



**Piano regionale di previsione, prevenzione e
lotta attiva contro gli incendi boschivi**

PROIEZIONE FUTURA DEL FIRE WEATHER INDEX (FWI)

Interreg



Co-funded by
the European Union

Alpine Space

MOSAIC



73fd36da



Proiezione futura del Fire Weather Index (FWI)

Accordo di collaborazione tecnico-scientifica ex art. 15 L. 241/1990, tra Arpav e Regione del Veneto per la realizzazione del progetto europeo **MOSAIC - Managing prOtective foreSt fAcIng cLIimate Change** compound events.

Programma Interreg Spazio Alpino 2021-2027 --- CUP H15E22000460007



Tander (VR)

Teolo (PD)

Dicembre 2025



INDICE

STIMA E ANALISI FUTURA DELL'INDICE FWI TRAMITE PROIEZIONI CLIMATICHE

- Obiettivo dello studio
- Semplificazione delle variabili
- Schema generale del flusso di lavoro

Costruzione del modello predittivo su dati osservati

- Scelta delle stazioni osservative
- Variabili in input e costruzione del modello

Applicazione del modello ai dati climatici futuri

Analisi del FWI futuro

- Gestione dei diversi modelli climatici
- Calcolo delle anomalie
- Visualizzazione delle anomalie
- Interpretazione dei risultati

Studio realizzato in occasione della collaborazione di ARPAV con Protezione Civile del Veneto alle attività del Progetto MOSAIC, **Managing protective forest facing climate Change**, finanziato dal Programma Interreg Spazio Alpino 2021-2027.

ARPAV, Dipartimento Regionale di Sicurezza del Territorio, Ufficio Climatologia

Marco Lorenzetti

Fabio Zecchini

Giovanni Massaro

Raffaele Gaudio

Francesco Rech

È consentita la riproduzione di testi, tabelle, grafici ed in genere del contenuto del presente rapporto esclusivamente con la citazione della fonte.



73fd36da



Stima e analisi futura dell'indice FWI tramite proiezioni climatiche

Obiettivo dello studio

L'obiettivo complessivo dell'analisi è valutare come l'indice FWI (Fire Weather Index) potrà variare nel futuro in funzione dei cambiamenti climatici attesi. L'FWI combina diverse variabili meteorologiche (temperatura, umidità, vento e precipitazioni) ed è ampiamente utilizzato come indice sintetico del pericolo di incendi boschivi.

Tuttavia, nel contesto delle proiezioni climatiche future si incontrano limiti tecnico-operative: non è possibile, o è metodologicamente sconsigliabile, utilizzare variabili come vento e umidità, né è disponibile una frequenza oraria dei dati tale da ricavare valori rappresentativi delle ore centrali della giornata o effettuare conteggi sub-giornalieri.

Di conseguenza, è necessario impostare una metodologia alternativa per ricostruire un FWI sintetico, basato esclusivamente sulle variabili modellistiche più affidabili e coerenti tra passato e futuro.

Semplificazione delle variabili

Per affrontare i vincoli imposti dai dati modellistici, si è deciso di concentrare l'analisi su due sole variabili: la temperatura massima giornaliera e la precipitazione giornaliera. Questa scelta è stata dettata da diversi fattori. Innanzitutto, entrambe le grandezze sono disponibili sia nei dataset osservativi storici sia nelle proiezioni dei modelli climatici, garantendo quindi continuità di dati su tutto l'arco temporale considerato, dal 1990 al 2100. In secondo luogo, temperatura massima e precipitazione risultano sufficientemente correlate con l'andamento dell'FWI reale da permettere la costruzione di un modello predittivo affidabile.

La temperatura massima, in particolare, è generalmente simile alla temperatura misurata intorno alle 13, che costituisce uno degli input del *Fire Calculator*. Perciò, pur non essendo perfettamente coincidente, la temperatura massima consente di approssimare in modo ragionevole l'informazione termica necessaria per stimare l'indice FWI. La precipitazione, invece, rimane la variabile principale responsabile della riduzione del rischio di propagazione degli incendi e, per quanto riguarda le proiezioni climatiche, vengono utilizzati i dati giornalieri, in sostituzione alla cumulata delle 24 ore antecedenti alle ore 13.

In una prima fase operativa, i dati osservati di temperatura massima sono stati integrati con gli output storici del *Fire Calculator*. Questo ha permesso di ottenere file giornalieri completi, in cui erano presenti sia i valori storici dell'FWI sia le variabili disponibili anche nei modelli climatici futuri, creando così un dataset unico e coerente per l'addestramento del modello predittivo.



Schema generale del flusso di lavoro

Il flusso di lavoro adottato può essere suddiviso in tre fasi principali:

- Individuare la relazione tra temperatura massima e precipitazione osservate e l'FWI calcolato, costruendo un modello predittivo per ciascuna stazione selezionata.
- Applicare la relazione trovata ai dati modellistici delle proiezioni climatiche, così da stimare un FWI sintetico futuro.
- Analizzare i risultati, confrontando la distribuzione dell'FWI osservato nel passato con quella stimata nei futuri scenari emissivi.

L'immagine schematizza le prime due fasi: In rosso la relazione tra temperatura massima e precipitazione osservate con l'indice FWI già calcolato (incognita della prima fase); e la stima dell'indice FWI a partire dai dati modellistici, applicando la relazione trovata in precedenza (seconda fase).



