%	90%
	Molto Elevato	1.00	999.0	63	3%	13	14	22%	10%	100%
ARPA	Molto basso	NA	NA	0	0%	0	0	0%	0%	0%
	Basso	NA	NA	204	10%	0	0	0%	0%	0%
	Moderato	NA	NA	1367	66%	67	77	6%	53%	53%
	Elevato	NA	NA	486	23%	61	66	14%	45%	98%
	Molto Elevato	NA	NA	28	1%	3	3	11%	2%	100%

3.3 ANALISI ROC

Nel presente capitolo vengono riportati, per ogni macroarea, i valori degli indici statistici ottenuti tramite l'analisi ROC. Sono individuati i metodi che per ogni zona climatica restituiscono i valori maggiori di HR, TSS, ed area sotto la curva AUC; l'indice FAR andrebbe invece cercato minore.

3.3.1. Piemonte

Dall'analisi compiuta sull'intero database della regione Piemonte, in Tabella 3.11 sono stati confrontati i valori degli indici statistici per le stesse classi di pericolo, ottenute dai tre set di soglie proposti. Per le classi di allerta elevata o molto elevata, i valori massimi di Hit Ratio e True Skill Statistics sono ottenuti dalle soglie del metodo percentile proposto dalla tesi, come si osserva in Figura 3.7. Guardando invece l'area sottostante le curve AUC, riportate in Figura 3.8, le soglie ottenute dai percentili raggiungono quasi lo stesso valore, con le soglie dei percentili di Tesi leggermente maggiori, mentre il risultato ottenuto dalle soglie ARPA si posiziona a valori più bassi, con una differenza leggermente più marcata nella stagione estiva.

Tabella 3.11: risultati analisi ROC, regione Piemonte.

Piemonte	Inverno	ROC Analysis								
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	1505	18859	0	0	1.00	1.00	0.00	0.266	0.796
	Basso	1480	13794	25	5065	0.98	0.73	0.25	0.248	
	Moderato	1356	8827	149	10032	0.90	0.47	0.43	0.164	
	Elevato	1086	5024	419	13835	0.72	0.27	0.46	0.103	
	Molto Elevato	566	1471	939	17388	0.38	0.08	0.30	0.015	
Alves	Molto basso	1505	18859	0	0	1.00	1.00	0.00	0.318	0.788
	Basso	1465	12790	40	6069	0.97	0.68	0.30	0.281	
	Moderato	1242	6904	263	11955	0.83	0.37	0.46	0.173	
	Elevato	566	1471	939	17388	0.38	0.08	0.30	0.015	
	Molto Elevato	223	388	1282	18471	0.15	0.02	0.13	0.002	
ARPA	Molto basso	1505	18859	0	0	1.00	1.00	0.00	0.003	0.748
	Basso	1505	18794	0	65	1.00	1.00	0.00	0.341	
	Moderato	1463	12266	42	6593	0.97	0.65	0.32	0.376	
	Elevato	662	2215	843	16644	0.44	0.12	0.32	0.027	
	Molto Elevato	44	67	1461	18792	0.03	0.00	0.03	0.000	
Piemonte	Inverno	ROC Analysis								
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	443	12067	0	0	1.00	1.00	0.00	0.203	0.745
	Basso	430	9579	13	2488	0.97	0.79	0.18	0.193	
	Moderato	403	7104	40	4963	0.91	0.59	0.32	0.169	
	Elevato	340	4665	103	7402	0.77	0.39	0.38	0.149	
	Molto Elevato	194	1683	249	10384	0.44	0.14	0.30	0.031	
Alves	Molto basso	443	12067	0	0	1.00	1.00	0.00	0.300	0.742
	Basso	417	8341	26	3726	0.94	0.69	0.25	0.260	
	Moderato	340	4665	103	7402	0.77	0.39	0.38	0.165	
	Elevato	155	1097	288	10970	0.35	0.09	0.26	0.015	
	Molto Elevato	55	321	388	11746	0.12	0.03	0.10	0.002	
ARPA	Molto basso	443	12067	0	0	1.00	1.00	0.00	0.000	0.662
	Basso	443	12067	0	0	1.00	1.00	0.00	0.211	
	Moderato	430	9486	13	2581	0.97	0.79	0.18	0.435	
	Elevato	134	1234	309	10833	0.30	0.10	0.20	0.016	
	Molto Elevato	12	59	431	12008	0.03	0.00	0.02	0.000	

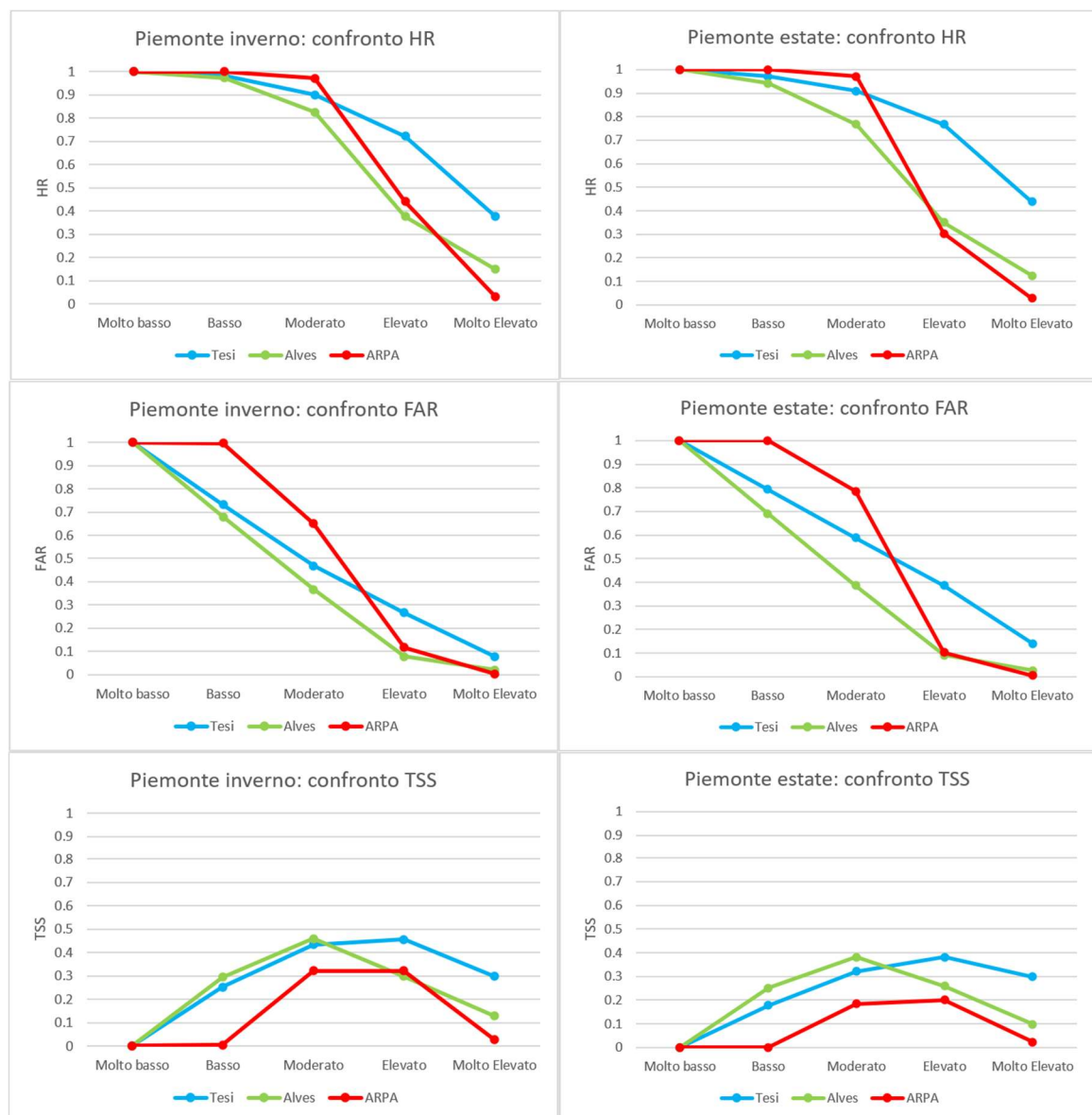


Figura 3.7: confronto indici statistici dell'analisi ROC per le differenti soglie, applicate sulla regione Piemonte.

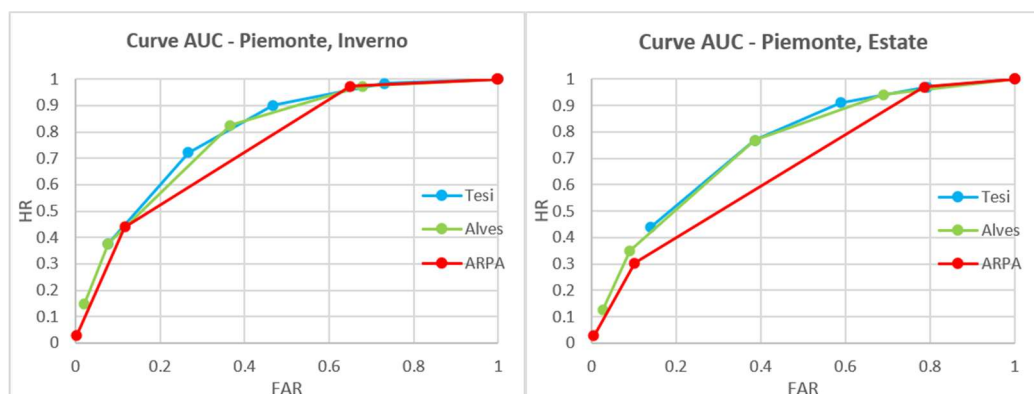


Figura 3.8: curve AUC ottenute dalle soglie applicate sulla regione Piemonte.

3.3.2. Piemonte Nord

Tabella 3.12: risultati analisi ROC, zona Nord.

Nord Inverno		ROC Analysis								
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	405	2989	0	0	1.00	1.00	0.00	0.333	0.809
	Basso	395	1981	10	1008	0.98	0.66	0.31	0.291	
	Moderato	338	1020	67	1969	0.83	0.34	0.49	0.134	
	Elevato	230	449	175	2540	0.57	0.15	0.42	0.048	
	Molto Elevato	88	82	317	2907	0.22	0.03	0.19	0.003	
Alves	Molto basso	405	2989	0	0	1.00	1.00	0.00	0.333	0.802
	Basso	395	1981	10	1008	0.98	0.66	0.31	0.291	
	Moderato	338	1020	67	1969	0.83	0.34	0.49	0.165	
	Elevato	145	195	260	2794	0.36	0.07	0.29	0.012	
	Molto Elevato	55	47	350	2942	0.14	0.02	0.12	0.001	
ARPA	Molto basso	405	2989	0	0	1.00	1.00	0.00	0.009	0.762
	Basso	405	2961	0	28	1.00	0.99	0.01	0.452	
	Moderato	387	1578	18	1411	0.96	0.53	0.43	0.293	
	Elevato	111	152	294	2837	0.27	0.05	0.22	0.007	
	Molto Elevato	4	5	401	2984	0.01	0.00	0.01	0.000	
Nord Inverno		ROC Analysis								
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	90	1995	0	0	1.00	1.00	0.00	0.307	0.750
	Basso	87	1373	3	622	0.97	0.69	0.28	0.226	
	Moderato	73	866	17	1129	0.81	0.43	0.38	0.111	
	Elevato	60	566	30	1429	0.67	0.28	0.38	0.105	
	Molto Elevato	13	50	77	1945	0.14	0.03	0.12	0.002	
Alves	Molto basso	90	1995	0	0	1.00	1.00	0.00	0.307	0.738
	Basso	87	1373	3	622	0.97	0.69	0.28	0.259	
	Moderato	67	768	23	1227	0.74	0.38	0.36	0.155	
	Elevato	28	181	62	1814	0.31	0.09	0.22	0.015	
	Molto Elevato	13	50	77	1945	0.14	0.03	0.12	0.002	
ARPA	Molto basso	90	1995	0	0	1.00	1.00	0.00	0.000	0.648
	Basso	90	1995	0	0	1.00	1.00	0.00	0.304	
	Moderato	84	1367	6	628	0.93	0.69	0.25	0.341	
	Elevato	11	79	79	1916	0.12	0.04	0.08	0.003	
	Molto Elevato	2	5	88	1990	0.02	0.00	0.02	0.000	

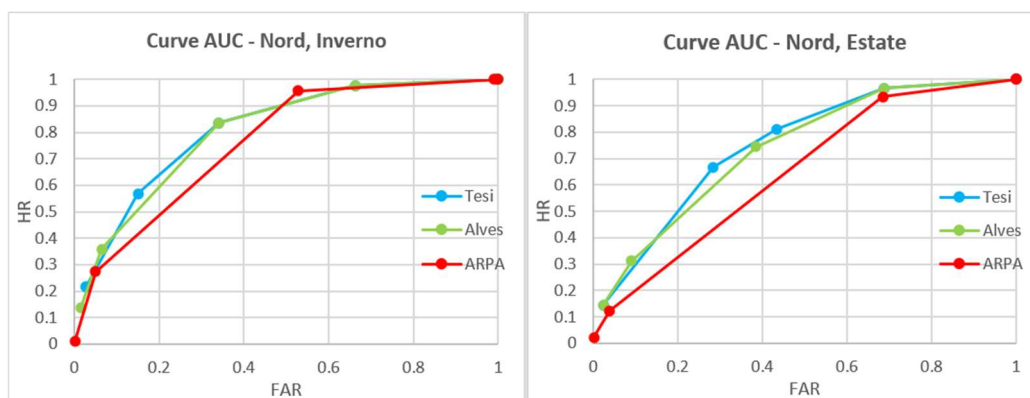


Figura 3.9: curve AUC ottenute dalle soglie applicate sulla zona Nord.

