

# Sviluppo di metodologie per l'elaborazione di scenari climatici funzionali alla valutazione del rischio idrogeologico e per la caratterizzazione del pericolo d'incendi sul territorio italiano

*Paola Faggian, Arianna Trevisiol, Francesco D'Assisi Apadula, Goffredo Decimi, Andrea Lanza*

2023

*Progetto Resilienza e sicurezza del sistema energetico*

*Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale*



Accordo di programma 2022-2024 con il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica per le attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale.

Progetto Resilienza e sicurezza del sistema energetico

Work Package WP 1 – Analisi e modellazione delle minacce

Linea di Attività LA01.05 – Metodologie per l'elaborazione di scenari climatici finalizzate alla valutazione del rischio idrogeologico e per la caratterizzazione del pericolo di incendi

Codice identificativo RT-2.6-1.05-1

Titolo: Sviluppo di metodologie per l'elaborazione di scenari climatici funzionali alla valutazione del rischio idrogeologico e per la caratterizzazione del pericolo d'incendi sul territorio italiano

Autori: Paola Faggian, Arianna Trevisiol, Francesco D'Assisi Apadula, Goffredo Decimi, Andrea Lanza

Verificatori: Elena Collino

Approvatori: Michele de Nigris, Giovanni Pirovano

Tipologia di documento: RAPPORTO

Data di emissione: 29/12/2023

Note: prima emissione

© Copyright 2023 by Ricerca sul Sistema Energetico-RSE S.p.A.

Contributo/i liberamente utilizzabile/i a condizione che venga chiaramente e visibilmente citata la società titolare.

Per la tutela dell'ambiente, prima di stampare questo documento pensa bene se è veramente necessario.



## INDICE

|                                                                                                                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INDICE .....</b>                                                                                                                                                             | <b>3</b>  |
| <b>SOMMARIO.....</b>                                                                                                                                                            | <b>4</b>  |
| <b>1 - INTRODUZIONE .....</b>                                                                                                                                                   | <b>5</b>  |
| <b>2 - SCENARI CLIMATICI FUNZIONALI ALLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO SUL TERRITORIO ITALIANO .....</b>                                                                | <b>8</b>  |
| 2.1 Introduzione e stato dell'arte .....                                                                                                                                        | 8         |
| 2.2 Rischio Idrogeologico in Italia .....                                                                                                                                       | 10        |
| 2.3 Metodologia e Dataset.....                                                                                                                                                  | 14        |
| 2.3.1 Calcolo di indici di estremi climatici .....                                                                                                                              | 14        |
| 2.3.2 Indice Geomorfico di Inondazione - GFI .....                                                                                                                              | 15        |
| 2.4 Analisi dei risultati .....                                                                                                                                                 | 17        |
| 2.4.1 Precipitazioni estreme - R99pTOT.....                                                                                                                                     | 17        |
| 2.4.2 Storm - STO.....                                                                                                                                                          | 18        |
| 2.4.3 Indice Geomorfico di Inondazione - GFI .....                                                                                                                              | 21        |
| <b>3 - SCENARI CLIMATICI FUNZIONALI ALLA CARATTERIZZAZIONE DEL PERICOLO D'INCENDI SUL TERRITORIO ITALIANO .....</b>                                                             | <b>29</b> |
| 3.1 Introduzione e stato dell'arte.....                                                                                                                                         | 29        |
| 3.2 Dataset e Metodologia per l'analisi del vento forte.....                                                                                                                    | 33        |
| 3.3 Analisi della climatologia di riferimento .....                                                                                                                             | 34        |
| 3.4 Analisi delle mappe di probabilità .....                                                                                                                                    | 36        |
| <b>4 - CONCLUSIONI .....</b>                                                                                                                                                    | <b>41</b> |
| <b>5 - BIBLIOGRAFIA .....</b>                                                                                                                                                   | <b>43</b> |
| <b>6 - APPENDICE: AGGIORNAMENTO SITO CLIMED .....</b>                                                                                                                           | <b>48</b> |
| 6.1 Descrizione del sito .....                                                                                                                                                  | 48        |
| 6.2 Realizzazione del sito web .....                                                                                                                                            | 49        |
| <b>7 - APPENDICE: STUDIO DEGLI EVENTI ANOMALI REGISTRATI NELLA STAZIONE DI MISURA DEL PLATEAU ROSA, PARTECIPAZIONE AL PROGETTO ICOS E AGGIORNAMENTO DEL SITO WEB OASI. ....</b> | <b>51</b> |
| 7.1 Studio degli eventi anomali registrati nella stazione di misura del Plateau Rosa .....                                                                                      | 51        |
| 7.1.1 Identificazione degli eventi estremi di concentrazione di CO <sub>2</sub> .....                                                                                           | 52        |
| 7.1.2 Il caso studio del 8 novembre 2017 .....                                                                                                                                  | 52        |
| 7.1.3 Risultati delle simulazioni con FLEXPART-WRF.....                                                                                                                         | 52        |
| 7.1.4 Confronto con il modello MILORD .....                                                                                                                                     | 55        |
| 7.1.5 Considerazioni finali .....                                                                                                                                               | 56        |
| 7.2 Partecipazione al progetto ICOS .....                                                                                                                                       | 56        |
| 7.3 Sito web OASI .....                                                                                                                                                         | 58        |
| <b>8 - ACRONIMI .....</b>                                                                                                                                                       | <b>61</b> |



## SOMMARIO

A supporto delle attività di pianificazione per rafforzare la resilienza del sistema energetico italiano ai cambiamenti climatici, sono stati prodotti scenari di precipitazioni estreme e vento forte funzionali alla valutazione del rischio idrogeologico e degli incendi. Infatti, le precipitazioni estreme sono all'origine di alluvioni e frane e il vento è una delle variabili meteorologiche che può favorire l'innesco e la propagazione degli incendi. Gli scenari futuri, a diversi orizzonti temporali nel XXI secolo, sono stati generati dai risultati di alcuni modelli climatici Euro-CORDEX in tre differenti percorsi emissivi e, per descrivere la climatologia storica, sono state considerate anche le rianalisi meteorologiche.

Relativamente al rischio idrogeologico, si è caratterizzato il territorio italiano tramite l'indice  $R_{99pTOT}$  che quantifica la percentuale delle precipitazioni in giorni estremamente piovosi (precipitazioni superiori al 99° percentile del periodo di riferimento) e l'indice *Storm* (STO), che intercetta la concomitanza di precipitazioni estreme e venti moderati/forti. I risultati indicano un probabile aumento in frequenza delle precipitazioni a carattere distruttivo, specialmente in Pianura Padana e sulle coste orientali e di tempeste nel Centro-nord Italia. Inoltre, è stata svolta un'indagine in un'area test del bacino del Po stimando, con la tecnica *Extreme Value Analysis* (EVA), le variazioni dei tempi di ritorno delle piogge associate a tempi di ritorno di 20, 200 e 500 anni. Nonostante alcuni limiti della metodologia, si evidenzia una tendenza a lungo termine alla riduzione dei suddetti tempi, con conseguente aumento della probabilità di inondazioni. Circa il rischio incendi, è stata studiata l'evoluzione degli episodi di vento forte mediante l'EVA. L'analisi, fatta a diversi livelli di intensità, non evidenzia segnali significativi di cambiamento del regime anemologico. Quindi, l'impatto del vento sulle variazioni del rischio di incendi sarà ridotto rispetto a quello causato dall'innalzamento delle temperature e dalle modifiche del regime pluviometrico.

Si descrive inoltre l'aggiornamento del sito web CLIMED, sviluppato per diffondere i risultati relativi ai diversi scenari di cambiamenti climatici. Infine, si riporta lo studio di alcuni eventi anomali di concentrazione di  $CO_2$  registrati presso la stazione di Plateau Rosa e la descrizione delle attività condotte nell'ambito del Progetto ICOS e quelle relative all'aggiornamento del sito web OASI.

Keywords: scenari climatici, modelli Euro-CORDEX, piogge estreme, venti forti, tempi di ritorno.