Costruzione del modello predittivo su dati osservati

Scelta delle stazioni osservative

Prima di costruire il modello predittivo dell'FWI, è stato necessario individuare un insieme di stazioni rappresentative. Il download e la gestione delle serie giornaliere di temperatura massima e precipitazione comportano un notevole impegno computazionale, pertanto si è resa necessaria una selezione preliminare delle stazioni da analizzare.

La scelta è stata guidata da tre criteri principali: garantire una buona coerenza climatica tra dati osservati e modellistici, assicurare una copertura territoriale equilibrata tra pianura, collina e montagna, e considerare la rilevanza storica delle stazioni rispetto alla frequenza degli incendi. Questo processo si propone di portare all'individuazione di dieci stazioni ritenute adeguate per rappresentare le condizioni climatiche locali e per essere accoppiate ai punti griglia dei modelli climatici.

Un problema significativo da affrontare riguarda infatti la differenza tra la temperatura massima da modello e quella osservata. I modelli climatici regionali del progetto EURO-CORDEX – che rappresentano lo stato dell'arte dei modelli climatici regionali sull'area del Mediterraneo in termini di risoluzione spaziale – sono stati ritagliati sul Triveneto e corretti utilizzando la temperatura



massima e precipitazione spazializzate, rispettivamente a 500 m e a 5 km, derivate dalle stazioni meccaniche dell'ex Ufficio Idrografico, mentre per il presente studio sono stati impiegati dati provenienti dalle stazioni automatiche ARPAV, che differiscono sia per periodo di misura sia per posizione geografica.

Per ridurre l'impatto di questa differenza, è stata adottata una procedura pragmatica: per ciascuna stazione osservativa si è calcolata la media stagionale di temperatura massima per l'inverno e per l'estate degli ultimi 20 anni. Analogamente, per i modelli climatici si sono calcolate le medie stagionali corrispondenti per ciascun punto griglia, considerando gli scenari climatici RCP 4.5 (scenario di stabilizzazione) e RCP 8.5 (scenario senza mitigazione)¹. Successivamente, le stazioni osservative sono state confrontate con i punti griglia dei modelli entro un raggio di 2.5 km. Una stazione è stata considerata compatibile se lo scarto tra valori osservati e modellistici risultava inferiore a 0.25 °C per entrambe le stagioni e per entrambi gli scenari.

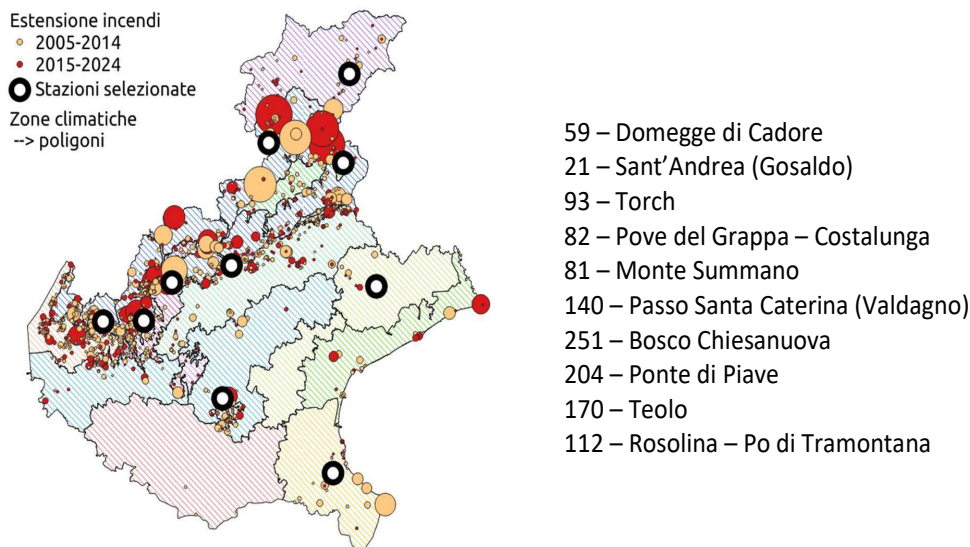
Questo approccio presenta alcuni limiti. In primo luogo, il modello di ensemble non viene utilizzato nelle analisi giornaliere: nelle fasi successive si lavorerà invece con i singoli modelli, considerando i dati a livello quotidiano. Inoltre, le stazioni montane tendono a essere sovra rappresentate nella selezione, poiché la maggiore variabilità orografica locale aumenta le possibilità di trovare punti della griglia modellistica compatibili con le osservazioni.

Delle 21 stazioni inizialmente ritenute potenzialmente idonee, ne sono state selezionate 10, privilegiando anche quelle aree maggiormente colpite da incendi. Per ciascuna stazione sono stati scaricati 80 file per la temperatura massima e altrettanti per la precipitazione, corrispondenti ai 4 modelli considerati e ai 2 scenari emissivi, tramite il server THREDDS del database ARPAV (<https://thredds.arpa.veneto.it/thredds>).

Le stazioni selezionate sono mostrate nella figura ed elencate a fianco.

¹ *Representative Concentration Pathways* (RCP) rappresentano differenti forzanti radiative: RCP 4.5 (4.5 W/m²) e RCP 8.5 (8.5 W/m²). RCP 4.5 corrisponde ad uno scenario di stabilizzazione delle concentrazioni di gas serra, ovvero la concentrazione di CO₂ si stabilizza entro fine secolo a 538 ppm; RCP 8.5 corrisponde allo scenario senza mitigazione e con emissioni via via crescenti, il cosiddetto *business-as-usual* e a una concentrazione di CO₂ entro fine secolo che supera i 900 ppm.