3.3.3. Torino Ovest

Tabella 3.13: risultati analisi ROC, zona Torino Ovest.

Torino Ovest		Inverno		ROC Analysis						
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	400	2994	0	0	1.00	1.00	0.00	0.425	0.770
	Basso	368	1669	32	1325	0.92	0.56	0.36	0.171	
	Moderato	301	1057	99	1937	0.75	0.35	0.40	0.125	
	Elevato	208	471	192	2523	0.52	0.16	0.36	0.038	
	Molto Elevato	135	205	265	2789	0.34	0.07	0.27	0.012	
Alves	Molto basso	400	2994	0	0	1.00	1.00	0.00	0.329	0.765
	Basso	385	1991	15	1003	0.96	0.66	0.30	0.268	
	Moderato	301	1057	99	1937	0.75	0.35	0.40	0.155	
	Elevato	135	205	265	2789	0.34	0.07	0.27	0.012	
	Molto Elevato	52	50	348	2944	0.13	0.02	0.11	0.001	
ARPA	Molto basso	400	2994	0	0	1.00	1.00	0.00	0.002	0.739
	Basso	400	2988	0	6	1.00	1.00	0.00	0.284	
	Moderato	390	2127	10	867	0.98	0.71	0.26	0.417	
	Elevato	197	425	203	2569	0.49	0.14	0.35	0.036	
	Molto Elevato	8	9	392	2985	0.02	0.00	0.02	0.000	
Torino Ovest		Inverno		ROC Analysis						
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	119	1966	0	0	1.00	1.00	0.00	0.300	0.727
	Basso	109	1351	10	615	0.92	0.69	0.23	0.256	
	Moderato	89	746	30	1220	0.75	0.38	0.37	0.122	
	Elevato	59	359	60	1607	0.50	0.18	0.31	0.046	
	Molto Elevato	19	86	100	1880	0.16	0.04	0.12	0.003	
Alves	Molto basso	119	1966	0	0	1.00	1.00	0.00	0.300	0.720
	Basso	109	1351	10	615	0.92	0.69	0.23	0.256	
	Moderato	89	746	30	1220	0.75	0.38	0.37	0.152	
	Elevato	35	174	84	1792	0.29	0.09	0.21	0.011	
	Molto Elevato	9	54	110	1912	0.08	0.03	0.05	0.001	
ARPA	Molto basso	119	1966	0	0	1.00	1.00	0.00	0.000	0.635
	Basso	119	1966	0	0	1.00	1.00	0.00	0.143	
	Moderato	118	1683	1	283	0.99	0.86	0.14	0.471	
	Elevato	36	253	83	1713	0.30	0.13	0.17	0.021	
	Molto Elevato	4	8	115	1958	0.03	0.00	0.03	0.000	

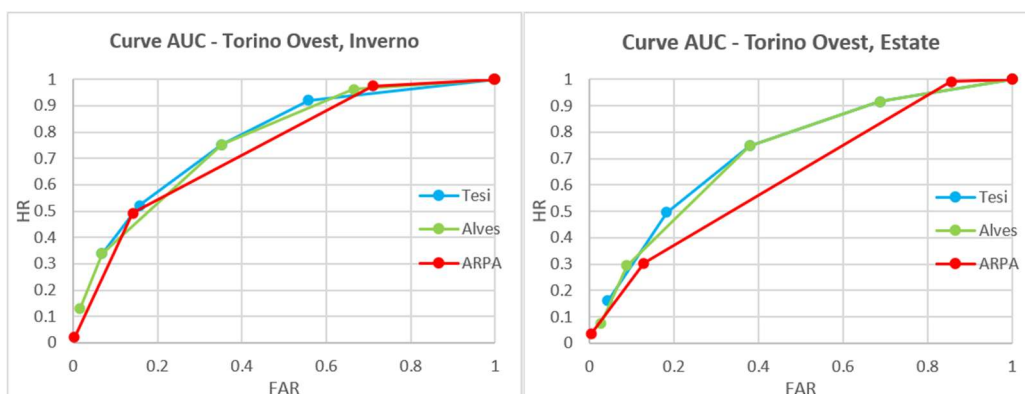


Figura 3.10: curve AUC ottenute dalle soglie applicate sulla zona Torino Ovest.

3.3.4. Torino Nord

Tabella 3.14: risultati analisi ROC, zona Torino Nord.

Torino Nord		Inverno		ROC Analysis						
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	240	3154	0	0	1.00	1.00	0.00	0.316	0.809
	Basso	233	2143	7	1011	0.97	0.68	0.29	0.359	
	Moderato	183	836	57	2318	0.76	0.27	0.50	0.114	
	Elevato	104	236	136	2918	0.43	0.07	0.36	0.018	
	Molto Elevato	48	54	192	3100	0.20	0.02	0.18	0.002	
Alves	Molto basso	240	3154	0	0	1.00	1.00	0.00	0.316	0.803
	Basso	233	2143	7	1011	0.97	0.68	0.29	0.282	
	Moderato	200	1158	40	1996	0.83	0.37	0.47	0.185	
	Elevato	104	236	136	2918	0.43	0.07	0.36	0.018	
	Molto Elevato	48	54	192	3100	0.20	0.02	0.18	0.002	
ARPA	Molto basso	240	3154	0	0	1.00	1.00	0.00	0.004	0.767
	Basso	240	3142	0	12	1.00	1.00	0.00	0.263	
	Moderato	236	2306	4	848	0.98	0.73	0.25	0.443	
	Elevato	145	544	95	2610	0.60	0.17	0.43	0.056	
	Molto Elevato	17	16	223	3138	0.07	0.01	0.07	0.000	
Torino Nord		Inverno		ROC Analysis						
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	24	2061	0	0	1.00	1.00	0.00	0.303	0.822
	Basso	24	1436	0	625	1.00	0.70	0.30	0.247	
	Moderato	23	916	1	1145	0.96	0.44	0.51	0.197	
	Elevato	15	403	9	1658	0.63	0.20	0.43	0.068	
	Molto Elevato	7	98	17	1963	0.29	0.05	0.24	0.007	
Alves	Molto basso	24	2061	0	0	1.00	1.00	0.00	0.303	0.826
	Basso	24	1436	0	625	1.00	0.70	0.30	0.290	
	Moderato	22	813	2	1248	0.92	0.39	0.52	0.205	
	Elevato	11	198	13	1863	0.46	0.10	0.36	0.024	
	Molto Elevato	6	57	18	2004	0.25	0.03	0.22	0.003	
ARPA	Molto basso	24	2061	0	0	1.00	1.00	0.00	0.000	0.734
	Basso	24	2061	0	0	1.00	1.00	0.00	0.155	
	Moderato	24	1742	0	319	1.00	0.85	0.15	0.543	
	Elevato	12	250	12	1811	0.50	0.12	0.38	0.036	
	Molto Elevato	3	15	21	2046	0.13	0.01	0.12	0.000	

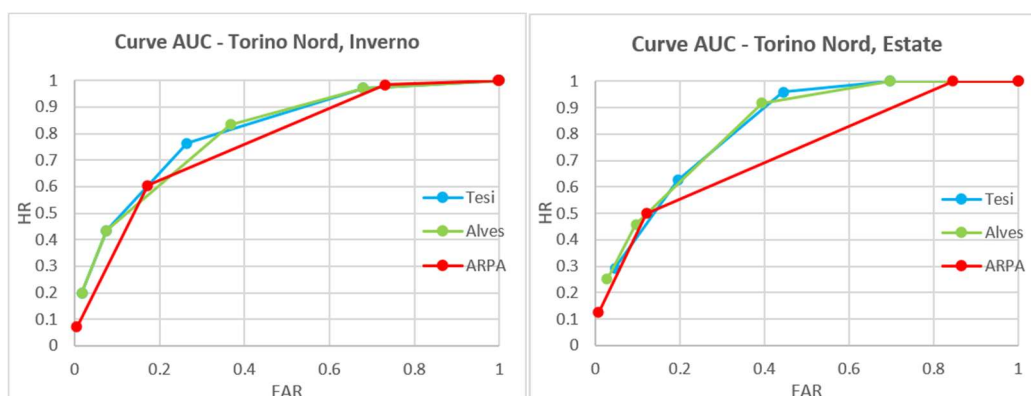


Figura 3.11: curve AUC ottenute dalle soglie applicate sulla zona Torino Nord.

3.3.5. Cuneo Sud-Ovest

Tabella 3.15: risultati analisi ROC, zona Cuneo SO.

Cuneo SO	Inverno	ROC Analysis								
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	135	3259	0	0	1.00	1.00	0.00	0.407	0.810
	Basso	130	1907	5	1352	0.96	0.59	0.38	0.269	
	Moderato	108	911	27	2348	0.80	0.28	0.52	0.095	
	Elevato	69	441	66	2818	0.51	0.14	0.38	0.034	
	Molto Elevato	31	139	104	3120	0.23	0.04	0.19	0.005	
Alves	Molto basso	135	3259	0	0	1.00	1.00	0.00	0.309	0.784
	Basso	133	2243	2	1016	0.99	0.69	0.30	0.280	
	Moderato	114	1244	21	2015	0.84	0.38	0.46	0.177	
	Elevato	49	291	86	2968	0.36	0.09	0.27	0.016	
	Molto Elevato	19	83	116	3176	0.14	0.03	0.12	0.002	
ARPA	Molto basso	135	3259	0	0	1.00	1.00	0.00	0.003	0.738
	Basso	135	3250	0	9	1.00	1.00	0.00	0.323	
	Moderato	130	2178	5	1081	0.96	0.67	0.29	0.393	
	Elevato	54	298	81	2961	0.40	0.09	0.31	0.019	
	Molto Elevato	3	1	132	3258	0.02	0.00	0.02	0.000	
Cuneo SO	Inverno	ROC Analysis								
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	12	2073	0	0	1.00	1.00	0.00	0.402	0.848
	Basso	12	1240	0	833	1.00	0.60	0.40	0.322	
	Moderato	10	512	2	1561	0.83	0.25	0.59	0.070	
	Elevato	7	306	5	1767	0.58	0.15	0.44	0.045	
	Molto Elevato	4	101	8	1972	0.33	0.05	0.28	0.008	
Alves	Molto basso	12	2073	0	0	1.00	1.00	0.00	0.301	0.818
	Basso	12	1448	0	625	1.00	0.70	0.30	0.275	
	Moderato	10	825	2	1248	0.83	0.40	0.44	0.213	
	Elevato	7	202	5	1871	0.58	0.10	0.49	0.026	
	Molto Elevato	2	61	10	2012	0.17	0.03	0.14	0.002	
ARPA	Molto basso	12	2073	0	0	1.00	1.00	0.00	0.000	0.682
	Basso	12	2073	0	0	1.00	1.00	0.00	0.227	
	Moderato	12	1602	0	471	1.00	0.77	0.23	0.447	
	Elevato	3	118	9	1955	0.25	0.06	0.19	0.007	
	Molto Elevato	0	0	12	2073	0.00	0.00	0.00	0.000	

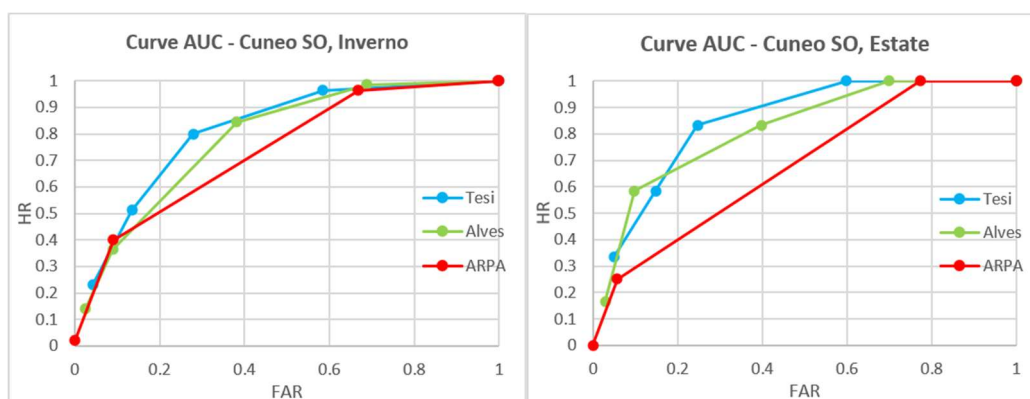


Figura 3.12: curve AUC ottenute dalle soglie applicate sulla zona Cuneo SudOvest.

3.3.6. Cuneo Sud-Est

Tabella 3.16: risultati analisi ROC, zona Cuneo SE.