## 1 - INTRODUZIONE

La presente attività di ricerca si colloca nel piano triennale di Ricerca di Sistema 2022-2024 all'interno del Progetto 2.6 "Resilienza e sicurezza del sistema energetico" (WP 1 – Analisi e modellazione delle minacce; LA01.05 – Metodologie per l'elaborazione di scenari climatici finalizzate alla valutazione del rischio idrogeologico e per la caratterizzazione del pericolo di incendi), ed è dedicata allo studio, a carattere climatologico, delle minacce per il sistema elettro-energetico nazionale, strettamente legate ai fenomeni meteorologici.

C'è sempre maggior consapevolezza del fatto che il clima sta cambiando e che gli eventi meteorologici estremi (come tempeste, inondazioni, ondate di calore e siccità) sono in costante aumento. Le variazioni graduali delle variabili climatiche medie possono avere importanti impatti ambientali, economici e sociali, ma sono i cambiamenti degli eventi estremi che rappresentano i pericoli più gravi. Infatti, i loro impatti su attività umane, ecosistemi e infrastrutture stanno avendo conseguenze sempre più pesanti, spesso con perdite di vite umane, oltre che gravi disastri ambientali e alti costi economici [1].

Considerando il fatto che i cambiamenti climatici rappresentano e rappresenteranno in futuro una delle sfide più rilevanti da affrontare a livello globale, nonché nazionale, il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica ha pubblicato a Dicembre 2023 l'aggiornamento del Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC) [2] che ha, come obiettivo principale, quello di "fornire un quadro di indirizzo nazionale per l'implementazione di azioni finalizzate a ridurre al minimo possibile i rischi derivanti dai cambiamenti climatici, a migliorare la capacità di adattamento dei sistemi socioeconomici e naturali, nonché a trarre vantaggio dalle eventuali opportunità che si potranno presentare con le nuove condizioni climatiche".

L'Italia si trova nel cosiddetto "*hot spot mediterraneo*" [3] [4], un'area identificata come particolarmente vulnerabile ai cambiamenti climatici in quanto il territorio nazionale, oltre ad essere un'area - come l'intera Europa - soggetta ad un riscaldamento maggiore rispetto al riscaldamento medio globale [5], è notoriamente soggetta a numerosi rischi naturali, come fenomeni di dissesto, alluvioni, erosione delle coste, carenza idrica. Infatti, uno degli impatti i più rilevanti del riscaldamento globale sull'area mediterranea è quello sul ciclo idrologico rappresentato da un'esacerbazione del divario fra Nord e Sud del bacino, con un Settentrione caratterizzato sempre più da piogge estreme e un Meridione colpito da periodi siccitosi sempre più lunghi [5]. Ciò ha ripercussioni, da un lato, sul pericolo idrogeologico, perché precipitazioni eccezionali sono all'origine di alluvioni e frane e, dall'altro, sul pericolo incendi, che aumenta durante periodi siccitosi e ondate di calore.

Relativamente al rischio idrogeologico, in base alle più recenti pubblicazioni dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) [6] il 94% dei comuni italiani (7.423) è a rischio per frane, alluvioni e/o erosione costiera. Di fatto, oltre il 18% (55.609 km<sup>2</sup>) del territorio italiano è classificato a pericolosità elevata o molto elevata per frane (interessando potenzialmente una popolazione di 1,3 milioni di abitanti), e/o a pericolosità idraulica media per alluvione (coinvolgendo 6,8 milioni di abitanti). Relativamente alle attività produttive, ISPRA aggiunge che "le industrie e i servizi ubicati in aree a pericolosità da frana elevata e molto elevata sono oltre 84.000 con 220.000 addetti esposti a rischio; quelli esposti al pericolo di inondazione sono oltre 640.000".

Per quanto riguarda il pericolo di incendi, L'Organizzazione meteorologica mondiale (WMO, *World Meteorological Organization*) ha certificato, con la collaborazione di Copernicus<sup>1</sup>, che il 2023 è stato l'anno più caldo di sempre e, di fatto, gli incendi che hanno colpito il nostro Paese nell'estate 2023 sono stati particolarmente numerosi e devastanti. In una recente pubblicazione [7], ISPRA analizza gli incendi verificatisi nel periodo 1° gennaio – 31 agosto 2023 e afferma che risulta in aumento l'estensione delle aree percorse da grandi incendi boschivi in Italia: "quasi

<sup>1</sup> <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services>



superati 68.700 ettari, di cui oltre 10.274 ettari coperti da ecosistemi forestali (15%). Gli ecosistemi forestali maggiormente coinvolti risultano, con buona approssimazione, porzioni di macchia mediterranea e boschi di leccio (61%) e superfici ricoperte da boschi e rimboschimenti di conifere (21%)”.

Relativamente al costo degli impatti economici dei cambiamenti climatici, Forzieri et al. [8] evidenziano che esso è destinato ad aumentare in modo significativo nei prossimi decenni a causa degli eventi meteorologici estremi in crescita; in particolare, i ricercatori valutano per le infrastrutture critiche dell'Europa, una crescita di un fattore 6 a metà secolo (2041–2070), di 10 volte a fine secolo (2071–2100) rispetto ai danni del periodo *base-line* 1981–2010, stimati in circa 3.4 miliardi di euro. L'aumento maggiore dei danni e dei costi associati è previsto per il settore energetico, per il quale l'ammontare di 0,5 miliardi di euro all'anno stimato nel trentennio passato, potrebbe salire a 4,2 miliardi di euro all'anno entro il 2050 e 8,2 miliardi di euro all'anno entro il 2080 (quindi, rispettivamente di un fattore 8 e 16).

È quindi evidente l'importanza di attuare azioni di adattamento nel settore energetico nazionale per far fronte ai rischi provocati dai cambiamenti climatici, tenendo conto anche che è stimata in aumento la domanda mondiale di energia nei prossimi decenni [9].

Come chiaramente espresso nel PNACC la pianificazione di azioni di adattamento efficaci necessita di:

1. una base di conoscenza dei fenomeni che sia messa a sistema;
2. un contesto organizzativo ottimale;
3. una *governance* multilivello e multisettoriale.

Per rispondere in modo adeguato al primo punto, è fondamentale disporre di informazioni meteorologiche e climatiche customizzate rispetto agli *stakeholders* nei diversi ambiti, in particolare quello energetico. Pertanto, l'attività di ricerca 2022–2024 è condotta con l'obiettivo di fornire per il 21° secolo stime ragionevoli riguardo le variazioni degli estremi climatici che rappresentano importanti minacce per il sistema elettrico nazionale. Questo è un tema, peraltro, di grande interesse per i gestori delle reti di trasmissione e distribuzione, “chiamati” a pianificare interventi sulla rete per rafforzarne la resilienza, una volta individuate le aree critiche, a diversi orizzonti e per diversi gradi di intensità [10]. Tali informazioni costituiscono anche i dati richiesti in *input* dal modello di vulnerabilità Terna-RSE [11].

Scopo dell'attività del triennio è quindi produrre, per le minacce di interesse, scenari climatici sul territorio nazionale, caratterizzandoli sia spazialmente che temporalmente attraverso mappe a diversi orizzonti temporali. Poiché l'intensità e la frequenza dei fenomeni sono strettamente dipendenti dalle diverse condizioni climatiche e queste variano significativamente per effetto delle forzanti antropogeniche, gli scenari futuri sono elaborati a partire dai risultati delle simulazioni dei modelli climatici realizzate nell'ambito di progetti internazionali, sotto diverse configurazioni, i cosiddetti *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Essi, infatti, descrivono diverse ipotesi di sviluppo socioeconomico a scala globale [12]. Tipicamente, si considerano tre ipotesi RCPs: RCP2.6, caratterizzato da una forte mitigazione di gas ad effetto serra (*Green House Gases* -GHG), ovvero basse emissioni; RCP4.5 mitigazione parziale di GHG; RCP8.5 senza mitigazione, ovvero alte emissioni di GHG. Si osservi che, dalle analisi fatte sulla base delle misure di gas serra acquisite dalla stazione di Plateau Rosa, è emerso che gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sono i più rappresentativi tra quelli ipotizzati [13].

I modelli climatici considerati sono un sottoinsieme dei modelli regionali sviluppati nell'ambito del Progetto EU Euro-CORDEX [14]. Come già fatto nell'attività precedente [13], lo studio considera i risultati di ogni singolo modello ma, come raccomandato dalla comunità scientifica internazionale [15], si privilegia l'analisi dell'*ensemble* dei modelli, in quanto i risultati multi-modello sono statisticamente più robusti. Inoltre, elaborando scenari generati sotto diverse ipotesi RCP, si rende possibile valutare il *range* di variabilità delle variazioni attese e stimare l'incertezza dei risultati rispetto alle diverse forzanti antropogeniche.