Variabili in input e costruzione del modello

Per ogni stazione sono stati utilizzati come input:

- Temperatura massima giornaliera osservata;
- Temperatura massima media degli ultimi tre giorni;
- precipitazione cumulata dei giorni consecutivi di pioggia (*rainsum*);
- precipitazione cumulata della settimana precedente (*rainweek*);
- il giorno dell’anno, normalizzato e trasformato ciclicamente.

Come variabile target è stato utilizzato l’FWI già calcolato tramite *Fire Calculator*.

È stata introdotta una soglia minima di 0.1 mm per evitare il problema dei “falsi giorni di pioggia debole”, che interferirebbero con il calcolo di *rainsum*. È possibile valutare di alzare questo valore di soglia.

Sono state testate diverse configurazioni variando metodo e importanza degli input. La metodologia più performante è risultata una *Random Forest*, capace di approssimare con buona accuratezza l’FWI reale basandosi solo sulle due variabili scelte, temperatura massima e precipitazione.

L’analisi è stata organizzata suddividendo i dati in due insiemi distinti: uno destinato all’addestramento del modello e l’altro utilizzato per testarne le capacità predittive. I risultati ottenuti hanno evidenziato una performance molto buona del modello, ritenuta pienamente soddisfacente e sufficiente a procedere con la stima futura dell’FWI sintetico².

² I file utilizzati, così come gli script in linguaggio Python e gli output ottenuti sono riportati negli allegati, corredati da una descrizione dei contenuti (*README.txt*).



Applicazione del modello ai dati climatici futuri

Una volta completato l'addestramento, il modello *Random Forest* è stato applicato ai dati simulati dai modelli climatici dal 1990 al 2100, considerando entrambi gli scenari emissivi RCP 4.5 e RCP 8.5. I modelli utilizzati sono i seguenti, è specificata la coppia modello globale e modello regionale:

- *EC-EARTH_CCLM4-8-17* (Climate Limited-area Modelling Community)
- *EC-EARTH_RACMO22E* (Royal Netherlands Meteorological Institute)
- *EC-EARTH_RCA4* (Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre)
- *MPI-ESM-LR_REMO2009* (Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center, Max Planck Institute for Meteorology)

Questa scelta ha permesso di stimare l'indice FWI sintetico su un arco temporale esteso, confrontando le proiezioni future con i dati osservati del passato recente. L'FWI sintetico è stato calcolato per tre periodi:

- Passato recente: 1991–2020
- Futuro prossimo: 2021–2050
- Futuro lontano: 2071–2100

Analisi del FWI futuro

Gestione dei diversi modelli climatici

Per stimare il comportamento futuro dell'indice FWI, è stato necessario gestire con attenzione la pluralità dei modelli climatici utilizzati. Piuttosto che mediare i risultati dei singoli modelli, si è scelto di valutare prima la loro coerenza per il trentennio 2071-2100 e successivamente di combinare le serie in un'unica sequenza estesa, definita "ensemble concatenato". In questo modo, si preserva integralmente la variabilità e la dinamica giornaliera dei singoli modelli, evitando qualunque forma di mediazione che potrebbe attenuarne le differenze e falsare le successive analisi.

Tra le difficoltà operative principali si segnalano lo sfasamento tra il periodo climatico impiegato dai modelli per la correzione dei bias (1976–2005) e il periodo osservativo effettivamente disponibile per le stazioni ARPAV, che copre approssimativamente dai primi anni '90 ad oggi.

Per quanto riguarda le aggregazioni temporali, le analisi sono state condotte a livello giornaliero, raggruppate per mese, considerando tre distinti trentenni. Questo approccio consente di evidenziare la variabilità stagionale.

Calcolo delle anomalie

L'analisi delle anomalie è finalizzata a valutare come il pericolo di incendio possa evolvere nei decenni futuri in relazione ai cambiamenti climatici attesi. Per ciascuna stazione di monitoraggio, per ogni scenario emissivo considerato, e per ciascun mese e trentennio, è stata calcolata la frequenza con cui il valore simulato dell'indice FWI supera la soglia intermedia corrispondente alle