Cuneo SE	Inverno	ROC Analysis								
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	241	3153	0	0	1.00	1.00	0.00	0.267	0.803
	Basso	239	2307	2	846	0.99	0.73	0.26	0.340	
	Moderato	208	1150	33	2003	0.86	0.36	0.50	0.163	
	Elevato	118	392	123	2761	0.49	0.12	0.37	0.029	
	Molto Elevato	47	123	194	3030	0.20	0.04	0.16	0.004	
Alves	Molto basso	241	3153	0	0	1.00	1.00	0.00	0.320	0.801
	Basso	238	2138	3	1015	0.99	0.68	0.31	0.290	
	Moderato	208	1150	33	2003	0.86	0.36	0.50	0.175	
	Elevato	88	252	153	2901	0.37	0.08	0.29	0.014	
	Molto Elevato	32	70	209	3083	0.13	0.02	0.11	0.001	
ARPA	Molto basso	241	3153	0	0	1.00	1.00	0.00	0.000	0.745
	Basso	241	3153	0	0	1.00	1.00	0.00	0.294	
	Moderato	239	2223	2	930	0.99	0.71	0.29	0.411	
	Elevato	121	489	120	2664	0.50	0.16	0.35	0.040	
	Molto Elevato	8	17	233	3136	0.03	0.01	0.03	0.000	
Cuneo SE	Inverno	ROC Analysis								
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	67	2018	0	0	1.00	1.00	0.00	0.249	0.751
	Basso	63	1501	4	517	0.94	0.74	0.20	0.312	
	Moderato	54	781	13	1237	0.81	0.39	0.42	0.159	
	Elevato	32	281	35	1737	0.48	0.14	0.34	0.031	
	Molto Elevato	5	58	62	1960	0.07	0.03	0.05	0.001	
Alves	Molto basso	67	2018	0	0	1.00	1.00	0.00	0.296	0.736
	Basso	62	1398	5	620	0.93	0.69	0.23	0.265	
	Moderato	54	781	13	1237	0.81	0.39	0.42	0.162	
	Elevato	20	189	47	1829	0.30	0.09	0.20	0.012	
	Molto Elevato	5	58	62	1960	0.07	0.03	0.05	0.001	
ARPA	Molto basso	67	2018	0	0	1.00	1.00	0.00	0.000	0.643
	Basso	67	2018	0	0	1.00	1.00	0.00	0.320	
	Moderato	61	1342	6	676	0.91	0.67	0.25	0.321	
	Elevato	8	84	59	1934	0.12	0.04	0.08	0.002	
	Molto Elevato	0	6	67	2012	0.00	0.00	0.00	0.000	

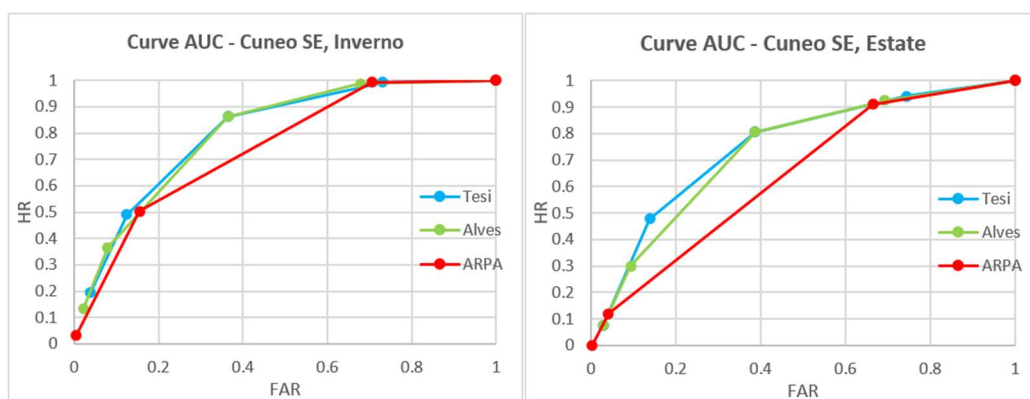


Figura 3.13: curve AUC ottenute dalle soglie applicate sulla zona Cuneo SudEst.

3.3.7. Piemonte Sud-Est

Tabella 3.17: risultati analisi ROC, zona SudEst.

SudEst	Inverno	ROC Analysis								
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	84	3310	0	0	1.00	1.00	0.00	0.404	0.839
	Basso	82	1955	2	1355	0.98	0.59	0.39	0.273	
	Moderato	69	950	15	2360	0.82	0.29	0.53	0.078	
	Elevato	62	617	22	2693	0.74	0.19	0.55	0.060	
	Molto Elevato	43	297	41	3013	0.51	0.09	0.42	0.023	
Alves	Molto basso	84	3310	0	0	1.00	1.00	0.00	0.303	0.820
	Basso	82	2294	2	1016	0.98	0.69	0.28	0.283	
	Moderato	74	1284	10	2026	0.88	0.39	0.49	0.208	
	Elevato	43	297	41	3013	0.51	0.09	0.42	0.023	
	Molto Elevato	18	84	66	3226	0.21	0.03	0.19	0.003	
ARPA	Molto basso	84	3310	0	0	1.00	1.00	0.00	0.003	0.772
	Basso	84	3300	0	10	1.00	1.00	0.00	0.429	
	Moderato	81	1854	3	1456	0.96	0.56	0.40	0.320	
	Elevato	34	307	50	3003	0.40	0.09	0.31	0.020	
	Molto Elevato	4	19	80	3291	0.05	0.01	0.04	0.000	
SudEst	Inverno	ROC Analysis								
	classe	CA	FA	MA	CN	HR	FAR	TSS	area	Area AUC tot
Tesi	Molto basso	131	1954	0	0	1.00	1.00	0.00	0.311	0.748
	Basso	126	1334	5	620	0.96	0.68	0.28	0.187	
	Moderato	112	931	19	1023	0.85	0.48	0.38	0.175	
	Elevato	74	448	57	1506	0.56	0.23	0.34	0.061	
	Molto Elevato	39	170	92	1784	0.30	0.09	0.21	0.013	
Alves	Molto basso	131	1954	0	0	1.00	1.00	0.00	0.311	0.743
	Basso	126	1334	5	620	0.96	0.68	0.28	0.264	
	Moderato	100	735	31	1219	0.76	0.38	0.39	0.153	
	Elevato	39	170	92	1784	0.30	0.09	0.21	0.012	
	Molto Elevato	13	50	118	1904	0.10	0.03	0.07	0.001	
ARPA	Molto basso	131	1954	0	0	1.00	1.00	0.00	0.000	0.655
	Basso	131	1954	0	0	1.00	1.00	0.00	0.104	
	Moderato	131	1750	0	204	1.00	0.90	0.10	0.495	
	Elevato	64	450	67	1504	0.49	0.23	0.26	0.056	
	Molto Elevato	3	25	128	1929	0.02	0.01	0.01	0.000	

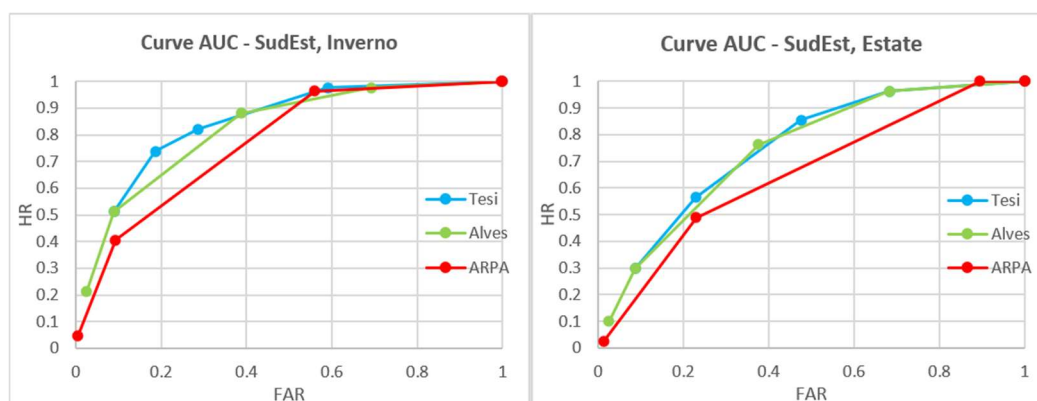


Figura 3.14: curve AUC ottenute dalle soglie applicate sulla zona SudEst.

3.3.8. Considerazioni generali

Concentrandosi sui valori di TSS ottenuti nelle diverse macroaree e stagioni, il comportamento generale dei tre set di soglie può essere così descritto: le soglie dai due metodi percentili restituiscono risultati molto simili per le classi di pericolo da Molto Basso a Moderato, mentre divergono per le classi ad allerta più alta, con i percentili della Tesi che mantengono valori maggiori. Le soglie ARPA invece restituiscono valori prossimi a zero per il pericolo Molto Basso e Basso, salgono nelle classi Moderato ed Elevato ma a valori comunque inferiori rispetto alle altre soglie; infine calano nuovamente per l'allerta massima.

Le deviazioni dal comportamento descritto sulla scala regionale sono le seguenti: in alcune zone, le soglie ARPA tendono ad assumere valore massimo di TSS per il pericolo Elevato, talvolta raggiungendo o anche superando i valori ottenuti dalle altre soglie (stagione invernale in Torino Ovest, Torino Nord, Cuneo SO, Cuneo SE; estate Sudest). Tuttavia, nel pericolo molto elevato il TSS crolla sempre a valori molto bassi. Sempre per il pericolo Elevato, l'unico caso in cui i percentili di Alves restituiscono un TSS maggiore di quello dei percentili di Tesi è nel caso di Cuneo SO estivo. I grafici di tali andamenti sono riportati in Figura 3.15.

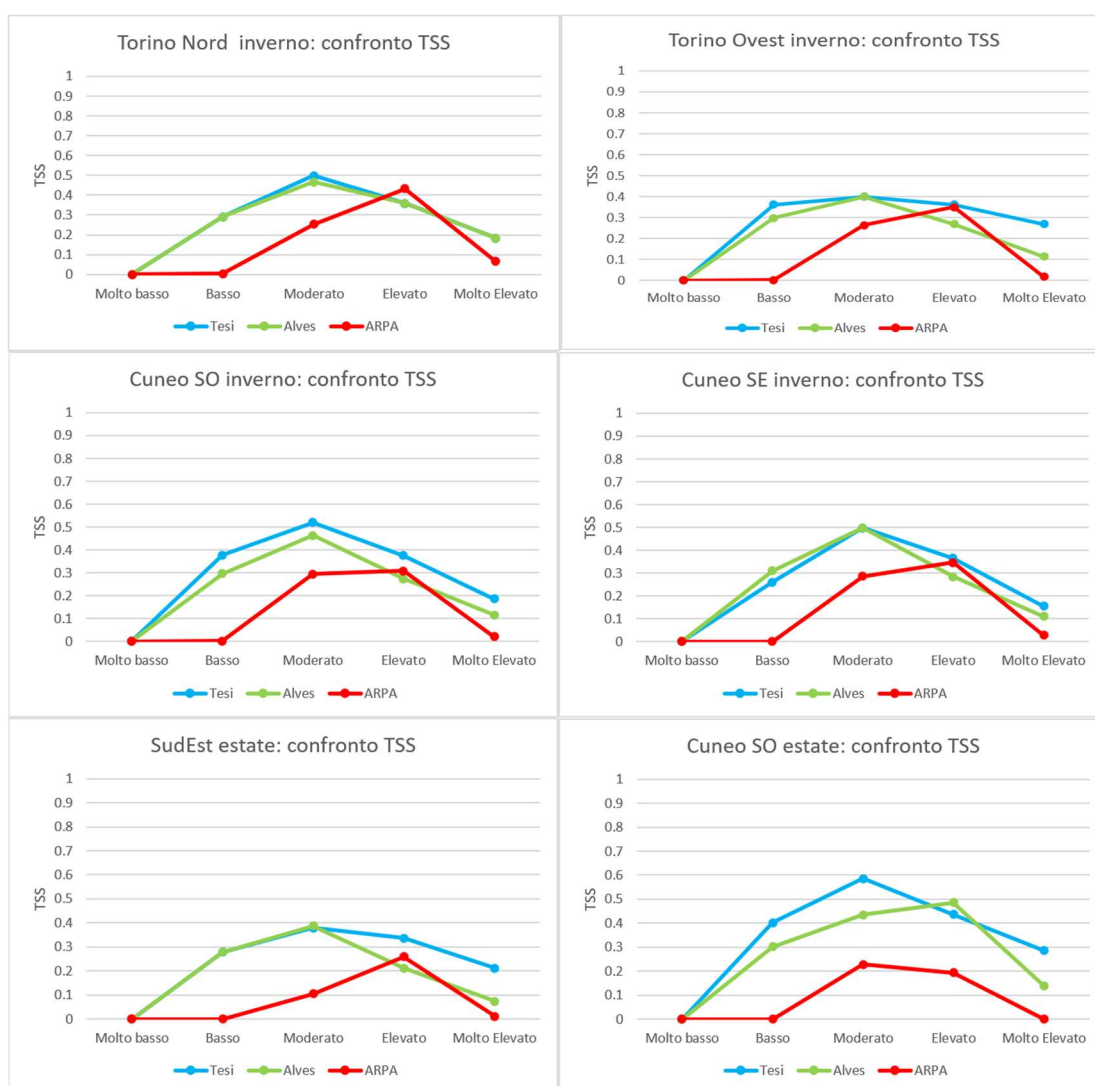


Figura 3.15: confronto TSS per le macroaree con comportamento differente da quello regionale.