Tra le minacce che hanno provocato, nell'ultimo decennio, notevoli danni alle infrastrutture elettriche ci sono le nevicate umide. Infatti, in tali condizioni meteorologiche è facile la formazione di manicotti di neve, il cui peso può crescere tanto da sollecitare l'infrastruttura elettrica al di sopra dei limiti di progetto e creare così guasti e disservizi (si ricordi, in particolare, l'episodio del 17 gennaio 2017 in Abruzzo).

Nel 2022 in LA 1.02 - Proiezioni climatiche per lo studio di eventi estremi impattanti sul sistema elettrico- sono stati studiati gli eventi di nevicate umide in frequenza e intensità a scala climatologica. In particolare, con lo sviluppo e l'implementazione del modello di accrescimento dei manicotti di neve umida sulle linee elettriche CLIWAC [16], sono stati elaborati scenari di carico di manicotto sulle linee di alta tensione a diversi orizzonti temporali fino al 2100. L'analisi fatta attraverso l'*Extreme Value Analysis* (EVA) e il calcolo di opportuni indici di frequenza (WSLD e WSLF) ha indicato che i fenomeni di *wet-snow* tenderanno mediamente a diminuire. [13] [16].

Nell'analisi dei fenomeni che possono mettere a rischio il sistema elettrico, da non sottovalutare sono le precipitazioni estreme che possono causare alluvioni e frane (rischio idrogeologico) con impatti devastanti non solo per la popolazione, l'ambiente e l'economia in generale, ma anche con danni consistenti alle infrastrutture elettriche (quali, ad esempio, le cabine primarie o secondarie). Altro fenomeno meteorologico che può diventare una minaccia per il settore elettrico è il vento. Quando, infatti, supera valori dell'ordine dei 100 km/h, il vento può avere forti impatti sulle linee elettriche con danni diretti provocando il crollo di tralicci o indiretti per la caduta piante sulle linee aeree. Inoltre, le giornate ventose rappresentano condizioni di pericolo di portata ancora più vasta favorendo le condizioni di innesco e, soprattutto, di propagazione degli incendi.

Con l'obiettivo di sviluppare una metodologia per la trattazione a scala nazionale del rischio idrogeologico e del rischio d'incendi a diversi orizzonti temporali, l'attività del 2023 ha riguardato la trattazione delle precipitazioni e del vento, essendo le più importanti variabili meteorologiche che concorrono alla determinazione delle due minacce appena menzionate. A tale scopo sono stati elaborati diversi scenari climatici attraverso il calcolo di alcuni indici di estremi climatici aggiornati allo stato dell'arte, nonché l'applicazione dell'EVA su specifici bacini dell'Italia Nord-Occidentale, evidenziando punti di forza e di criticità in vista delle analisi da condurre nel 2024. Relativamente al vento, è stata affinata l'analisi del vento forte condotta negli anni precedenti. A tal fine, è stata investigata l'evoluzione del vento massimo giornaliero utilizzando anche tre diversi *dataset* di rianalisi messi a confronto coi succitati modelli Euro-CORDEX per caratterizzare la climatologia di riferimento, anche tramite l'EVA, e individuare la metodologia per lo sviluppo di scenari futuri.

Nel prossimo anno l'attività di ricerca sarà perfezionata in base ai risultati della ricerca svolta nel 2023, considerando ulteriori sviluppi metodologici e *dataset* climatici per lo studio del rischio idrogeologico e le diverse componenti fisiche che, nel loro insieme, concorrono al pericolo di innesco e al rischio di propagazione per la minaccia incendi.

Il documento è organizzato come segue: nel Capitolo 1 è stato illustrato un breve inquadramento dell'attività di ricerca nel suo complesso. I Capitoli 2 e 3 trattano rispettivamente gli scenari climatici funzionali alla valutazione del rischio idrogeologico e del pericolo di incendi. In entrambi i capitoli, dopo un'ampia descrizione delle problematiche che contraddistinguono le due minacce, si presentano rispettivamente le analisi riguardanti le precipitazioni estreme e il vento forte. Infine, le conclusioni sono esposte nel Capitolo 5.

Seguono due Appendici: in APPENDICE 6 -viene descritto l'aggiornamento del sito CLIMED (*CLimate analysis over MEDiterranean Region*), un sito Web GIS sviluppato per diffondere i risultati relativi ai cambiamenti climatici in termini di scenari a diversi orizzonti temporali relativi sia alle variazioni medie delle variabili meteorologiche che alle variazioni degli estremi climatici.

In APPENDICE 7 - si riporta lo studio relativo agli eventi anomali registrati nella stazione di misura del Plateau Rosa e, inoltre, una descrizione delle attività condotte nell'ambito del Progetto ICOS, nonché l'aggiornamento del Sito WEB OASI.

## 2 - SCENARI CLIMATICI FUNZIONALI ALLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO SUL TERRITORIO ITALIANO

### 2.1 Introduzione e stato dell'arte

L'attività di ricerca sul rischio idrogeologico in ambito climatico sul territorio italiano ha previsto una fase preliminare di ricerca bibliografica al fine di verificare lo stato dell'arte e definire, di conseguenza, le metodologie più aggiornate ed efficaci allo scopo prefissato. Si riporta nel seguito una breve rassegna degli studi più interessanti e significativi.

Dal punto di vista metodologico, la letteratura a disposizione indica due approcci principali: il primo basato su indici di estremi climatici, definiti a partire dalle variabili meteorologiche (*in primis* temperatura e precipitazione) [18] [19] e il secondo sull'applicazione di modelli idrologici distribuiti, con differenti livelli di complessità ed estensione (dal singolo bacino all'intero territorio di una nazione). In questo ultimo caso, i modelli climatici globali o regionali sono accoppiati con modelli idrologici assumendo schemi di descrizione della superficie terrestre e uso del suolo [20] [21] [22]. I risultati più promettenti si ottengono quando il modello idrologico è guidato da dati climatologici a scala sub giornaliera perché riescono a riprodurre meglio gli estremi di flusso [23] e a descrivere la fenomenologia anche per i bacini idrografici più piccoli, i quali hanno brevi tempi di corrivazione e sono più esposti a impatti dovuti a piogge intense ma limitate nel tempo [24].

Alcuni studi sono condotti combinando entrambi gli approcci, cioè considerando l'evoluzione in futuro sia di indici climatici di precipitazione estrema, sia di indicatori definiti a partire dagli output del modello idrologico, come ad esempio valori medi o di picco del deflusso fluviale a differenti scale temporali [24] [25] [26]. Da tutti questi studi emerge che le variazioni dell'uso del suolo e i cambiamenti climatici sono gli elementi che avranno i maggiori impatti sul regime pluviometrico a livello globale nel futuro [22] [27]. In alcuni casi studio [25] [26] [27], il territorio di un bacino idrografico è suddiviso in aree appartenenti a differenti classi di pericolo di inondazione in base ai valori assunti da un indice ottenuto combinando le informazioni sulle variazioni attese di intensità di precipitazione, deflusso e uso del suolo con informazioni statiche come, ad esempio, l'elevazione e la pendenza del terreno e la distanza dalla rete di drenaggio.

Relativamente al primo approccio, in base alla letteratura disponibile, la rassegna di Panday e Kumar [19] stila un elenco degli indici di estremi climatici, tra quelli definiti dall'Organizzazione Mondiale della Meteorologia (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices* - ETCCDI) [28], che risultano più significativi per studiare gli impatti dei cambiamenti climatici sugli estremi idrologici. L'elenco riadattato è riportato in Tabella 2.1.

A questi indici si aggiunge l'indice di Fournier nella sua versione originale (FI) e modificata (MFI) [29] (Formule 2.1 e 2.2), per stimare indirettamente l'aggressività e, quindi, il potenziale effetto erosivo della precipitazione [25] [26].

$$FI = \frac{R_{mx}^2}{R_a} \quad 2.1$$

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{R_i^2}{R_a} \quad 2.2$$

dove  $R_{mx}$  è la precipitazione media nel mese più piovoso dell'anno;  $R_a$  la precipitazione media annuale ed  $R_i$  la precipitazione media dell' $i$ -esimo mese.