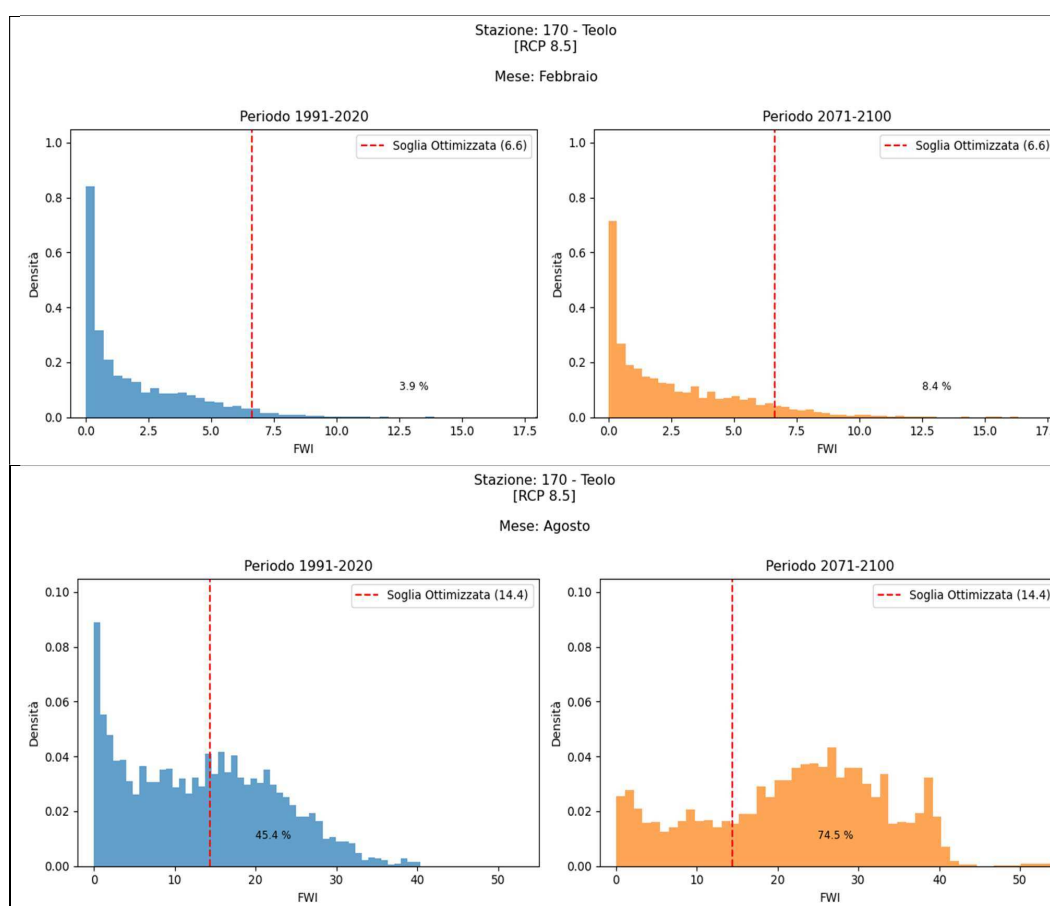
categorie di pericolo Alto o Molto Alto, secondo la classificazione specifica della stazione, individuata col rimodellamento delle soglie.

Questa frequenza costituisce la base per la definizione dell'anomalia, intesa come la differenza tra la condizione futura – sia essa il futuro prossimo (2021–2050) o il futuro lontano (2071–2100) – e quella del passato recente (1991–2020). In termini pratici, l'anomalia rappresenta l'incremento atteso del rischio relativo di incendi severi e permette di confrontare in modo sintetico e comparabile l'evoluzione del pericolo di incendio tra passato e futuro.

A titolo di esempio, la definizione di anomalia può essere rappresentata come segue:

$$A = P(FWI > soglia)_{futuro} - P(FWI > soglia)_{passato}$$

dove $P(FWI > soglia)$ indica la frequenza con cui l'indice FWI supera la soglia intermedia di pericolo Alto o Molto Alto.



I grafici soprastanti mostrano la densità di probabilità nella distribuzione dei valori di FWI per la stazione di Teolo (PD) nel caso di RCP 8.5 e mettendo a confronto il periodo futuro lontano (a destra) con il passato di riferimento (a sinistra). Il primo è relativo al mese invernale di febbraio, il secondo il mese estivo di agosto.



Risalta una differenza nella distribuzione di FWI tra i due periodi dell'anno che nel primo caso (febbraio) ha un picco per valori molto bassi, poi decresce rapidamente; nel secondo caso, nei mesi estivi, il picco sui valori bassi è molto meno accentuato, vista la maggior presenza di giornate calde e asciutte in estate, ed appare invece un secondo picco su valori più alti dell'FWI. Quest'ultimo è poi maggiormente pronunciato nel trentennio a fine secolo (grafico a destra), con valori più elevati dell'FWI e con una "coda" più lunga.

Per rendere conto della differenza tra futuro e passato, si opera la differenza tra i casi che eccedono la soglia di pericolo Alto e Molto Alto nei due intervalli temporali.

Si ottiene quindi nel caso di febbraio:

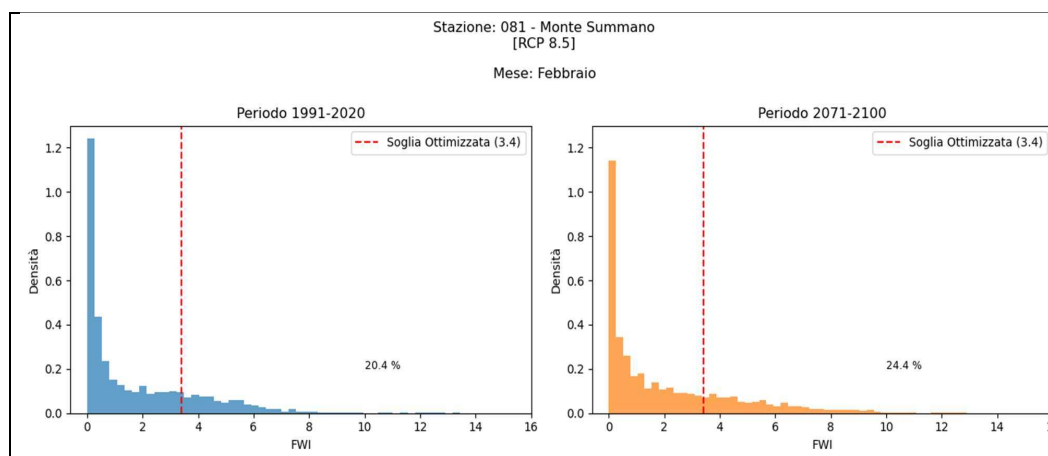
$$P(FWI > soglia)_{passato} = 3.9 \% \quad e \quad P(FWI > soglia)_{futuro} = 8.4 \%$$