3.4 CONFRONTO DELLE DISTRIBUZIONI DELL'AREA BRUCIATA

Si utilizzano le rappresentazioni box-plot per cercare di individuare come siano distribuite le dimensioni degli incendi all'interno delle cinque classi di pericolo. Ogni punto rappresenta un giorno in cui si è verificato almeno un incendio, e la superficie bruciata complessiva di quel giorno è riportata dall'asse delle ordinate, in scala logaritmica. È stato riportato nel titolo dei grafici il numero di giorni costituenti il campione totale, insieme alla componente di ogni classe di pericolo al di sopra di ogni nuvola di punti. Da un buon sistema di allertamento ci si aspetta che la rappresentazione box-plot presenti distribuzioni che progressivamente si alzano verso valori di area bruciata maggiori man mano che la classe di allarme si fa più severa.

3.4.1. Regione Piemonte

Una prima considerazione che si effettua osservando i risultati sull'intero territorio piemontese (Figura 3.16) è che, come già era emerso nell'analisi precedente, il sistema di monitoraggio attualmente impiegato da Arpa concentra oltre la metà del campione nella classe di pericolo Moderato, lasciando pochissimi giorni nelle classi di pericolo Molto Basso e Molto Elevato. Il comportamento desiderato di progressivo aumento dell'area bruciata media si osserva nelle classi di pericolo Moderato, Elevato e Molto Elevato, mentre invece per le classi Molto Basso e Basso il minor numero di incendi "anomali" (perché avvenuti in concomitanza con minori valori di FWI) contribuisce ad innalzare media e mediana sopra quelle del pericolo Moderato.

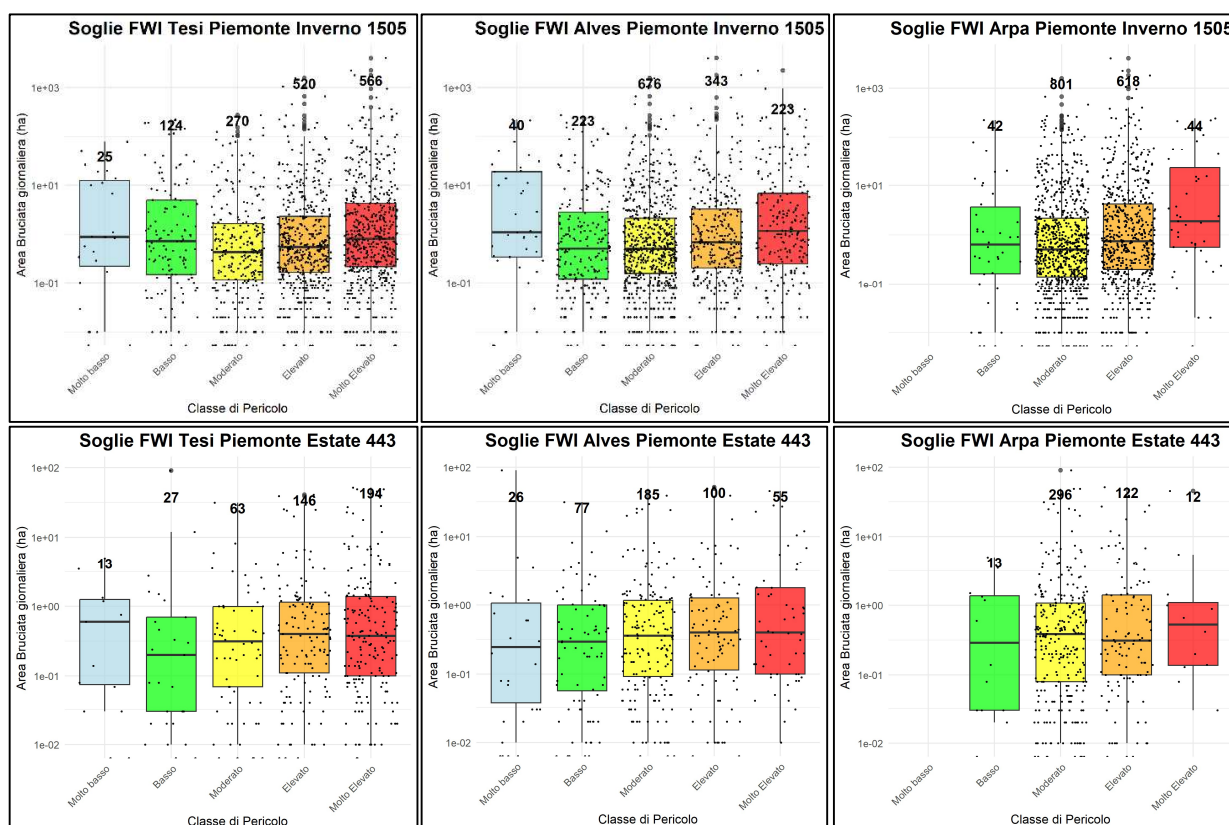


Figura 3.16: rappresentazione box-plot dell'area bruciata per le classi di pericolo della regione Piemonte.

3.4.2. Singole macroaree

Osservando i grafici in Figura 3.17 per la zona Nord, le distribuzioni invernali ottenute dai percentili si avvicinano molto alla progressione di BA auspicata. Questo vale anche per le soglie ARPA, che contengono solamente 4 incendi nella classe di pericolo Molto Elevato, ma tutti dalla notevole estensione.

In inverno, le soglie derivate dai percentuali sono meno efficaci, lasciano un maggior numero di grandi incendi nelle classi di pericolo Molto Basso e Basso. Le soglie ARPA concentrano la maggior parte degli incendi nella classe centrale, ma falliscono ad assegnare i grandi incendi nel pericolo Elevato. In estate, la crescita dell'area bruciata con la classe di pericolo è meno pronunciata. Le soglie ARPA individuano troppi pochi incendi al pericolo massimo per essere significative.

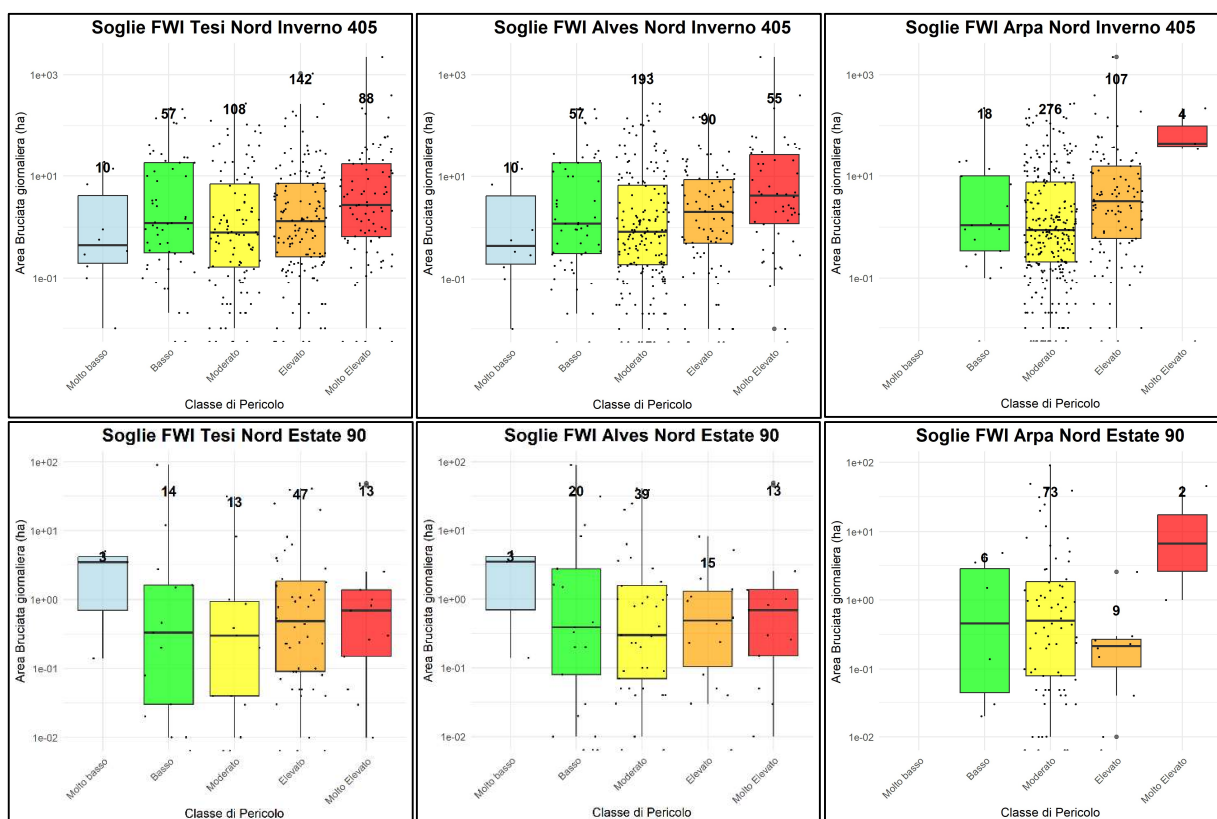


Figura 3.17: rappresentazione box-plot dell'area bruciata per le classi di pericolo della zona Nord

Mentre la zona Torino Ovest rispetta le aspettative in entrambe le stagioni (Figura 3.18), la vicina zona Torino Nord (Figura 3.19) assume lo stesso comportamento regionale per i mesi invernali, ma in estate la progressione si inverte, con incendi nelle classi di pericolo maggiori che presentano superfici minori, ma tale varianza è spiegata dal ridottissimo numero di incendi che costituisce il campione estivo.

Nelle macroaree appartenenti alla provincia di Cuneo (Figura 3.20 e Figura 3.21), le distribuzioni mostrano risultati altalenanti tra le diverse classi di pericolo per tutti i set di soglie impiegati. Questo comportamento è dovuto al ridotto numero di incendi (soprattutto nella stagione estiva) che aumenta la varianza.

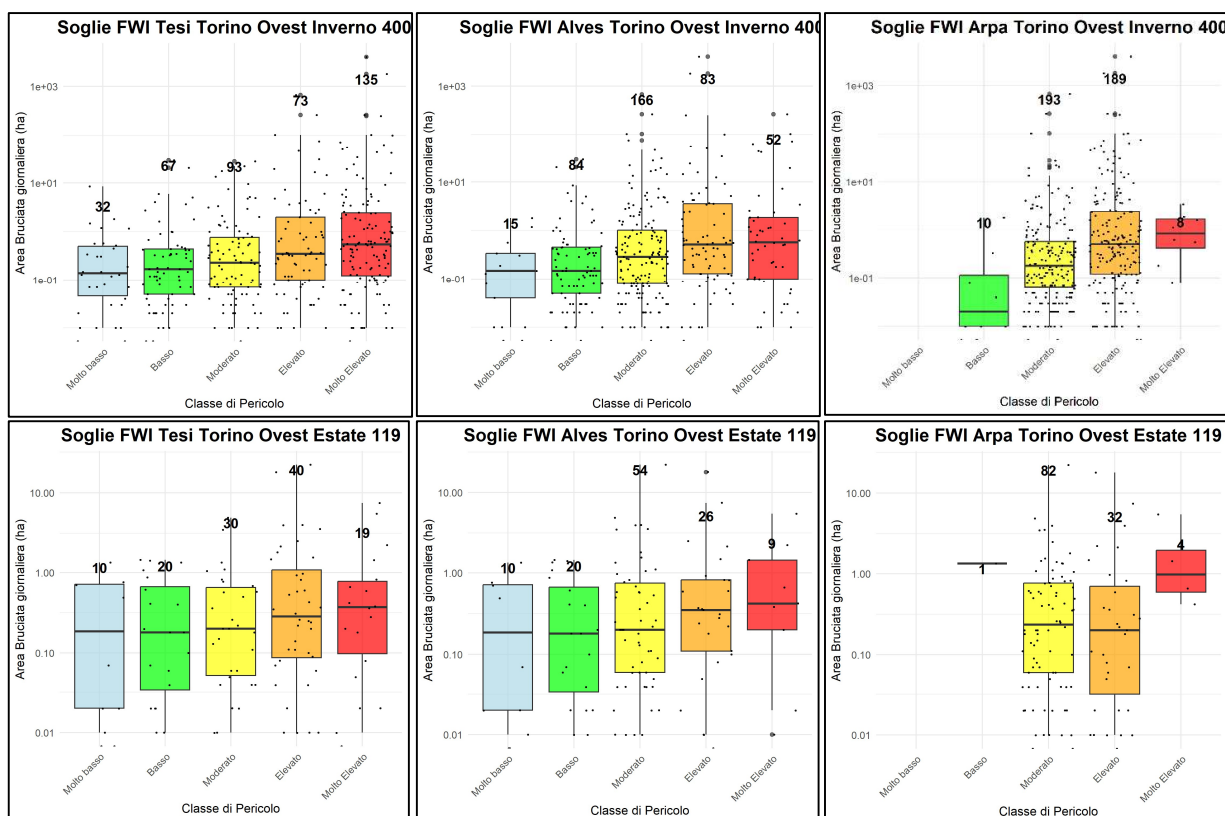


Figura 3.18: rappresentazione box-plot dell'area bruciata per le classi di pericolo della zona Torino Ovest.