Valori elevati di FI ed MFI indicano che la precipitazione ha carattere severo e può determinare smottamenti ed erosione. In letteratura sono stati identificati opportuni intervalli di valori per FI ed MFI da associare a classi di erosività, come riportato in Tabella 2.2.

**Tabella 2.1 – Principali indici climatici che influenzano gli estremi idrologici (estratto e adattato [19]).**

| Sigla   | Nome Descrittivo                                                                                                                          |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DD      | Numero di giorni asciutti consecutivi (Dry Days)                                                                                          |
| R20mm   | Numero di giorni di precipitazione intensa ( $R \geq 20$ mm)                                                                              |
| R50mm   | Numero di giorni di precipitazione molto intensa ( $R \geq 50$ mm)                                                                        |
| RX      | Massimo di precipitazione                                                                                                                 |
| RX5D    | Massimo di precipitazione cumulata in 5 giorni                                                                                            |
| R95P    | Percentuale di giorni con precipitazione superiore al 95° percentile di un periodo di riferimento                                         |
| R95pTOT | Percentuale di precipitazione annua caduta nei giorni con precipitazione superiore al 95° percentile rispetto a un periodo di riferimento |
| R99pTOT | Percentuale di precipitazione annua caduta nei giorni con precipitazione superiore al 99° percentile rispetto a un periodo di riferimento |
| PRCPTOT | Precipitazione totale nei giorni piovosi                                                                                                  |
| TX10p   | Numero di giorni freddi (Temperatura massima $T_x < 10^\circ$ percentile rispetto a un periodo di riferimento)                            |
| TX90p   | Numero di giorni caldi ( $T_x > 90^\circ$ percentile rispetto a un periodo di riferimento)                                                |
| TN90p,  | Numero di notti calde (Temperatura minima $T_n > 90^\circ$ percentile rispetto a un periodo di riferimento)                               |
| SU      | Numero di Giorni caldi (SUMmer Days, $T_x > 25^\circ\text{C}$ )                                                                           |
| CSU     | Massimo numero di SU consecutivi                                                                                                          |

**Tabella 2.2 – Classi di erosività secondo FI ed MFI (modificato da [29]).**

| Classe di Erosività | FI       | MFI       |
|---------------------|----------|-----------|
| Molto bassa         | 0 – 20   | 0 – 60    |
| Bassa               | 20 – 40  | 60 – 90   |
| Moderata            | 40 – 60  | 90 – 120  |
| Severa/Alta         | 60 – 80  | 120 – 160 |
| Molto severa/alta   | 80 - 100 | > 160     |
| Estremamente severa | > 100    | /         |

Relativamente alla valutazione degli impatti sul settore elettrico, sempre nell'ambito del progetto 2.06, nella LA 1.06 - Verifica e messa a punto di metodologie finalizzate alla stima della pericolosità di allagamento e delle frane superficiali, si sta sviluppando un metodo speditivo per la caratterizzazione del territorio italiano tramite valori di soglia dell'indice geomorfico di inondazione GFI (Formula 2.3; [30]), riconducibile a 3 differenti tempi di ritorno di inondazioni, analogamente a quanto stabilito dalla Direttiva Alluvioni (2007/60/CE) (cfr. §2.2). Dal dato di GFI è possibile ricavare, a posteriori, l'altezza d'acqua attesa [31] e, quindi, l'esposizione di cabine, stazioni e piloni della rete elettrica.

Attualmente si sta effettuando un test del metodo su un'area campione dell'asta del fiume Po nel nord-ovest italiano.

$$GFI = \ln \left( \frac{h_r}{H} \right)$$

2.3

con (cfr. Figura 2.1):

$$h_r \approx b \cdot (A_r)^n;$$

$H$  = differenza di quota in metri tra il punto da caratterizzare di un bacino e la confluenza in alveo del corso d'acqua seguendo il più vicino percorso idrologico;

$A_r$  = superficie dell'area contribuyente, in  $\text{km}^2$ , alla sezione del corso d'acqua  $r$  (river);

$b, n$  due coefficienti di calibrazione.

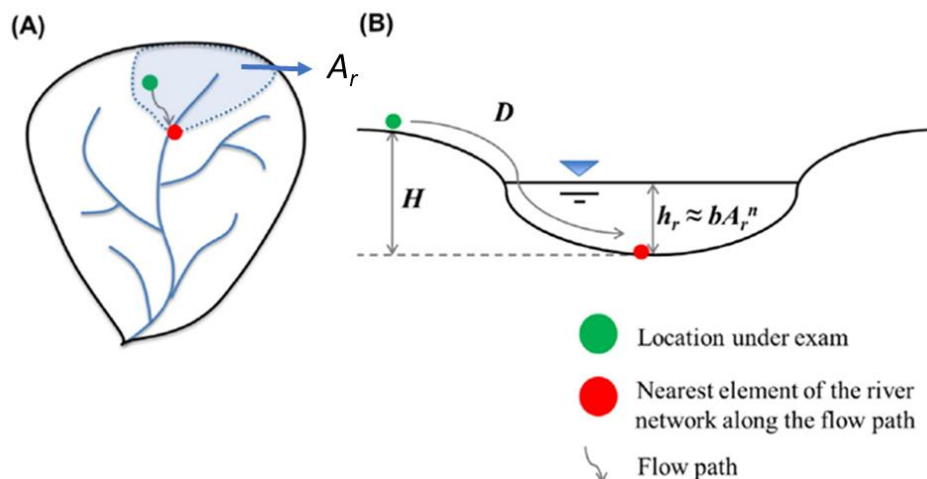


Figura 2.1 – Rappresentazione grafica delle principali grandezze che servono a determinare GFI (Formula 2.3) in un punto (pallino verde) di un bacino idrografico (A) in pianta; B) in sezione) [estratto da Samela et al. 2017].

Oltre a questo metodo speditivo, con riferimento allo stato dell'arte, si sta implementando in RSE un modello idrologico distribuito ad alta risoluzione, basato su WRF-Hydro, all'interno della LA. 1.04 - Affinamento della rianalisi meteorologica e idrologica a supporto del sistema elettrico nazionale per l'individuazione delle minacce atmosferiche e al suolo. In questa prima fase, il modello è guidato da rianalisi meteorologica per la simulazione di eventi nel passato e la sua calibrazione [32].

Relativamente agli scenari futuri attesi per il continente europeo, i risultati degli studi sviluppati con modelli idrologici che utilizzano in ingresso i dati dei modelli climatici regionali indicano un generale aumento della frequenza di alluvione sull'Europa centrale [33] [34] [35]. I bacini di piccole dimensioni in Europa, sia centrale sia meridionale, sarebbero interessati anche da un incremento in intensità dovuto a precipitazioni estreme di tipo convettivo. Di converso, la diminuzione dell'accumulo nevoso nei più grandi bacini dell'Europa nord-orientale renderebbe meno probabili le inondazioni che in queste zone sono principalmente dovute alla fusione della neve [36] [37].

## 2.2 Rischio Idrogeologico in Italia

Per quanto riguarda l'Italia, considerando le due principali manifestazioni del rischio idrogeologico, ovvero le frane e le inondazioni, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) ha pubblicato nel 2021 due rapporti di sintesi [38] [6] contenenti le nuove mosaichure nazionali di pericolosità. Queste sono state realizzate sulla base dei Piani di Assetto Idrogeologico – PAI e Frane e delle mappe di pericolosità idraulica secondo gli scenari del D. Lgs. 49/2010 di recepimento della Direttiva Europea Alluvioni (2007/60/CE), la quale richiede di caratterizzare le aree inondabili, il livello e la velocità/portata delle acque in funzione di 3 livelli di probabilità di alluvione: scarsa (scenario di eventi estremi - LPH); media (tempo di ritorno  $\geq 100$  anni - MPH) ed elevata (HPH).