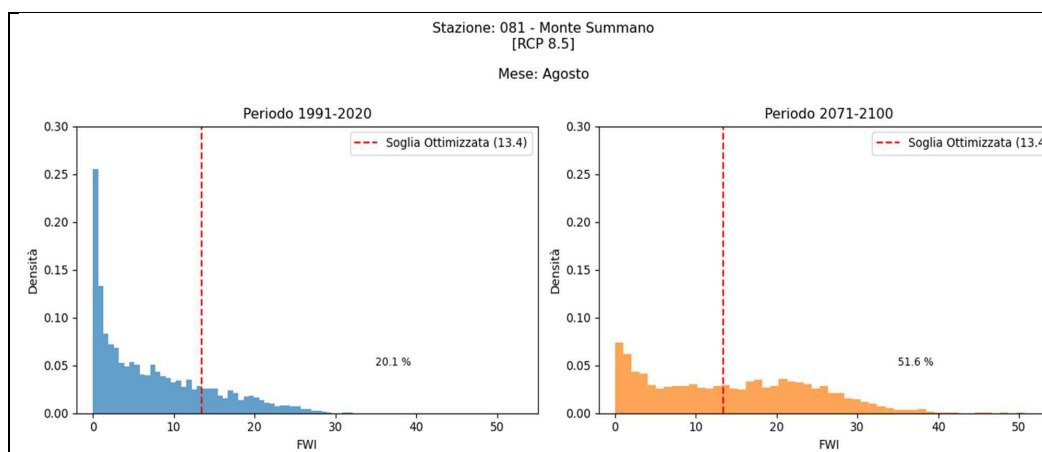
Pertanto l'anomalia corrisponde a un incremento stimato del pericolo di incendi boschivi in febbraio di circa +4.5 % nel futuro lontano rispetto a quanto avviene ora (1991-2020).

Nell'esempio per il mese di agosto invece:

$$P(FWI > soglia)_{passato} = 45.4 \% \quad e \quad P(FWI > soglia)_{futuro} = 74.5 \%$$

Pertanto l'anomalia corrisponde a un incremento stimato del pericolo di incendi boschivi in agosto di circa +29.1 % nel futuro lontano rispetto a quanto avviene ora (1991-2020).





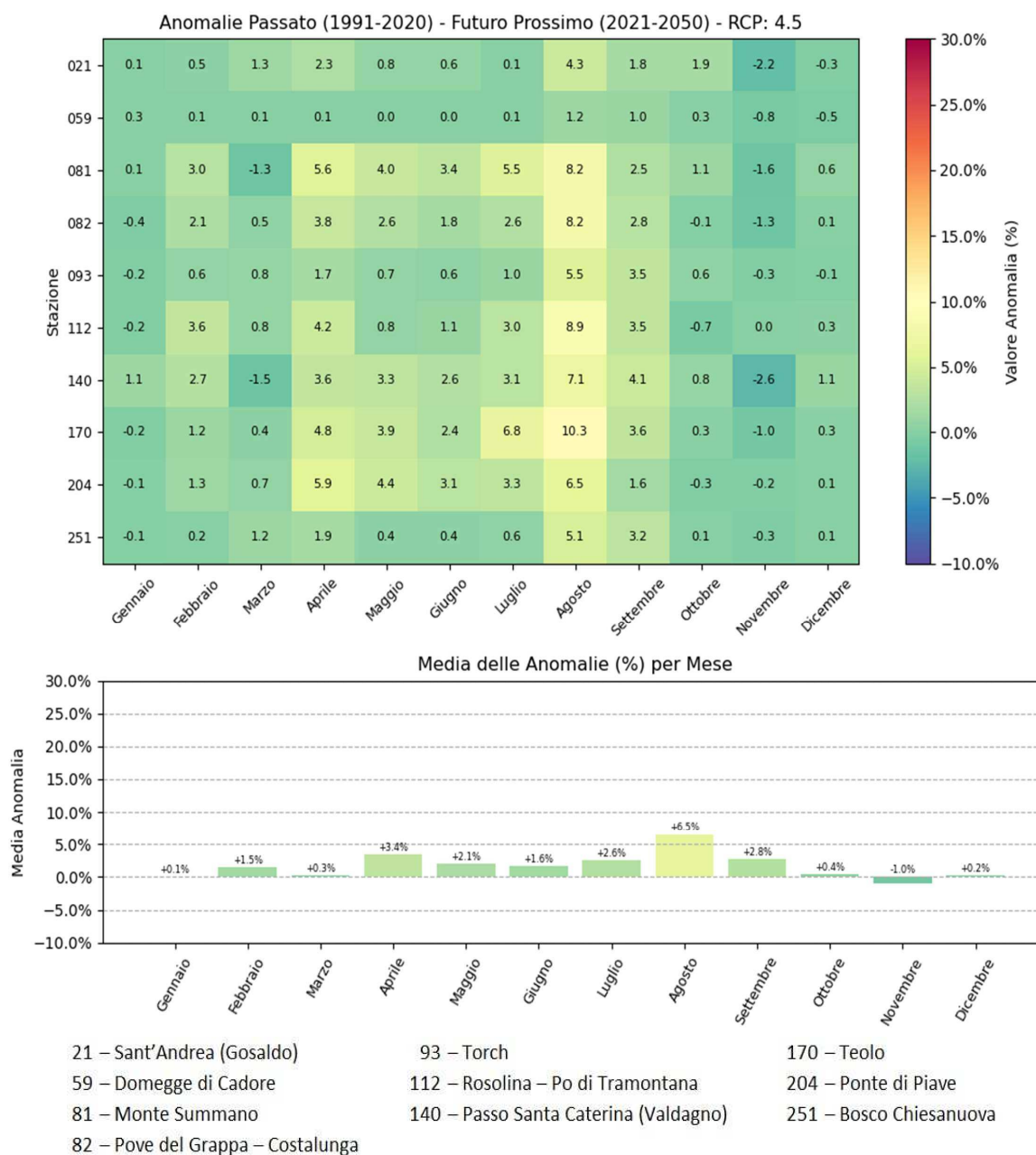
In questo altro esempio è riportato il caso di una stazione montana, in una zona già soggetta ad incendi boschivi durante la stagione invernale, che non evidenzia un sensibile aumento dei casi di pericolo Alto e Molto Alto in febbraio, ma che mostra più che raddoppiati i superamenti della soglia critica nel mese di agosto e nella stagione estiva in generale. Per queste aree, quindi, si aggiungerà in futuro una nuova stagione con elevato pericolo di incendi boschivi