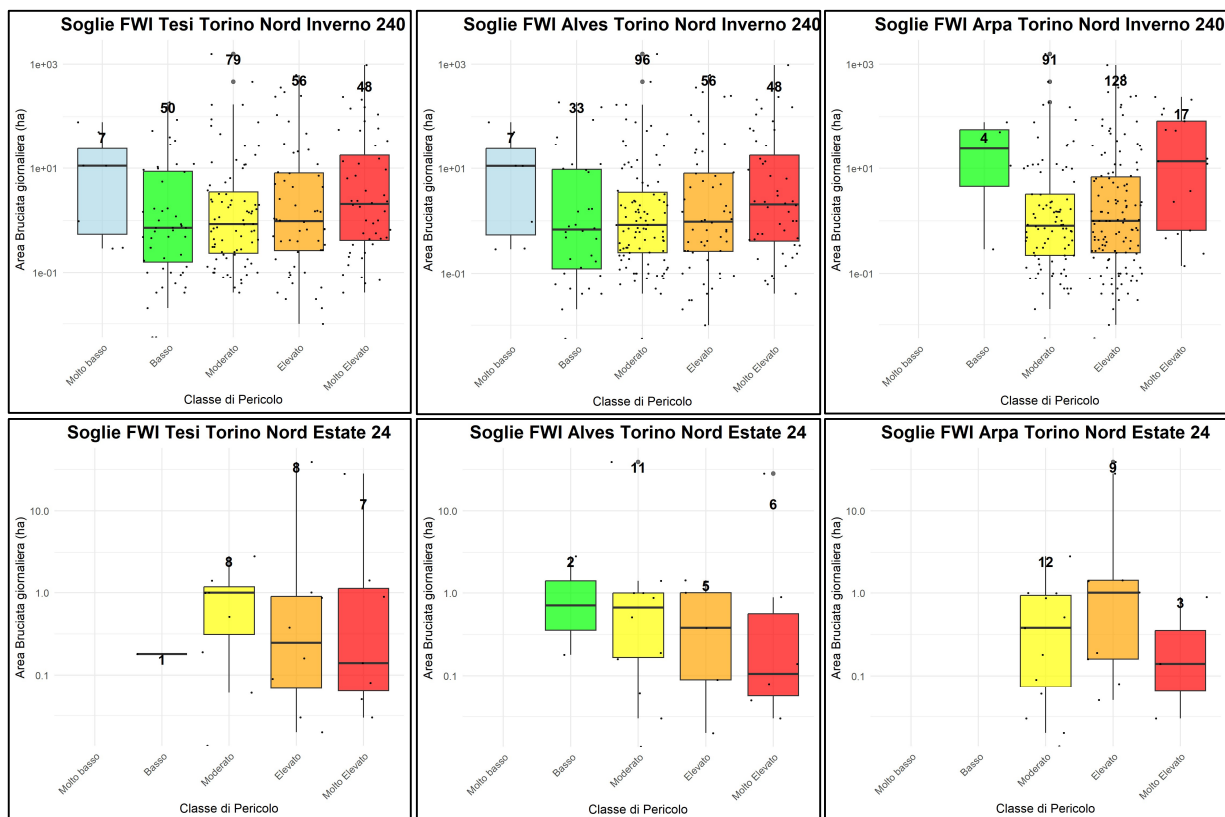


Figura 3.19: rappresentazione box-plot dell'area bruciata per le classi di pericolo della zona Torino Nord.

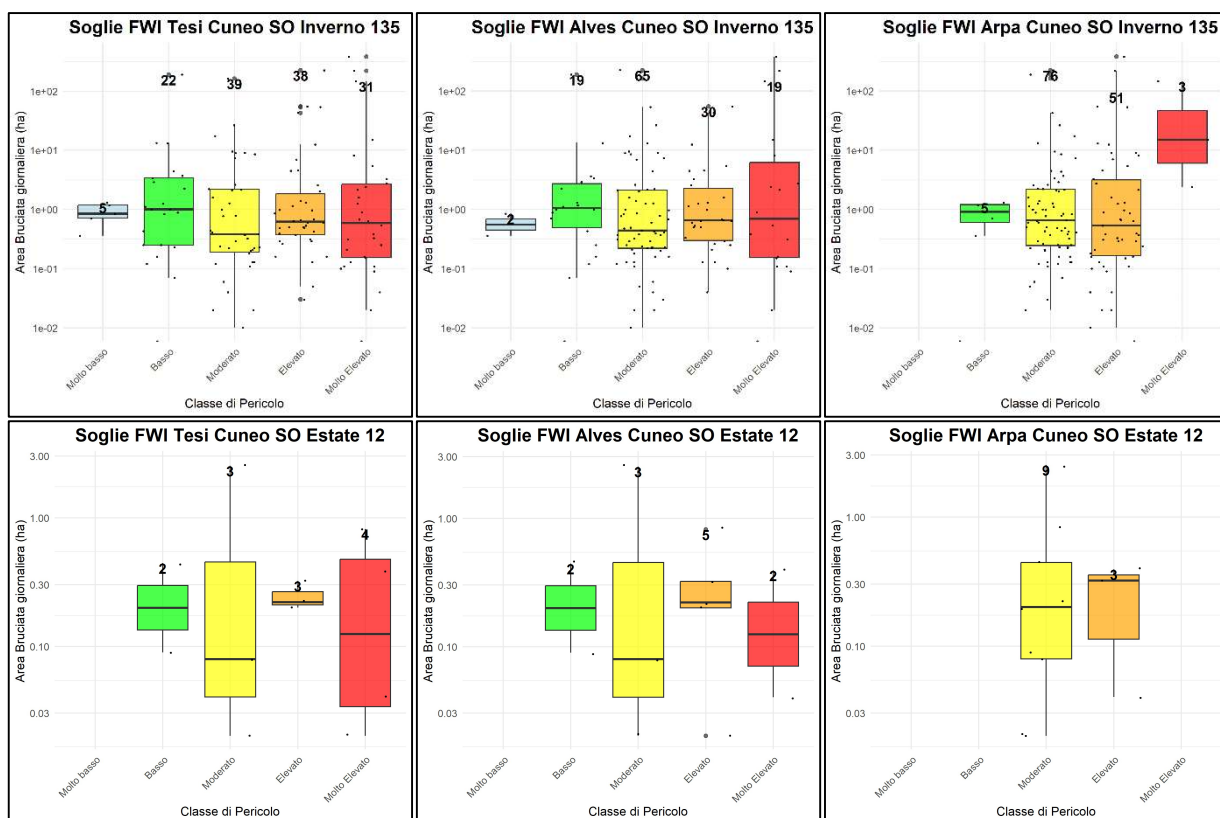


Figura 3.20: rappresentazione box-plot dell'area bruciata per le classi di pericolo della zona Cuneo SO.

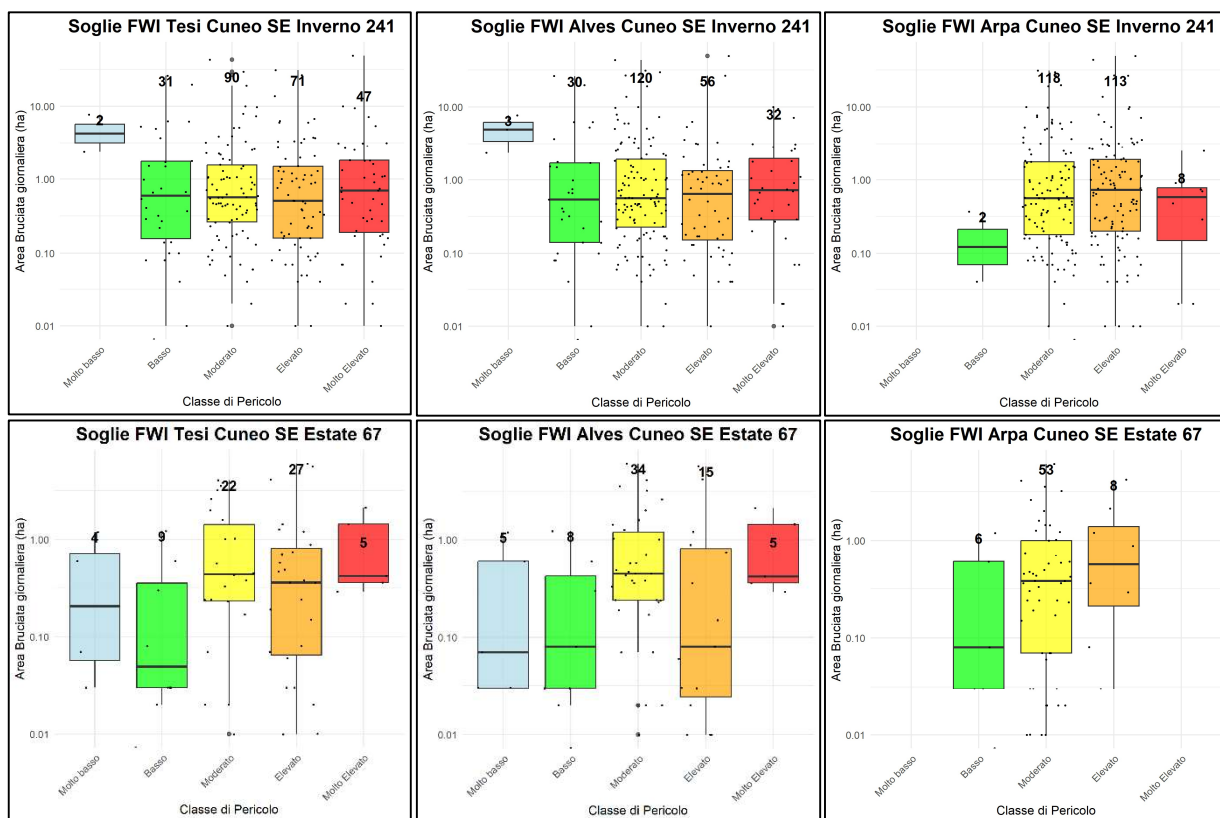


Figura 3.21: rappresentazione box-plot dell'area bruciata per le classi di pericolo della zona Cuneo SE.

Nella zona SudEst (Figura 3.22), le soglie invernali rispettano il comportamento regionale, nonostante il ridotto campione di incendi. In estate, le soglie ARPA non riescono a includere gli incendi con estensione maggiore, come invece succede per le soglie ottenute da percentili.

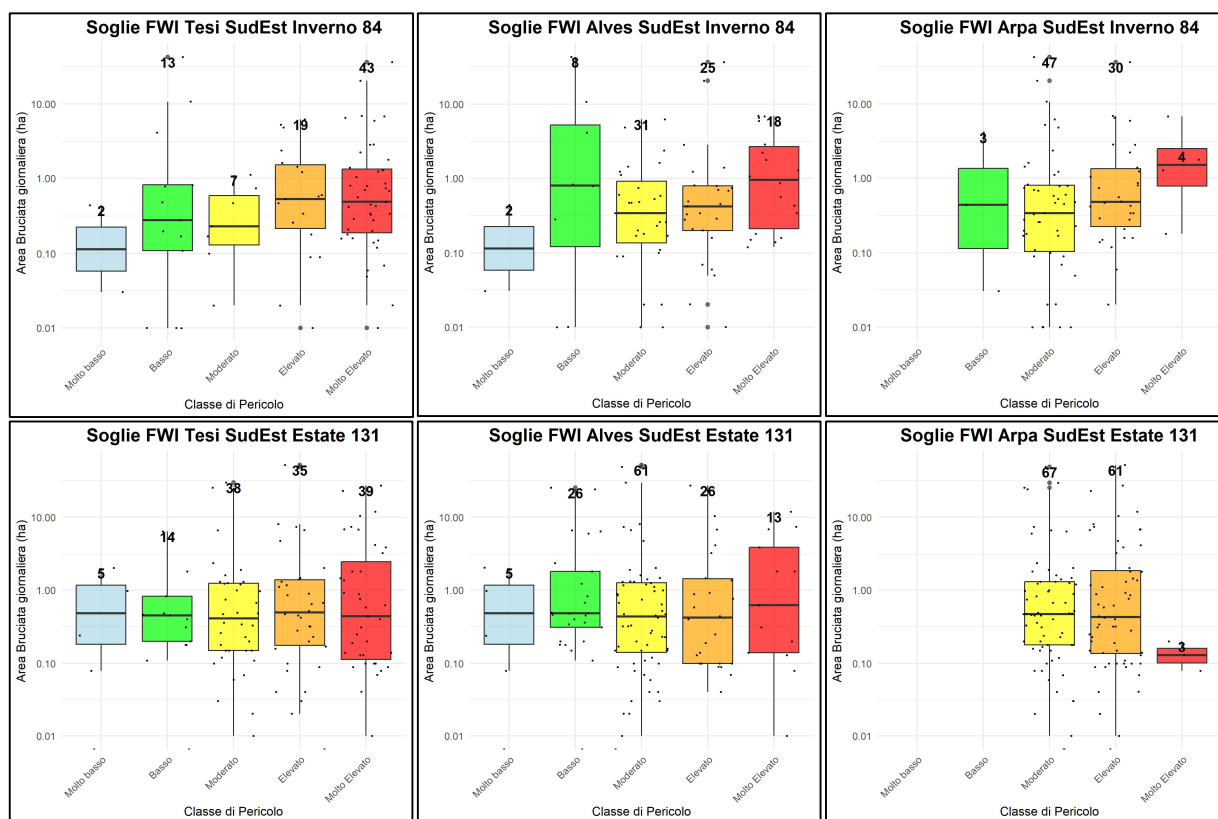


Figura 3.22: rappresentazione box-plot dell'area bruciata per le classi di pericolo della zona SudEst.