Le mappe indicano che, complessivamente, il 18,4% (55.609 km<sup>2</sup>) del territorio nazionale è classificato a pericolosità frane elevata/molto elevata (Figura 2.2) e/o a pericolosità idraulica media (tempo di ritorno tra 100 e 200 anni) (Figura 2.3). Da queste nuove mosaichure emerge un incremento percentuale, rispetto al 2018, del 3,8% della superficie classificata a pericolosità da frana elevata/molto elevata, e del 18,9% della superficie a pericolosità idraulica media. L'incremento, comunque, è imputabile principalmente a rilievi più dettagliati e aggiornati sul territorio, messi a disposizione dagli enti preposti.

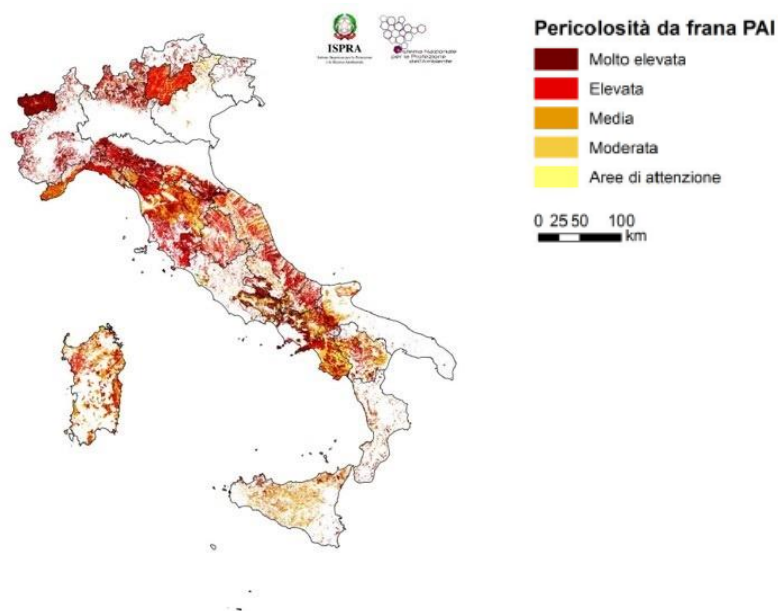


Figura 2.2 – Aree a pericolosità da frana PAI – Mosaicitura 2020-2021 (estratto da [38]).

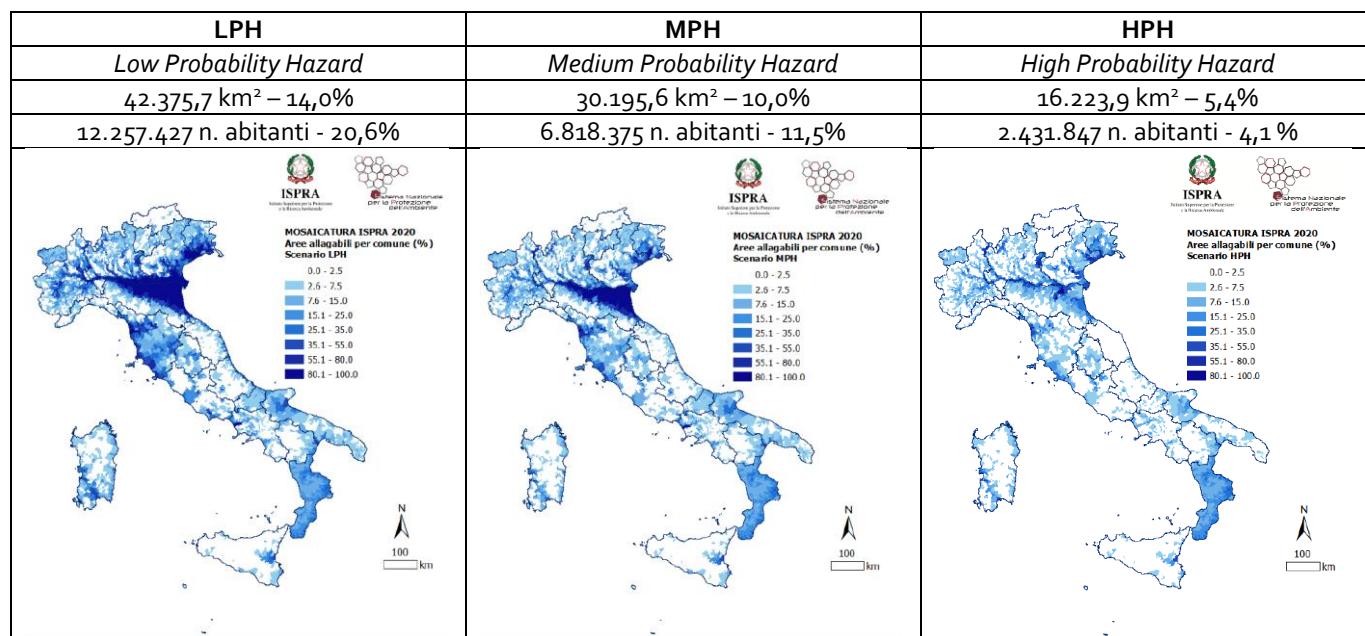


Figura 2.3 – Superficie di territorio nazionale (km<sup>2</sup> - %) e popolazione (numero abitanti - %) esposta a inondazioni con probabilità scarsa (LPH), media (MPH) e alta (HPH) e relative mappe con la percentuale di copertura per comune (mosaicatura). (modificato da [6]).

In Figura 2.4 è rappresentata la percentuale di territorio regionale a rischio alluvioni per i 3 livelli di probabilità, da cui si evince che le regioni con maggiori porzioni di territorio a rischio sono Emilia-Romagna, Calabria, Veneto e Friuli-Venezia Giulia e, a seguire, Toscana e Lombardia. Complessivamente il 93,9% dei comuni italiani (7.423) è a rischio per frane, alluvioni e/o erosione costiera. Relativamente alla popolazione, 1,3 milioni di abitanti sono a rischio frane e 6,8 milioni di abitanti a rischio alluvioni (Figura 2.3).

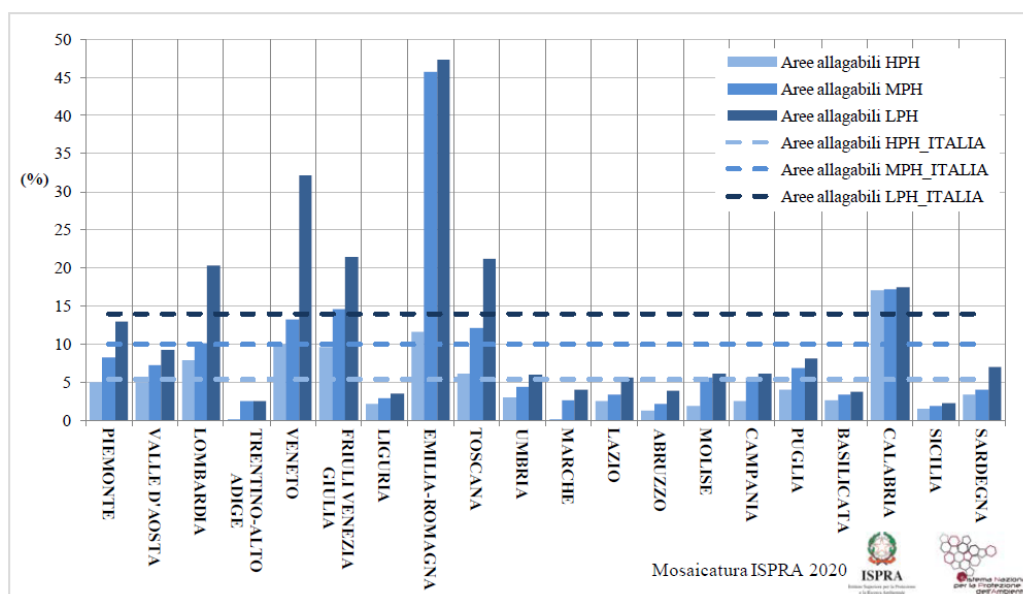


Figura 2.4 – Percentuale del territorio interessato da alluvioni per ciascuna regione e livello di probabilità (estratto da da [6]).