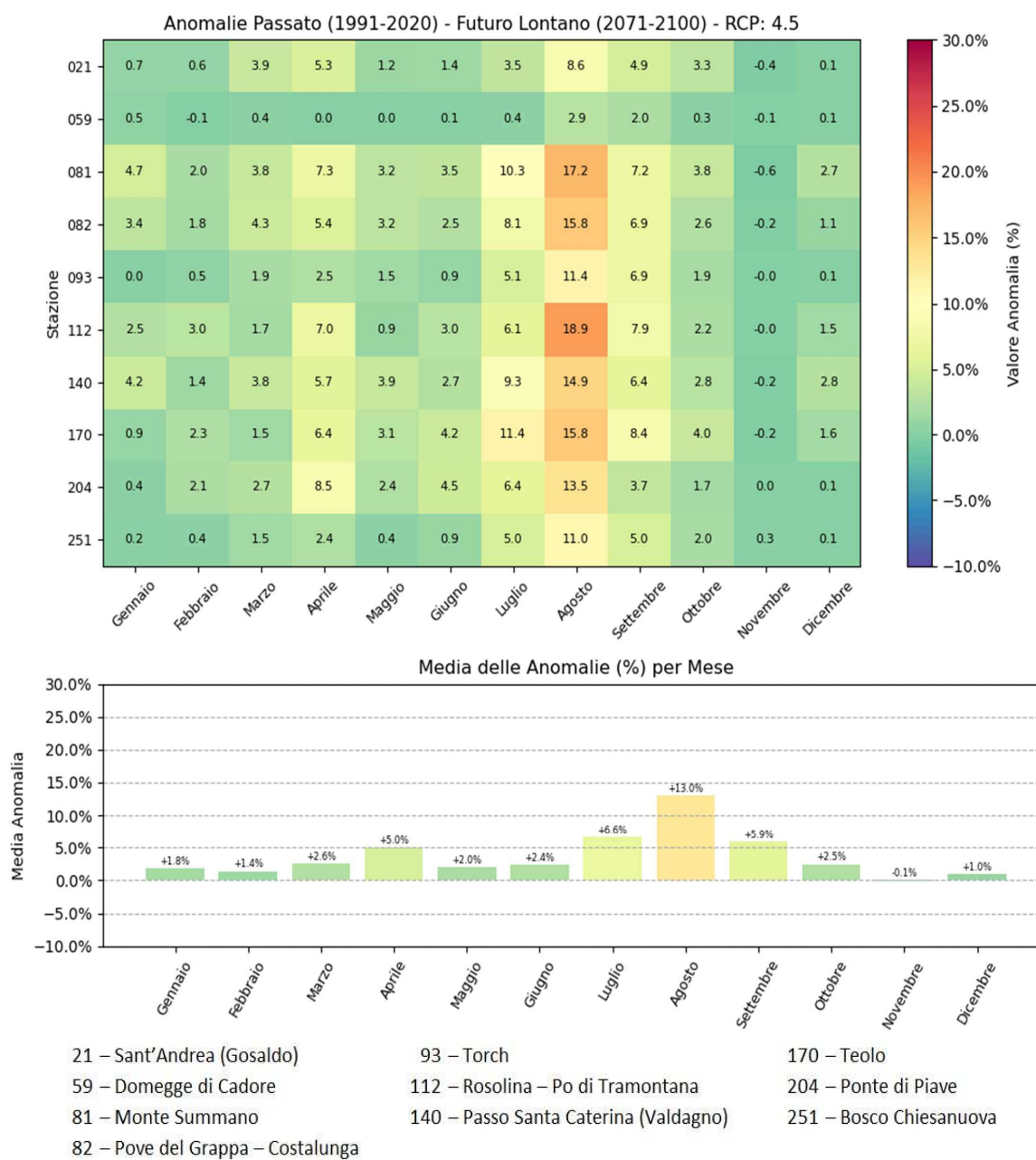
Un aspetto critico da considerare riguarda il fatto che il periodo 1991-2020 include, a partire dal 2006, valori derivanti dalle proiezioni dei modelli climatici, con la conseguenza che gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 non condividono esattamente la stessa base storica. Per motivi di semplicità e data la sostanziale similitudine delle proiezioni nei primi anni dei due scenari, si è deciso di non introdurre correzioni aggiuntive.