4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI OTTENUTI

In seguito alla classificazione del pericolo incendi boschivi dei giorni del periodo di studio, ottenuta applicando i 3 sistemi di soglie analizzati, si riportano le considerazioni effettuate nel confronto tra tali soglie.

La prima differenza tra i sistemi di allertamento considerati è il numero di giorni che vengono assegnati ad ogni classe di pericolo incendi, soprattutto per quelle ad allerta maggiore. Le soglie ARPA tendono a classificare la maggior parte dei giorni nella classe di pericolo Moderato, assegnando invece pochissimi giorni al pericolo Molto basso e Molto Elevato. In questo modo, la percentuale di incendi/giorno ottenuta nella classe di allerta massima è superiore a quella delle soglie ricavate dai metodi percentili, ma mediamente solo l'1% degli incendi viene classificato col pericolo massimo. Eccezioni a questa tendenza si osservano nella zona Nord (Tabella 3.5), nella zona Cuneo SE (Tabella 3.9) e nella zona SudEst (Tabella 3.10), dove le soglie ottenute dai percentili ottengono valori di probabilità incendi/giorno uguali o superiori e un maggior numero di giorni classificati come di pericolo Molto Elevato. Nel caso della zona SudEst, questo è dovuto al fatto che le soglie ARPA sono uniche a livello regionale e, nella macroarea caratterizzata dai valori maggiori di FWI, sono più numerosi i giorni classificati con pericolo Molto Elevato, anche se non sono presenti molti incendi e la probabilità di previsione incendi/giorno si abbassa. Viceversa, nella zona Nord, per il pericolo Molto Elevato, le soglie invernali ottenute dai percentili superano la probabilità di incendi/giorno del 100%, e comprendono un numero molto maggiore di incendi rispetto a quanti sono identificati dalle soglie ARPA. Questo conferma quanto concluso nello studio di Alves et al. (2018), dove si indica che il metodo di calibrazione restituisce buoni risultati per le regioni NUTS3 dove si verificano molti incendi, e funziona meno bene dove gli incendi sono più rari.

In generale, le soglie ARPA non utilizzano quasi mai la classe di pericolo Molto Basso, anche nelle zone dove la frequenza di incendi estivi è quasi nulla. Si potrebbe facilmente alzare la soglia di definizione del pericolo Basso e Moderato, per raccogliere un numero maggiore di giorni nelle classi inferiori. In fase di definizione del sistema di allertamento reale, risulta opportuno bilanciare il numero di incendi previsto dalle classi di pericolo superiori e il numero di giorni per cui viene dichiarato lo stato di allerta ed evitare che il pericolo massimo venga utilizzato troppo frequentemente; le conseguenze possono essere il dispendio di risorse degli enti preposti, che devono attivare il sistema di prevenzione, e la perdita di fiducia della popolazione nella accuratezza delle previsioni. Inoltre, se il sistema di allarme viene percepito come poco affidabile, la popolazione tenderà ad ignorare e non attuare tutte quelle misure e buone pratiche di sicurezza imposte nel periodo di allerta, reputandole di dubbia utilità. Nelle macroaree con ridotta frequenza di incendi avere un ristretto numero di giorni ad allerta massima non è un difetto del sistema di classificazione.

Quando i risultati delle classificazioni vengono sottoposti all'analisi ROC, le soglie ARPA risultano penalizzate perché concentrano la maggior parte dei giorni e degli incendi nel pericolo Moderato, ottenendo i minori valori per il parametro True Skill Statistic e per l'area compresa sotto la curva AUC in tutte le macroaree analizzate. Le soglie ricavate dai percentili selezionati nel lavoro di tesi dividono più uniformemente gli incendi nelle diverse classi di pericolo, aumentando però anche il numero di Falsi Allarmi ed ottenendo valori maggiori nell'indice FAR. Il maggior numero di incendi comporta anche valori maggiori di HR, di TSS e in generale dell'area sottostante la curva AUC. Le soglie ricavate dai percentili proposti da Alves ottengono valori simili ma sempre minori per tutti gli indici dell'analisi ROC, pur superando quasi sempre i risultati delle soglie ARPA.

Lo studio di tesi è stato condotto cercando di ottenere delle soglie che potessero assegnare alle classi di pericolo più alto i casi di incendi con maggior estensione. Il valore di Area bruciata media per il pericolo Molto Elevato è tendenzialmente maggiore secondo la classificazione di ARPA ma, se si considera anche il numero di incendi in ogni classe, le soglie ottenute dai percentili risultano essere quelle che ottengono migliori risultati, intercettando numeri decisamente maggiori di grandi incendi nei giorni di allerta massima. Questa previsione è stata verificata sia a livello regionale, sia nella maggior parte delle macroaree esaminate, in particolare le più focose: Nord e Torino Ovest. Nei grafici dove nessuno dei sistemi di soglie è riuscito a restituire l'andamento sperato, una delle cause è il minor numero di incendi registrati nelle macroaree meridionali nei mesi meno focosi, come Cuneo SO e Torino Nord; la ridotta dimensione del campione non permette di effettuare analisi approfondite che restituirebbero risultati più indicativi a fronte di un massiccio numero di dati.

In tutta la regione, anche nelle zone con maggior numero di incendi registrati, sono però presenti numerosi esempi di grandi incendi che si sono verificati in corrispondenza di valori non eccezionali di FWI, e che di conseguenza sono stati classificati in livelli di pericolo incendi non di massima allerta. Questo perché, seppur ci sia una buona corrispondenza tra Fire Weather Index e le condizioni di innesco incendio, la propagazione dell'incendio e la sua estensione finale dipendono da molteplici fattori di natura differente da quella climatica, quali: (i) quota degli incendi, (ii) distanza media dai terreni antropizzati e dalle infrastrutture utilizzate per la lotta attiva, (iii) tipologia di vegetazione e di combustibile, (iv) disponibilità di mezzi aerei, (v) capacità operativa del sistema AIB in quella zona e in quei giorni. L'analisi di tali tipologie di dati e la ricerca di una loro correlazione con i grandi incendi è lasciato a studi futuri. Pur mantenendo le analisi vincolate al solo aspetto meteo-climatologico, l'indice FFMC potrebbe presentare una migliore correlazione con l'area bruciata, ma questo soprattutto per distinguere il pericolo di incendio nei giorni classificati come pericolo Molto Basso o Basso. La distribuzione di FFMC tende infatti a crescere rapidamente nel primo quartile per poi quasi stabilizzarsi, ed applicando la calibrazione proposta da Alves i valori delle soglie a maggior pericolo sono compresi in un intervallo molto ristretto, risultando troppo simili tra di loro.

5 CONCLUSIONI

Le differenze tra le zone climatiche sono emerse ripetute volte nel confronto tra i risultati ottenuti impiegando i tre set di soglie. In una regione dove l'andamento di FWI varia sensibilmente tra le macroaree settentrionali e quelle meridionali, e dove il comportamento degli incendi è ancora più marcato, applicare dei valori unici su tutto il territorio non permette di seguire le caratteristiche locali, soprattutto per quanto riguarda le giornate con valori estremi di FWI. Dall'analisi delle soglie ARPA emerge che il numero maggiore di giorni ad allerta massima è stato assegnato alla zona climatica SudEst, che è quella con meno incendi in assoluto. Pertanto, dal lavoro di tesi emerge innanzitutto l'utilità di calibrare e poi applicare i set di soglie sulla scala delle zone climatiche.

Un fattore positivo delle soglie ARPA è la loro divisione temporale: per ogni giorno dell'anno è presente una soglia diversa, calcolata sulla media mensile e poi interpolata per ottenere dei valori giornalieri. In questo modo però le soglie seguono l'andamento mensile medio, e viene assegnato il pericolo solo quando il valore di FWI si discosta da tale andamento. La divisione in stagioni più ampie invece assegna l'allarme a molti più giorni nei mesi dove effettivamente accadono più incendi. Tuttavia, la divisione in due sole stagioni, secondo quanto previsto dal metodo proposto da Alves et al. (2018), è risultata essere troppo approssimata per la scala di dettaglio impiegata, oltre ad essere stata pensata per adattarsi a paesi caratterizzati da clima mediterraneo, e non continentale come in Piemonte. Sarebbe interessante indagare sui risultati che si otterrebbe impiegando un numero maggiore di stagioni, composte per ogni macroarea scegliendo i mesi da raggruppare in base al numero di incendi osservato.

Confrontando le soglie ottenute dai percentuali, migliori risultati dall'analisi ROC sono stati ottenuti per le soglie proposte dal lavoro di tesi e calibrate con diversi percentuali in base al comportamento della cumulata di area bruciata per ogni zona. La scelta dei percentuali da impiegare per ogni zona sembra sia una pratica da prediligere rispetto all'utilizzo dei percentuali unici stabiliti da Alves, ma tale scelta è stata effettuata secondo l'interpretazione delle curve effettuata secondo la discrezione degli autori della tesi. Risultati migliori si potrebbero ottenere impiegando metodi statistici ed algoritmi di decisione che identifichino in modo obiettivo i break-point sulla curva cumulata.

Agli enti decisori e gestori del sistema di allertamento ricade la decisione del criterio di confronto da prediligere per poter selezionare il sistema di calibrazione a loro più adatto. Se infatti gli indici dell'analisi ROC favoriscono la calibrazione secondo il metodo Alves, la percentuale non indifferente di giorni ai quali verrebbe assegnato il pericolo Molto Elevato potrebbe essere troppo elevata se applicata nella realtà. Ad ogni giorno di allarme massimo corrispondono infatti dei costi economici, necessari ad attivare e mantenere in stato di allerta il sistema antiincendio presente sul territorio. Potrebbe rivelarsi necessario condurre un'analisi costi-benefici per determinare il numero massimo di giorni con pericolo Molto Elevato desiderati, e da questo ricavare il percentile per determinare il valore soglia.

6 SITOGRAFIA

Elenco delle pagine internet consultate:

Carta Forestale di Italia: <https://cfi-sinfor.crea.gov.it/Home/CartaForestale>

Enciclopedia Treccani: <https://www.treccani.it/enciclopedia/piemonte/>

Regione Piemonte: <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/foreste/foreste-piemonte-economia-ambiente/superfici-categorie-forestali>

Relazione ambiente Piemonte:

<https://relazione.ambiente.piemonte.it/2021/it/territorio/fattori/foreste>

7 BIBLIOGRAFIA

Alves, D. & Viegas, D. X., 2018. Calibration of the Canadian FWI system for the territory of Europe. In: *Advances in forest fire research 2018*. s.l.:Imprensa da Universidade de Coimbra.

Barbarino, S., Japelj, A. & Kutnar, L., 2012. *Gli incendi boschivi nelle Alpi: conoscenza, previsione e cooperazione per difendere il nostro patrimonio forestale*. Torino: Arpa Piemonte.

Cane, D., Ciccarelli, N. & Pelosini, R., 2012. Fire Weather Index Implementation in the Alpine Area. *ISRN Meteorology*, Volume 2011.

Cane, D. et al., 2013. Projection of fire potential to future climate scenarios in the Alpine area: some methodological considerations. *Climatic Change*, Volume 119, pp. 733-745.

Dupire, S., Curt, T. & Bigot, S., 2017. Spatio-temporal trends in fire weather in the French Alps. *Science of The Total Environment*, Volume 595, pp. 801-817.

Gottero, F. et al., 2024. *Piano regionale per la programmazione delle attività di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi 2021 – 2025*, s.l.: Regione Piemonte.

Müller, M., Vacik, H. & Valese, E., 2015. Anomalies of the Austrian Forest Fire Regime in Comparison with Other Alpine Countries: A Research Note. *Forests*, Volume 6, pp. 903-913.

Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Díaz-Palmero, J. M. & Cabezas-Cerezo, J. D. D., 2017. A comparative study of fire weather indices in a semiarid south-eastern Europe region. Case of study: Murcia (Spain). *Science of The Total Environment*, pp. 761-774.

Shmuel, A. L. T., Heifetz, E., Glickman, O. & Price, C., 2025. Fire weather indices tailored to regional patterns outperform global models. *Nature, Natural Hazards*, Volume 2.

Valese, E., Conedera, M., Held, A. & Ascoli, D., 2014. Fire, humans and landscape in the European Alpine region during the Holocene. *Anthropocene*, Volume 6, pp. 63-74.

Van Wagner, C. E., 1987. *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. s.l.:Minister of Supply and Services Canada.

Wastl, C. et al., 2012. Recent climate change: Long-term trends in meteorological forest fire danger in the Alps,. *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 162-163.

ALLEGATO A: RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE SULL'INDICE FFMC.