Riferendoci specificatamente al settore elettrico, nel rapporto di ricerca di sistema RSE prot. n. 22014044 [39] redatto nel 2022 nell'ambito del progetto 2.6 LA 1.03 - Pericolosità idrogeologica finalizzata alla valutazione del rischio sulla rete elettrica: studi preliminari per la definizione di una metodologia a scala nazionale, sono stati valutati alcuni episodi di danno alla rete elettrica di alta tensione segnalati da Terna tra il 2010 e il 2021 e imputabili a eventi di dissesto idrogeologico. Da questa rassegna, è risultato che il rischio alluvioni è abbastanza ben caratterizzato dalle mappe dell'ISPRA. Infatti, la maggior parte (70%) degli eventi ricadono nelle aree classificate a moderata e alta pericolosità e solo il 25% nelle aree non mappate; mentre, per le frane, solo il 30% ricade nelle aree a pericolosità elevata/molto elevata e quasi il 60% riguarda aree non classificate dal PAI. I restanti episodi afferiscono ad aree a medio/bassa pericolosità.

Relativamente agli scenari futuri, nello studio di Analisi del Rischio in Italia condotto dal Centro Euro- Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) [40], basato sull'uso di indici climatici a partire da modelli climatici regionali (primo approccio metodologico), si legge "I cambiamenti climatici inducono un aumento di frequenza e intensità di alcuni eventi atmosferici che regolano l'occorrenza dei fenomeni di dissesto. [...] L'innalzamento della temperatura e l'aumento di fenomeni di precipitazione localizzati nello spazio hanno un ruolo importante nell'esacerbare il rischio. Nel primo caso, lo scioglimento di neve, ghiaccio e permafrost indica che le aree maggiormente interessate da variazioni in magnitudo e stagionalità dei fenomeni di dissesto sono le zone alpine e appenniniche. Nel secondo caso, precipitazioni intense contribuiscono a un ulteriore aumento del rischio idraulico per piccoli bacini e del rischio associato a fenomeni franosi superficiali nelle aree con suoli con maggior permeabilità."

Degno di nota è anche il recente studio di García-Valdecasas et al. [24] che valuta le proiezioni future della pericolosità da alluvione nei bacini fluviali italiani, simulando la portata sub-giornaliera con il modello idrologico CHyM sviluppato da CETEMPS, utilizzando, come forzanti climatiche, le



simulazioni regionali del modello RegCM4 dell'ICTP di Trieste, a valle di un confronto e di una verifica con i dati osservativi di precipitazione e i deflussi fluviali sul reticolo idrografico italiano nel recente passato. Gli scenari investigati riguardano il futuro a breve (2020-2049) e lungo termine (2070-2099), secondo il percorso emissivo RCP8.5. I parametri analizzati sono stati: la precipitazione media annuale, l'indice R99pTOT (Tabella 2.1), il picco di portata annuale e orario con 10, 50 e 100 anni di tempo di ritorno. Lo studio conclude che, sebbene nei prossimi decenni si evidenzino segnali differenti sul territorio, nel futuro lontano vi è una chiara tendenza delle precipitazioni estreme in aumento in particolare sull'asta del Po e nelle coste orientali (R99pTOT, Figura 2.5). Inoltre, segnala in aumento la portata di picco annuale nella maggior parte della penisola italiana, con valori che aumentano dal 30% a oltre il 100%, per il futuro prossimo e lontano rispettivamente, soprattutto nelle regioni succitate. Analoghi risultati si riscontrano per le portate di picco orarie a diversi tempi di ritorno (esempio in Figura 2.6 per 50 anni di tempo di ritorno). Questi indicatori suggeriscono quindi un aumento generale della pericolosità da alluvione prevista sul territorio nazionale.

A livello metodologico, lo studio [24] confronta le variazioni future ottenute dai dati grezzi dei modelli e quelle ricavate a valle dell'applicazione della tecnica di *bias correction* multi-variata MBCn [41] a partire da *dataset* di precipitazione osservata e grigliata regolarmente sul territorio italiano. Tale confronto indica che, sebbene la correzione del *bias* porti a un beneficio nella cattura della precipitazione media, il miglioramento è meno evidente per le precipitazioni estreme. La *bias correction* invece ha un notevole impatto sulla valutazione dei flussi. Ciononostante, i dati, sia grezzi che *bias* corretti, mostrano variazioni simili col cambiamento climatico.

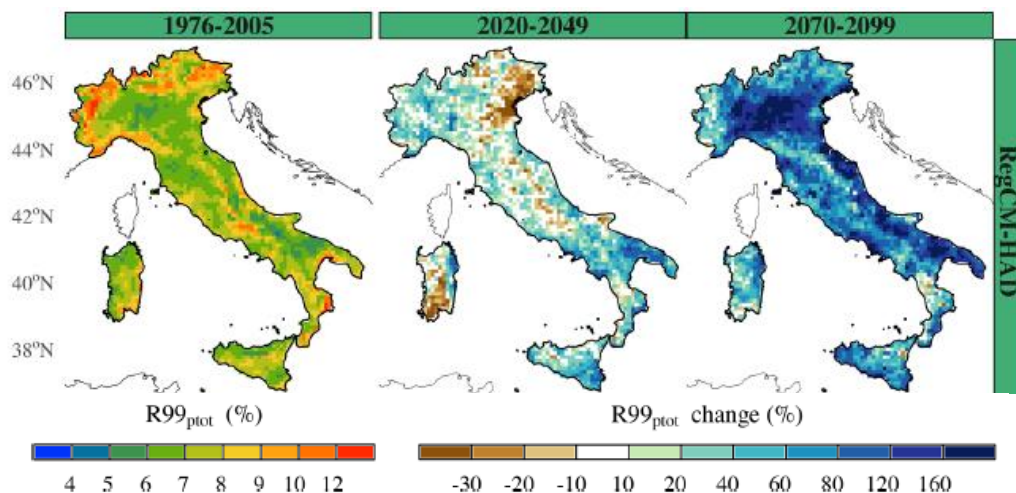


Figura 2.5 – R99pTOT per il periodo storico (1976–2005) e variazioni relative (%) per il futuro vicino (2020–2049) e lontano (2070–2099), ottenuti dai dati grezzi del modello RegCM4, guidato dal modello globale HadGEM2-ES (Fonte [24]).

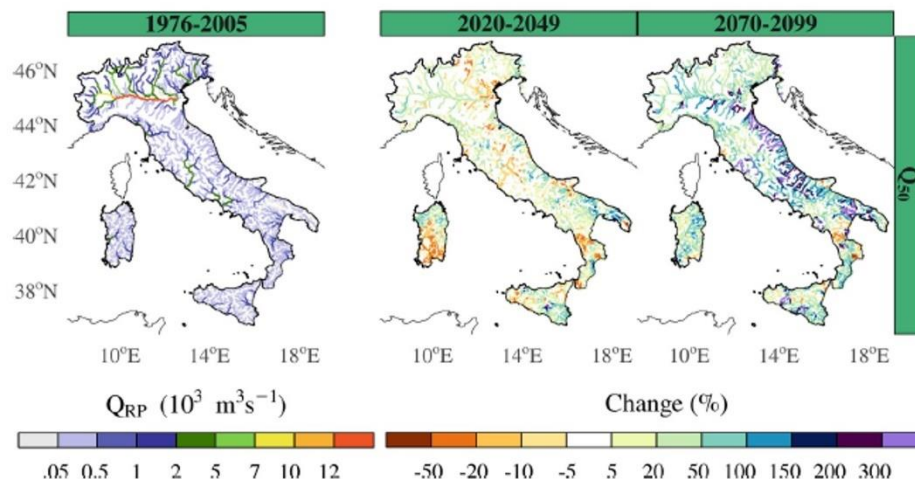


Figura 2.6 – Picchi orari di portata a 50 anni di tempo di ritorno, per il periodo storico (1976–2005) e variazioni relative in % per il futuro vicino (2020–2049) e lontano (2070–2099), ottenuti dai dati grezzi del modello RegCM4, guidato dal modello globale HadGEM2-ES (Fonte [24]).

## 2.3 Metodologia e Dataset

In questa prima fase, anche con riferimento allo studio [24], sono stati utilizzati i dati grezzi di precipitazione cumulata (R) e vento (W), a scala giornaliera, forniti dai modelli climatici, come dettagliato nel seguito.