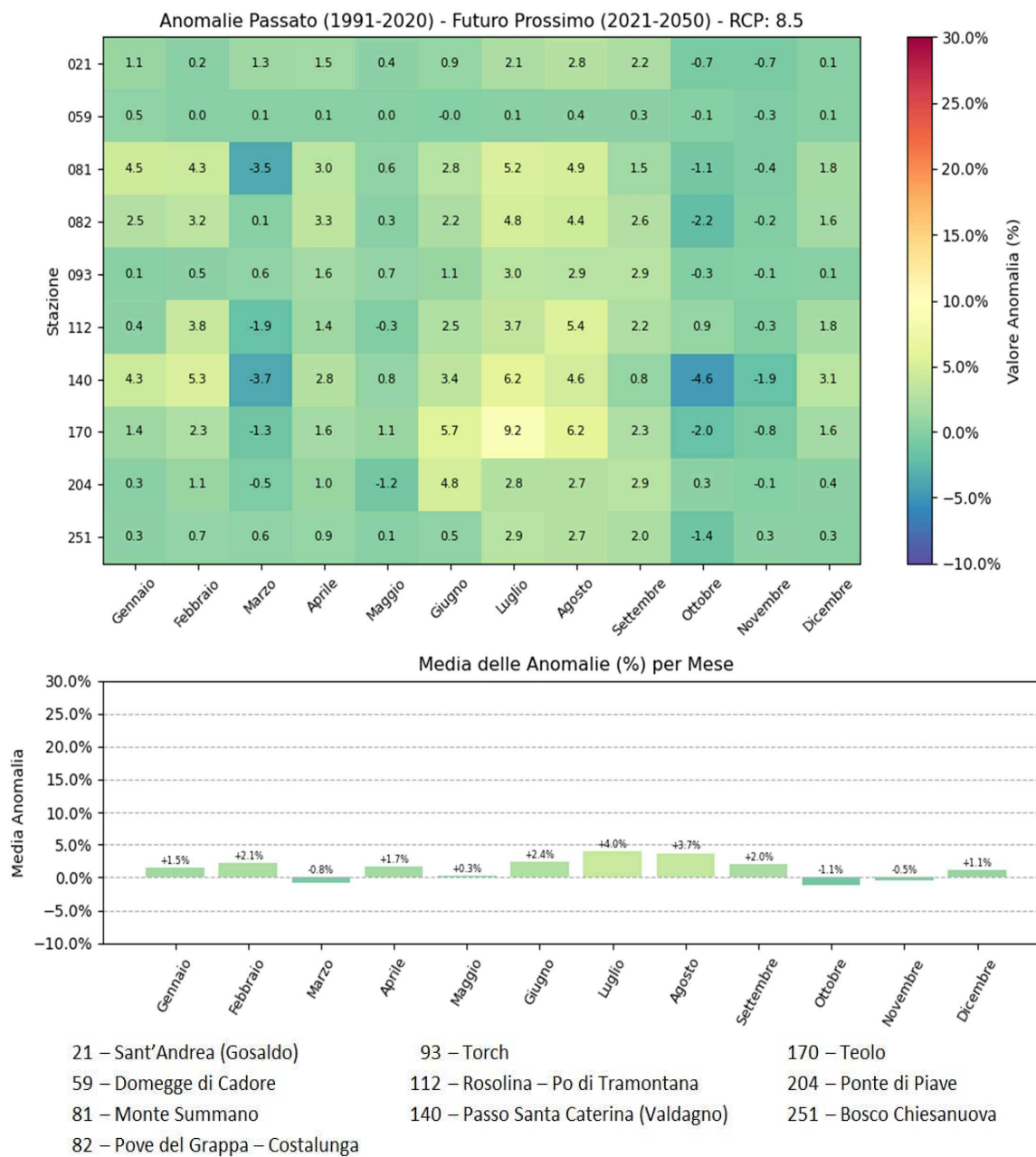


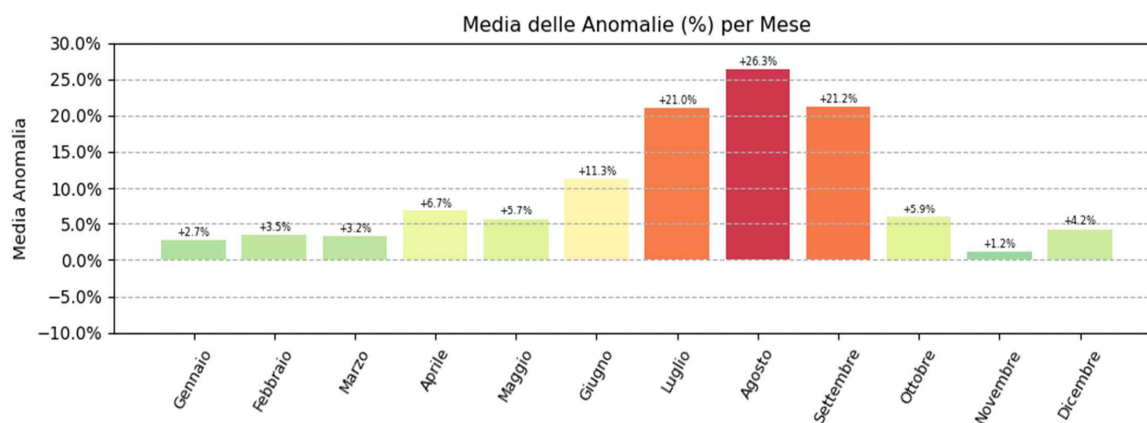
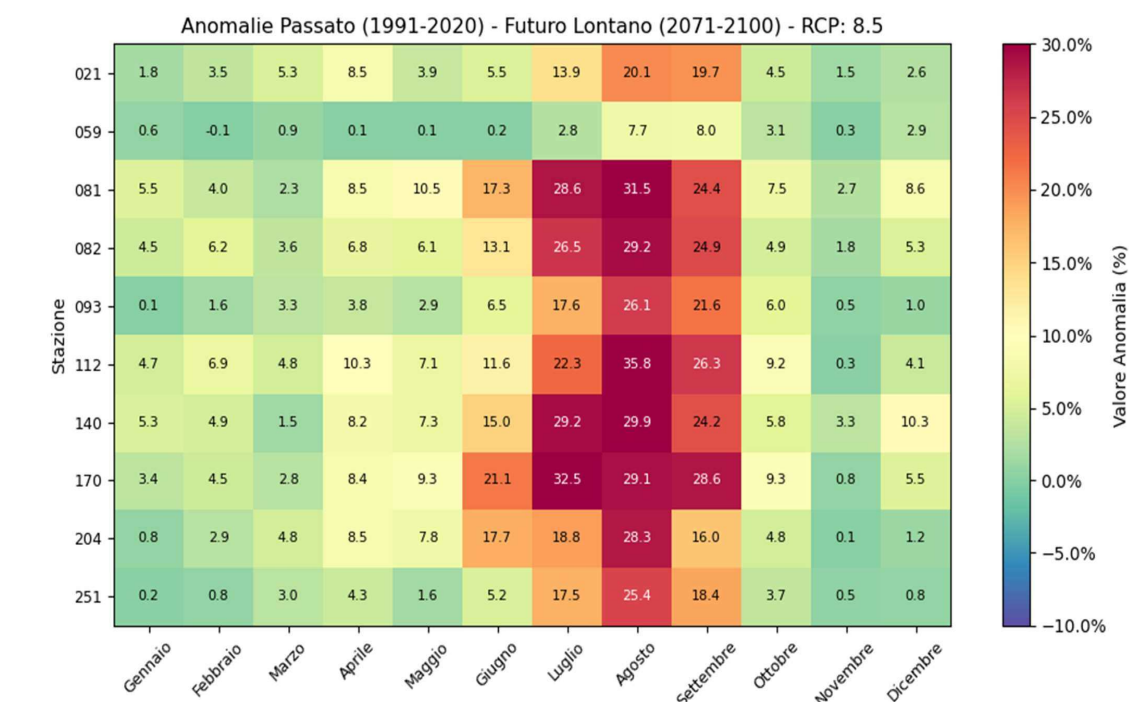
Visualizzazione delle anomalie

I risultati delle anomalie calcolate sono presentati graficamente. Il primo grafico di ciascuna visualizzazione mostra le anomalie tra il passato e il futuro (prossimo o lontano) per uno specifico scenario, riportando le stazioni lungo le righe e i mesi lungo le colonne. Il secondo grafico riporta invece le anomalie medie mensili, offrendo una sintesi aggregata che consente di individuare le stagioni e le aree con i maggiori incrementi di rischio.









21 – Sant'Andrea (Gosaldo)

93 – Torch

170 – Teolo

59 – Domegge di Cadore

112 – Rosolina – Po di Tramontana

204 – Ponte di Piave

81 – Monte Summano

140 – Passo Santa Caterina (Valdagno)

251 – Bosco Chiesanuova

82 – Pove del Grappa – Costalunga



Interpretazione dei risultati

Dall'analisi delle tabelle emergono alcuni segnali chiari e coerenti con le aspettative.

Gli incrementi più marcati del pericolo di incendio si manifestano a fine secolo, in particolare sotto lo scenario RCP 8.5, mentre nel periodo 2021–2050 i segnali risultano più deboli e sostanzialmente simili tra i due scenari emissivi.

In tutti i mesi dell'anno si osserva comunque un aumento dell'incidenza delle classi di pericolo Alto e Molto Alto. Tale incremento è più contenuto nei mesi tardo invernali, che già oggi rappresentano il periodo più critico per gli incendi, mentre diventa nettamente più evidente nei mesi estivi, in particolare a giugno e soprattutto tra luglio, agosto e settembre.

In primavera è il mese di aprile a mostrare gli aumenti più rilevanti, mentre in autunno novembre presenta anomalie minime, prossime allo zero.

Nel complesso, questi risultati indicano che in futuro la stagione estiva tenderà ad affiancarsi sempre più alla tradizionale stagione tardo invernale come periodo critico per il rischio di incendio boschivo sul Veneto.