0.1 RICERCA DI CORRELAZIONE TRA INDICI CLIMATICI ED AREA BRUCIATA

Osservando la distribuzione dei grandi incendi ordinata secondo il Fire Weather Index, emerge come non sempre gli incendi più estesi avvengano in concomitanza dei giorni con valori più alti di FWI. Questo perché il comportamento degli incendi non deriva solamente dalle condizioni climatiche e meteorologiche, ma anche da altri fattori predisponenti sito-specifici, quali la morfologia del territorio e soprattutto la tipologia di vegetazione che costituisce il combustibile per l'incendio; inoltre, dai dati forniti non è possibile descrivere quanto le misure di prevenzione e lotta attiva abbiano influito nel limitare ed estinguere la propagazione del fuoco, indipendentemente dai valori degli indici climatici.

Si è deciso pertanto di rappresentare tutti i giorni di incendio nel grafico FWI-BA, e vedere se la nuvola di punti così ottenuta assumesse delle forme ascrivibili a curve o rette, dimostrando la presenza di un qualche tipo di correlazione tra le due grandezze. I giorni con incendio su tutta la regione sono 1948, ma sono stati rappresentati solamente i 714 incendi di dimensioni rilevanti (scelti imponendo la condizione $BA > 1$ ettaro, il 36% di tutti gli incendi), per evitare che la maggior parte dei punti si concentrasse in prossimità all'asse delle ascisse. Il grafico è riportato con l'asse delle ordinate prima in scala assoluta e poi in scala logaritmica (Figura 0.1), per una migliore separazione tra i punti.

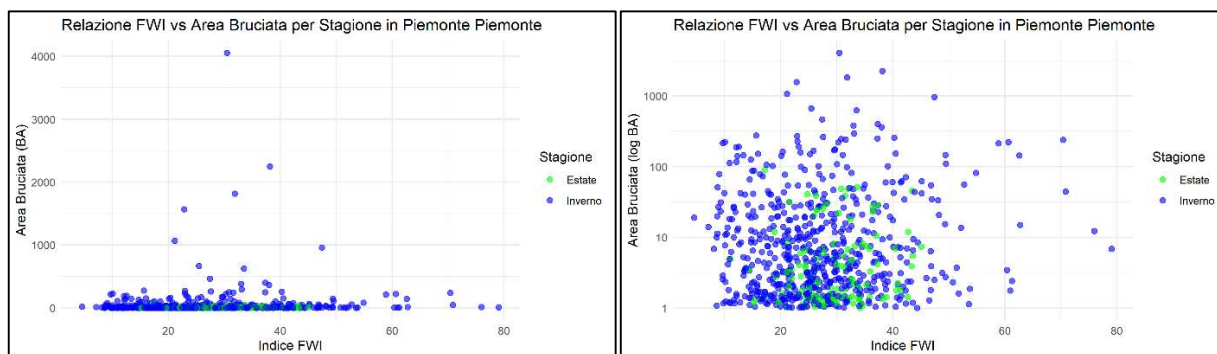


Figura 0.1: grafico a dispersione tra FWI e Area Bruciata per tutti gli incendi in regione Piemonte.

Le nuvole di punti ottenute sia per la stagione estiva che per quella invernale non evidenzino alcuna correlazione significativa tra le grandezze. Come già fatto notare, i casi di incendi di dimensioni particolarmente estese ($BA > 100$ ha) sono presenti in modo quasi omogeneo su tutto il dominio di FWI, ed anzi le anomalie di grandi incendi sono concentrate tra valori di FWI compresi tra 20 e 50. Anche considerando incendi di estensione minore, si vede come la maggior parte sia sempre situata a valori di FWI inferiori a 50. Questo è dovuto anche al fatto che la distribuzione di FWI è concentrata su valori non particolarmente elevati: la media di FWI raccolta su tutto il periodo di riferimento è pari a 18.2; valori di FWI superiori a 50 sono stati registrati solo in 76 giorni su tutta la regione, pari al 0.23% del campione. Il 68% dei giorni di incendi possiede FWI minore di 30, il 92% di 40.

È bene però ricordare che in questo grafico sono stati raggruppati gli incendi registrati in tutte le macroaree climatiche, e pertanto sviluppati in condizioni diverse di vegetazione.

Essendo il Fire Weather Index ottenuto da un calcolo dove sono impiegati altri 5 sottoindici climatici, si è deciso di provare ad eseguire lo scatter-plot anche di questi altri parametri, cercando correlazione con l'area bruciata. Effettuando lo scatterplot per ciascuno degli indicatori, le nuvole di punti tendono a disporsi similmente a FWI, in alcuni casi concentrandosi anche di più verso l'asse delle ordinate (Figura 0.2). L'unico sottoindice che assume un comportamento diverso, per cui gli incendi si concentrano sui valori alti, è il Fine Fuel Moisture Code (rappresentato in Figura 0.3). FFMC è un indicatore del contenuto idrico della frazione fine dei combustibili a terra, e rappresenta pertanto la facilità con cui questi si infiammano.

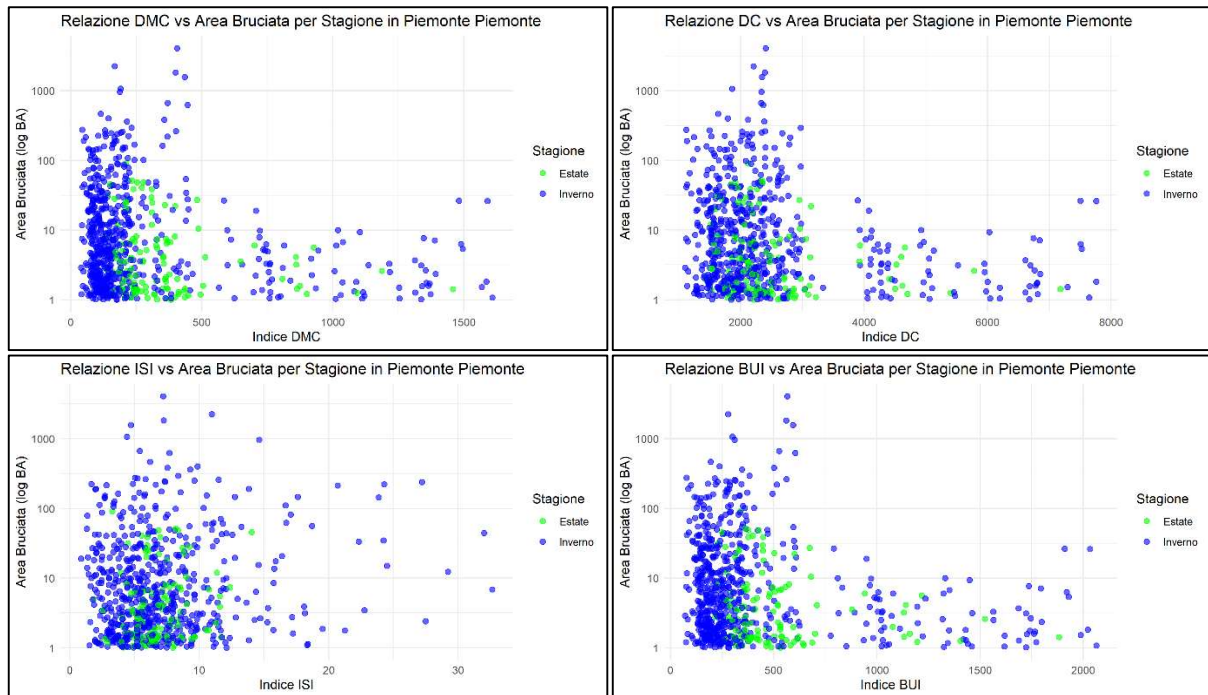


Figura 0.2: grafici a dispersione tra area bruciata e i sottoindici climatici DMC, DC, ISI, BUI.

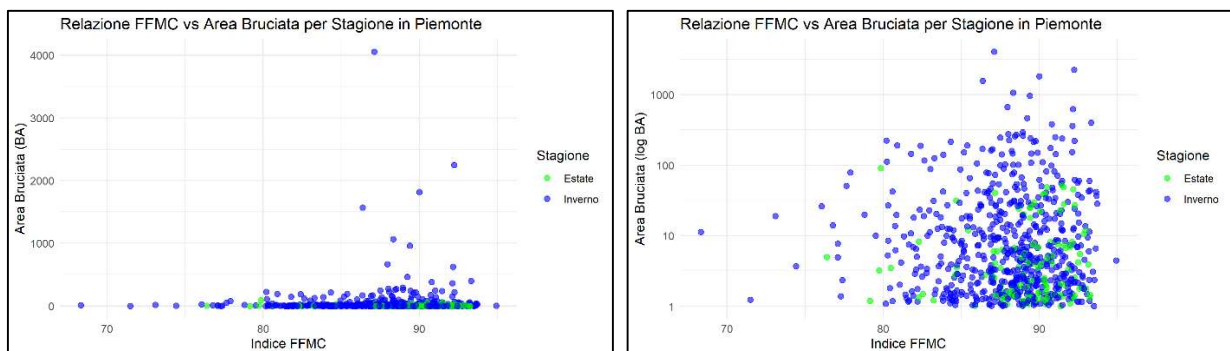


Figura 0.3: grafici a dispersione tra FFMC e area bruciata.

Il valore medio di FFMC misurato sull'intero periodo di studio 2010-2024 è pari a 82.4 ma, quando si considerano solo gli incendi con BA>1, si nota che il 93% degli incendi si manifesta con valori superiori a questa soglia. Apparentemente, il sottoindice FFMC riesce ad indicare i grandi incendi con più precisione rispetto a FWI.

Studi precedenti confermano che i due indici possono ricoprire un ruolo complementare: “FWI è molto integrativo ed esprime bene il pericolo di incendio generale e la potenziale intensità del fuoco. L’FFMC rileva piccole variazioni nel contenuto di umidità del combustibile superficiale, che è il primo e più probabile che si incendi negli ambienti alpini e che brucia negli incendi superficiali predominanti” (Dupire, et al., 2017). La capacità predittiva del FFMC nel territorio dell’Italia settentrionale è stata riportata anche nei documenti ufficiali sul tema antincendi boschivi in altre regioni del nord Italia (Piano AIB Lombardia 2025).

“Osservando i dati degli incendi pregressi, negli ultimi 16 anni, gran parte di essi si è sviluppata con classi di pericolosità da bassa a moderata se calcolata con FWI, ma da moderata a molto alta se calcolata con FFMC, che quindi sembra rappresentare un indice più interessante per il calcolo della pericolosità degli incendi boschivi. Coerentemente con quanto evidenziato dall’analisi spaziale, l’indice FFMC mostra una forte correlazione tra classe di pericolosità e numero medio di incendi boschivi e di area bruciata giornalieri. La ripartizione dei giorni dell’anno nelle varie classi di indice di pericolo FFMC e FWI fa registrare una diminuzione della frequenza dei giorni in classe “Very Low” e “Low” e un generale aumento dei giorni con classe di pericolo superiore (Moderate e oltre per il FFMC, High e oltre per il FWI)” (Piano AIB Lombardia 2025).

Vista la possibilità di ritrovare una correlazione tra FFMC ed area degli incendi, si è ritenuto interessante ripetere il metodo di calibrazione proposto da Alves, ma impiegando come indicatore FFMC al posto di FWI. Si è deciso di investigare solamente le soglie ottenute dai percentili previsti dal metodo Alves (0.3, 0.6, 0.9, 0.97), ritenendoli adeguati per impostare un confronto tra la classificazione secondo FWI e secondo FFMC a parità di percentili.

0.2 RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE DI SOGLIE DI FFMC

Il metodo di calibrazione proposto da Alves et al (2018) è stato applicato impiegando FFMC al posto di FWI. In Figura 0.4 sono riportati i grafici ottenuti ordinando i valori di FFMC in ordine crescente, e le curve cumulate della superficie dell’incendio medio giornaliero successivamente costruite. Le soglie ricavate dai percentili proposti da Alves sono state riportate in Tabella 0.1 e Tabella 0.2, insieme ai risultati ottenuti classificando i giorni del periodo di riferimento secondo tali soglie. La distribuzione dei grandi incendi, rappresentati per area bruciata, è raffigurata in Figura 0.5 utilizzando le soglie calcolate a livello regionale, e in Figura 0.6 esaminando ogni macroarea individualmente.