### 2.3.1 Calcolo di indici di estremi climatici

In base a quanto esposto nei paragrafi precedenti, al fine di generare scenari climatici funzionali alla valutazione del rischio idrogeologico per il settore energetico in Italia, si è scelto di utilizzare un approccio basato sulla valutazione dei seguenti indici di estremi climatici:

- R99pTOT: indice ETCCDI che stima la percentuale di precipitazione annua dei giorni piovosi ( $R > 1 \text{ mm}$ ), in cui R supera il 99° percentile di precipitazione giornaliera (RR99) nel periodo di riferimento (Tabella 2.1);
- STO (*Storm*): indice *multi-hazard* definito *ad hoc* a partire dalle grandezze R e W. STO stima il numero di giorni per stagione/anno in cui:  
 $W > W_{75}$  e contemporaneamente  $R_{\text{med}} > RR_{99\text{med}}$   
dove:
  - $W_{75}$  è il 75° percentile di W in un periodo di riferimento;
  - $R_{\text{med}}$  è la media mobile su 3 giorni di R ed  $RR_{99\text{med}}$  è il corrispondente 99° percentile in un periodo di riferimento.

L'indice R99pTOT è legato all'intensità delle piogge estreme e, quindi, può essere connesso direttamente a eventi alluvionali o franosi.

L'indice *multi-hazard* STO, la cui definizione prende spunto dall'attività di ricerca [42], considera la concomitanza di un episodio alluvionale nell'arco di 3 giorni con il manifestarsi di venti moderati/forti. L'interesse per questo tipo di fenomeni nasce dal fatto che essi, proprio per le loro caratteristiche, possono danneggiare direttamente le infrastrutture elettriche, oppure causare danni indiretti tramite caduta di alberi o manufatti. La caduta di alberi a sua volta è favorita se il suolo è saturo d'acqua, come avvenuto ad esempio nel caso della tempesta VAIA in ottobre 2018 [43].

Lo studio di questi due indici e di altri di estremi climatici è stato recentemente sottoposto alla rivista *peer-review Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, in un contributo dal titolo "Climate Extreme Scenarios affecting the Italian Energy System with a Multi-Hazard Approach".

R99pTOT è valutato a scala annuale, mentre STO è stato calcolato sia a scala annuale che stagionale distinguendo: l'inverno (DJF o dicembre-gennaio-febbraio), la primavera (MAM o marzo-aprile-maggio), l'estate (JJA o giugno-luglio-agosto) e l'autunno (SON o settembre-ottobre-novembre) dal momento che l'Italia è caratterizzata da un ciclo stagionale tipico dell'area Mediterranea.

I dati di R e W sono dedotti dalle uscite, a passo giornaliero, di 12 modelli climatici Euro-CORDEX (Tabella 2.3) considerati alla risoluzione spaziale di 0.11° di (~12 km), la più risolta al momento disponibile (<https://www.euro-cordex.net>). L'insieme modellistico considerato consiste di *run* ottenuti con cinque modelli globali (ICHEC-EC-EARTH, MOHC-HadGEM2-ES, MPI-M-MPI-ESM-LR, CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, IPSL-IPSL-CM5A-MR) accoppiati con tre differenti modelli regionali (CLMcom-CCLM4, KNMI-RACMO22E e SMHI-RCA4).

**Tabella 2.3 – Elenco delle simulazioni Euro-CORDEX considerate in questo studio. I nomi delle simulazioni identificano l'istituto di ricerca, il modello di circolazione globale e il modello climatico regionale.**

| ID | Modello Climatico                   |
|----|-------------------------------------|
| 1  | ICHEC-EC-EARTH_CLMcom-CCLM4         |
| 2  | ICHEC-EC-EARTH_KNMI-RACMO22E        |
| 3  | ICHEC-EC-EARTH_SMHI-RCA4            |
| 4  | MOHC-HadGEM2-ES_KNMI-RACMO22E       |
| 5  | MOHC-HadGEM2-ES_SMHI-RCA4           |
| 6  | MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4          |
| 7  | CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_KNMI-RACMO22E |
| 8  | CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom-CCLM4  |
| 9  | CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_SMHI-RCA4     |
| 10 | IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMHI-RCA4         |
| 11 | MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4        |
| 12 | IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMHI-RCA4         |

È stato stimato, come scenario di riferimento (Reference, REF), quello ottenuto calcolando gli indici nel trentennio 1971-2000, ottenuti dai risultati delle simulazioni *historical*, generate con concentrazioni storiche di GHG, mentre gli scenari futuri sono stati valutati per 3 trentenni a breve (2021-2040), medio (2041-2070) e lungo (2071-2100) termine, elaborando le simulazioni modellistiche nei tre diversi percorsi emissivi di GHG RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5, caratterizzanti una forzante radiativa antropogenica via via crescente. Fra i 12 modelli considerati è stato escluso il modello ID 7 in quanto descrive un regime pluviometrico con un ciclo stagionale non coerente con la climatologia storica italiana [44].

In aggiunta è stato considerato, come *dataset* di riferimento, la rianalisi meteorologica MERIDA a 7 km di risoluzione spaziale (<https://merida.rse-web.it>) [45], nel periodo 1986 – 2019.

Gli scenari climatici sono stati elaborati calcolando gli indici per ciascun modello e per l'insieme dei modelli in termini di media, mediana e deviazione standard. Per brevità, di seguito saranno discussi gli scenari medi multi-modello.

### 2.3.2 Indice Geomorfico di Inondazione - GFI

L'attività di ricerca svolta nella LA 1.06 prevede la determinazione del parametro GFI su un'area *test* dell'asta del fiume Po, che insiste sulle regioni Valle d'Aosta, Piemonte, Liguria e Lombardia. A tale scopo, il territorio è stato suddiviso in 16 aree omogenee (bacini) per la calibrazione di GFI in funzione delle aree inondabili per i 3 tempi di ritorno (*Return Time*) RT = 20, 200 e 500 anni, in linea con il PAI e la Direttiva Alluvioni. Limitatamente alla stessa area *test*, viene qui presentata l'attività di ricerca volta a supportare la stima della variazione di GFI coi cambiamenti climatici, e, quindi, l'identificazione delle aree inondabili e, conseguentemente, l'esposizione delle



infrastrutture elettriche nel futuro. In particolare, con riferimento alla tecnica statistica *Extreme Value Analysis* (EVA) [46], applicando il metodo *Block Maxima* per considerare i massimi annuali di precipitazione cumulata di ciascuna zona omogenea, sono stati dedotti, mediante il metodo *L-moments*, i parametri delle curve che meglio definiscono le distribuzioni degli estremi nel periodo di riferimento.

I tempi per il calcolo della pioggia cumulata sono stati stabiliti in 24 e 48 ore avendo, i bacini considerati, tempi di corrivazione paragonabili a questi intervalli temporali.

In analogia allo studio relativo agli indici climatici (§2.3.1), il periodo di riferimento, da confrontare con le descrizioni del PAI, è stato individuato nel trentennio REF = 1971-2000 e le proiezioni future sono state generate per i trentenni 2021-2040, 2041-2070 e 2071-2100 nell'ipotesi RCP8.5. È stato considerato anche il trentennio 2001-2030, come rappresentazione del clima attuale a completamento del secolo 21°.

Utilizzando i dati dei modelli climatici di Tabella 2.3 (ID 7 escluso), una volta determinate le distribuzioni EVA nei succitati periodi, si è proceduto come di seguito, calcolando:

1. i livelli di ritorno (RL, *Return Level*) di pioggia cumulata a RT = 20,200 e 500 anni in REF e nei periodi futuri;
2. i RT nel futuro, a partire dai RL stimati al punto 1 in REF per RT = 20,200 e 500 anni.

Ipotizzando una corrispondenza tra evento estremo di pioggia ed evento alluvionale, dalla variazione dei tempi di ritorno al punto 2 nel futuro sarà possibile estrapolare a posteriori i valori di GFI attesi.

Poiché la relazione tra RT e GFI non è lineare, le stime di RL e RT sono state effettuate modello per modello. Un'eventuale *ensemble mean* di GFI, corredata di relativa variabilità, avverrà eventualmente a posteriori, una volta testata definitivamente la metodologia.