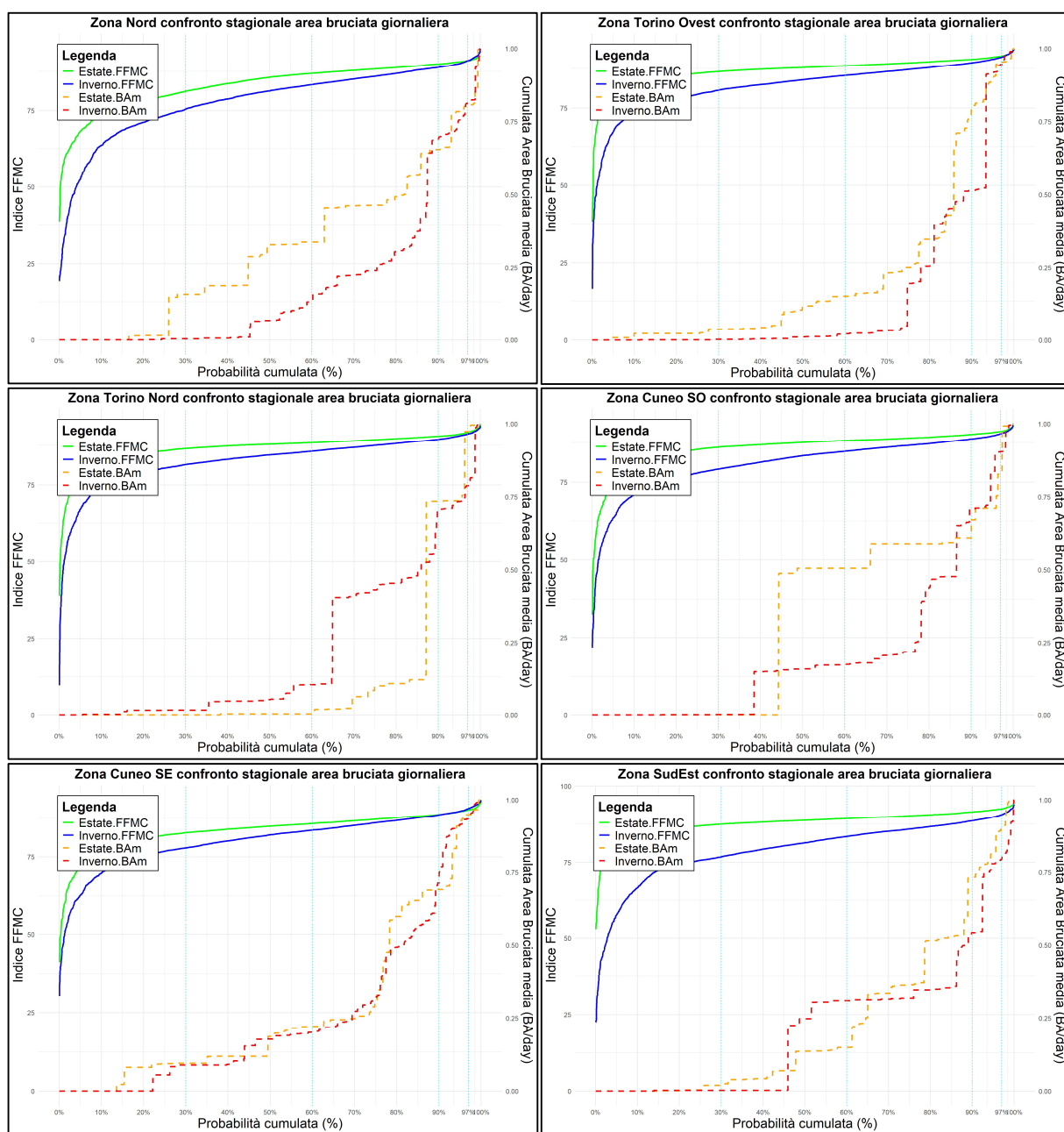


Figura 0.4: grafici delle cumulate per macroarea della superficie bruciata dell'incendio giornaliero medio, ottenute ordinando in ordine crescente FFMC

Tabella 0.1: tabella risultati della classificazione secondo le soglie FFMC per i mesi invernali.

Inverno							
Macroarea	Classe	Soglia FFMC max	Giorni allarme	Giorni con incendi	N° incendi	Percentuale incendi	Probabilità incendi/giorno
Piemonte	Molto basso	78.7	6109	30	33	2%	1%
Piemonte	Basso	84.5	6109	230	285	14%	5%
Piemonte	Moderato	88.9	6109	687	876	43%	14%
Piemonte	Elevato	90.8	1426	328	447	22%	31%
Piemonte	Molto Elevato	999.0	611	230	373	19%	61%
Nord	Molto basso	75.4	1018	6	6	1%	1%
Nord	Basso	83.2	1018	52	67	11%	7%
Nord	Moderato	88.8	1018	200	276	46%	27%
Nord	Elevato	90.9	238	92	138	23%	58%
Nord	Molto Elevato	999.0	102	55	111	19%	109%
Torino Nord	Molto basso	81.5	1018	7	9	3%	1%
Torino Nord	Basso	85.7	1018	28	33	10%	3%
Torino Nord	Moderato	89.5	1018	107	130	41%	13%
Torino Nord	Elevato	91.3	238	56	82	26%	34%
Torino Nord	Molto Elevato	999.0	102	42	62	20%	61%
Torino Ovest	Molto basso	80.6	1018	15	17	3%	2%
Torino Ovest	Basso	85.3	1018	91	115	21%	11%
Torino Ovest	Moderato	89.3	1018	172	243	45%	24%
Torino Ovest	Elevato	91.1	238	75	98	18%	41%
Torino Ovest	Molto Elevato	999.0	102	47	73	13%	72%
Cuneo SO	Molto basso	79.1	1018	2	2	1%	0%
Cuneo SO	Basso	84.7	1018	20	22	14%	2%
Cuneo SO	Moderato	88.6	1018	65	73	47%	7%
Cuneo SO	Elevato	90.3	238	29	33	21%	14%
Cuneo SO	Molto Elevato	999.0	102	19	25	16%	25%
Cuneo SE	Molto basso	77.8	1018	5	5	2%	0%
Cuneo SE	Basso	83.5	1018	25	26	9%	3%
Cuneo SE	Moderato	88.4	1018	119	144	48%	14%
Cuneo SE	Elevato	90.4	238	53	70	23%	29%
Cuneo SE	Molto Elevato	999.0	102	39	57	19%	56%
SudEst	Molto basso	76.8	1018	1	1	1%	0%
SudEst	Basso	83.5	1018	12	14	14%	1%
SudEst	Moderato	88.6	1018	24	26	27%	3%
SudEst	Elevato	90.6	238	21	21	22%	9%
SudEst	Molto Elevato	999.0	102	26	35	36%	34%

Tabella 0.2: tabella risultati della classificazione secondo le soglie FPMC per i mesi estivi.

Estate							
Macroarea	classe	Soglia FPMC max	Giorni allarme	Giorni con incendi	N° incendi	Percentuale incendi	Probabilità incendi/giorno
Piemonte	Molto basso	85.2	3752	37	38	7%	1%
Piemonte	Basso	88.0	3753	82	90	18%	2%
Piemonte	Moderato	90.4	3753	180	205	40%	5%
Piemonte	Elevato	91.6	876	80	100	20%	11%
Piemonte	Molto Elevato	999.0	376	64	76	15%	20%
Nord	Molto basso	81.1	625	5	6	6%	1%
Nord	Basso	86.8	625	20	22	21%	4%
Nord	Moderato	89.9	626	34	35	34%	6%
Nord	Elevato	90.9	146	17	22	21%	15%
Nord	Molto Elevato	999.0	63	14	19	18%	30%
Torino Nord	Molto basso	86.6	625	0	0	0%	0%
Torino Nord	Basso	88.5	625	1	1	4%	0%
Torino Nord	Moderato	90.5	626	14	14	56%	2%
Torino Nord	Elevato	91.8	146	4	5	20%	3%
Torino Nord	Molto Elevato	999.0	63	5	5	20%	8%
Torino Ovest	Molto basso	86.5	625	8	8	5%	1%
Torino Ovest	Basso	88.4	625	24	31	21%	5%
Torino Ovest	Moderato	90.4	626	53	62	42%	10%
Torino Ovest	Elevato	91.5	146	24	31	21%	21%
Torino Ovest	Molto Elevato	999.0	63	10	17	11%	27%
Cuneo SO	Molto basso	86.0	625	0	0	0%	0%
Cuneo SO	Basso	88.1	625	2	2	17%	0%
Cuneo SO	Moderato	90.1	626	3	3	25%	0%
Cuneo SO	Elevato	91.0	146	4	4	33%	3%
Cuneo SO	Molto Elevato	999.0	63	3	3	25%	5%
Cuneo SE	Molto basso	82.7	625	7	7	10%	1%
Cuneo SE	Basso	85.6	625	11	11	15%	2%
Cuneo SE	Moderato	88.5	626	33	34	47%	5%
Cuneo SE	Elevato	90.0	146	11	13	18%	9%
Cuneo SE	Molto Elevato	999.0	63	5	8	11%	13%
SudEst	Molto basso	87.5	625	6	6	4%	1%
SudEst	Basso	89.4	625	24	28	19%	4%
SudEst	Moderato	91.5	626	56	63	43%	10%
SudEst	Elevato	92.5	146	28	31	21%	21%
SudEst	Molto Elevato	999.0	63	17	18	12%	29%

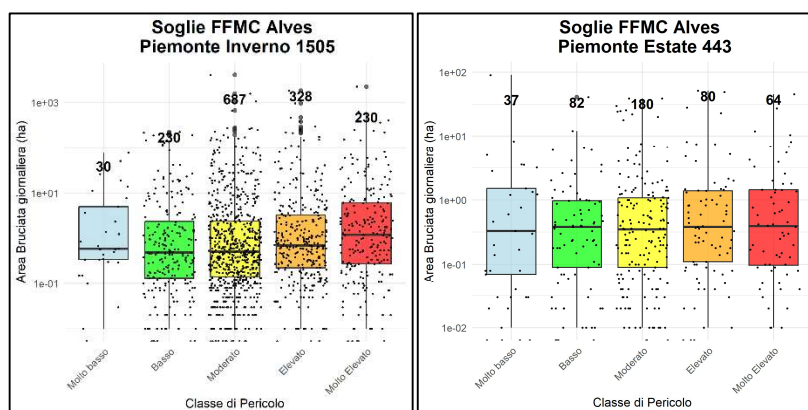


Figura 0.5: rappresentazione boxplot delle distribuzioni di incendi per il Piemonte.

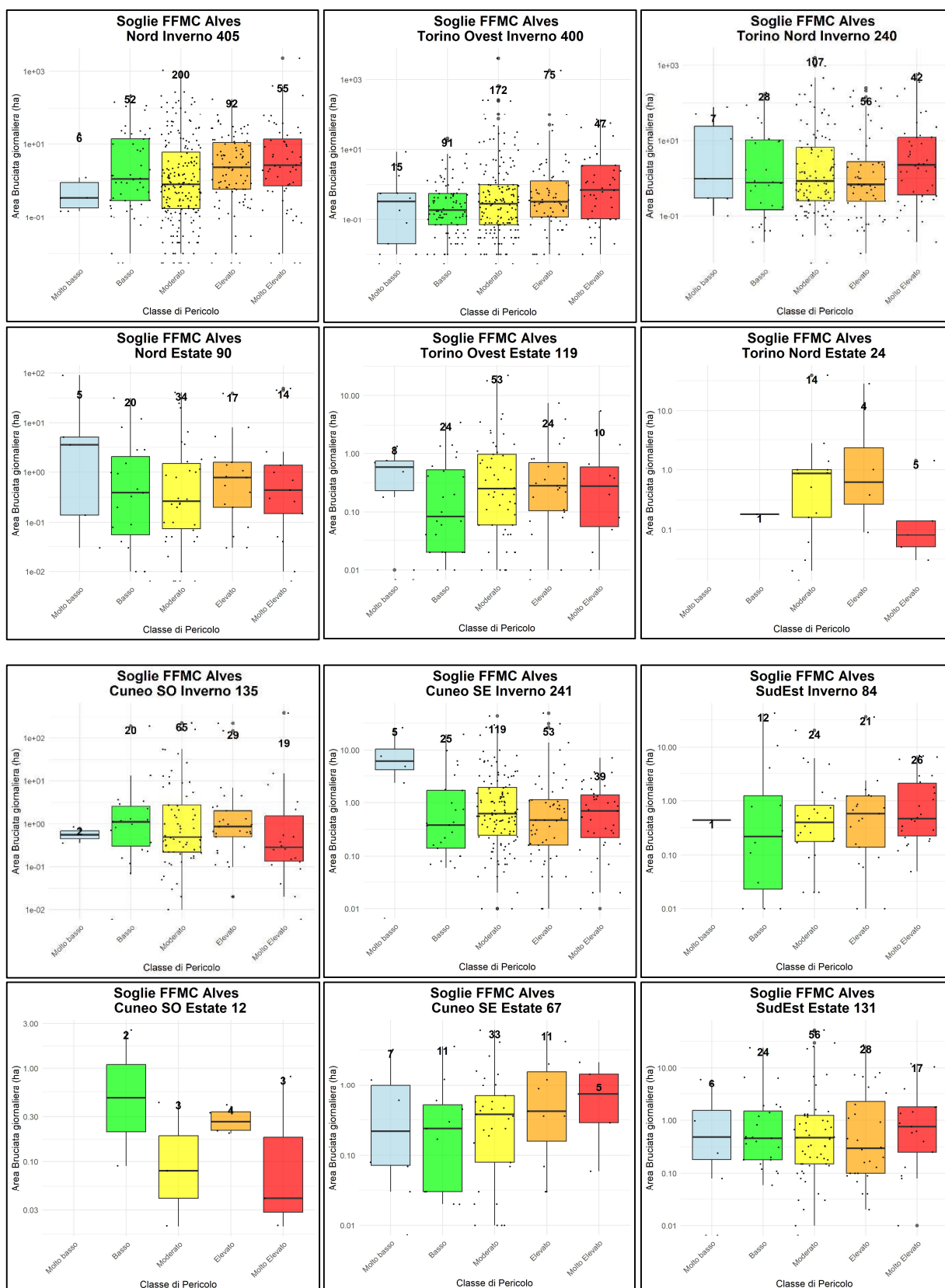


Figura 0.6: rappresentazione boxplot delle distribuzioni di incendi per le singole zone climatiche piemontesi.