## 2.4 Analisi dei risultati

### 2.4.1 Precipitazioni estreme - R<sub>99pTOT</sub>

Nel pannello "HISTORICAL", in alto a sinistra nella Figura 2.7, è rappresentato il dato medio di RR<sub>99</sub> nel periodo di riferimento, da cui si evince che, coerentemente con la climatologia attuale, le aree con piogge più intense sono le regioni alpine, prealpine e la Liguria, con valori compresi tra 40 e 70 mm/giorno. In futuro (mappe RCPs in Figura 2.7), sono attese variazioni positive di R<sub>99pTOT</sub> soprattutto su coste orientali e Pianura Padana, con valori che raggiungono ~45% da metà secolo in RCP<sub>8.5</sub> e a fine secolo in RCP<sub>4.5</sub>. Sotto l'ipotesi RCP<sub>2.6</sub>, non si rilevano particolari tendenze al variare dell'orizzonte temporale.

Se si considera anche il numero di giorni piovosi in cui la pioggia supera il valore RR<sub>99</sub> (indice ETCCDI R<sub>99p</sub> in Figura 2.8), in RCP<sub>4.5</sub> e RCP<sub>8.5</sub> si prevede che le precipitazioni estreme saranno sempre più frequenti in Italia, raggiungendo addirittura il 15% delle giornate piovose a fine secolo. Inoltre, poiché gli scenari climatici futuri descrivono periodi asciutti più prolungati [4], si deduce che è probabile un regime pluviometrico in cui i giorni di pioggia in generale diminuiranno, ma le precipitazioni estreme saranno più frequenti e più distruttive, soprattutto sulle aree sopra citate. I risultati qui esposti per l'ensemble degli 11 modelli si differenziano nel breve/medio termine da [24] (Figura 2.5), studio condotto però con il solo modello RegCM<sub>4</sub> in RCP<sub>8.5</sub>, che evidenzia una riduzione del segnale sul Nord-est e sulla Sardegna, mentre sono in accordo con [24] a fine secolo.

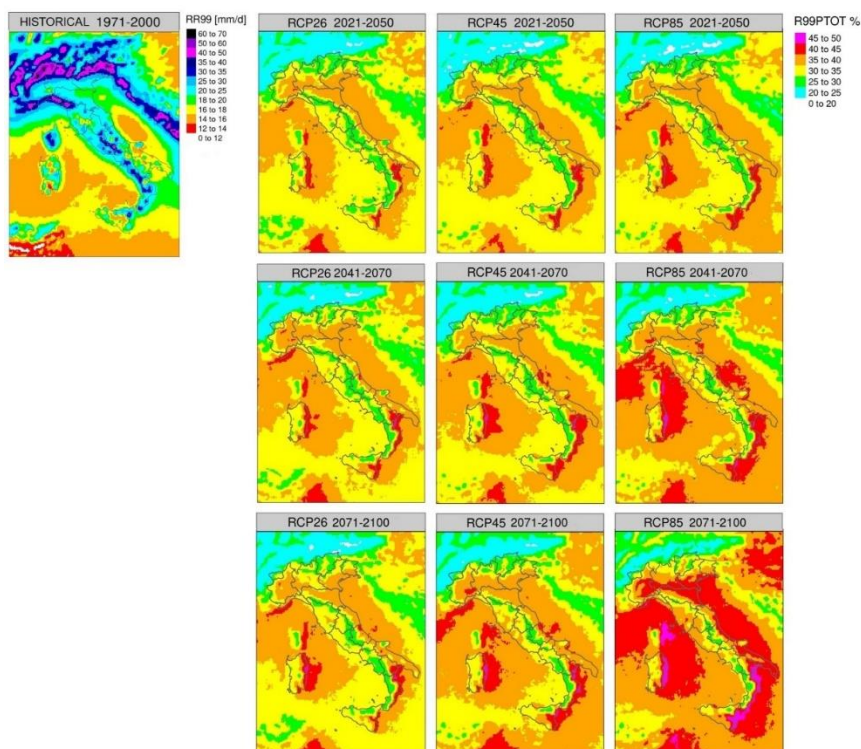


Figura 2.7– Scenario medio multi modello di RR<sub>99</sub> [mm/giorno] in REF (pannello *HISTORICAL* in alto a sinistra) e scenari di R<sub>99pTOT</sub> [%] nelle ipotesi RCP<sub>2.6</sub>, RCP<sub>4.5</sub> e RCP<sub>8.5</sub> (per colonna) nel futuro 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga) e 2071-2100 (terza riga) (pannelli a destra).

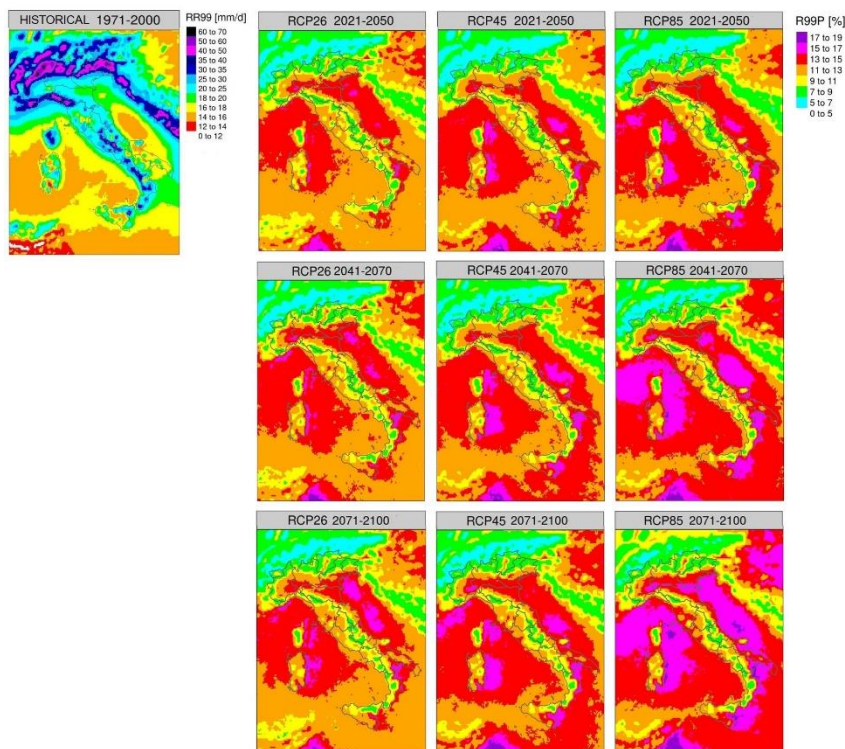


Figura 2.8– Scenario medio multi modello di RR99 [mm/giorno] in REF (pannello *HISTORICAL* in alto a sinistra) e scenari di R99p [%] nelle ipotesi RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 (per colonna) nel futuro 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga) e 2071-2100 (terza riga) (pannelli a destra).

#### 2.4.2 Storm - STO

Secondo la sua definizione, STO identifica i giorni in cui la pioggia supera il valore RR99 (qui ottenuto come media mobile su 3 giorni) e contemporaneamente il vento è maggiore del 75° percentile (W75) del periodo di riferimento.

Le soglie RR99 e W75 sono state stabilite dopo una valutazione preliminare degli scenari degli indici di precipitazione RR75-90-95-99p e di vento W75-90-95-99p. Relativamente alla pioggia, gli indici mostravano una chiara tendenza in aumento, se calcolati rispetto alle soglie più elevate (RR95-99p), indicando quindi un possibile aumento del rischio per il sistema elettrico. Perciò, anche in analogia allo studio dell'indice R99pTOT, si è scelta la soglia del 99° percentile. Relativamente al vento, si sono verificati segnali di tendenza simili per i diversi percentili e, di conseguenza, è stato fissato il 75° percentile (W75 in Figura 2.9) per avere una statistica più numerosa e robusta, dovendo combinare contemporaneamente venti forti e piogge estreme e ottenere una ricostruzione consistente con le osservazioni storiche.

Nel periodo di riferimento (Figura 2.10), STO raggiunge i valori massimi nell'Italia centro-settentrionale, coi maggiori contributi imputabili a condizioni meteorologiche primaverili e autunnali e identifica correttamente le aree italiane soggette a inondazioni con venti forti, come le alluvioni avvenute in Piemonte nel 1994 [47], in Liguria-Toscana nel 2011 [48] e la tempesta VAIA avvenuta sull'Italia nord-orientale nel 2018 [43]. L'aumento generale di questi fenomeni nel passato è ben rappresentato dagli scenari STO calcolati confrontando i risultati delle ricostruzioni basate su MERIDA tra i periodi 1986-2005 e 2006-2019. Questi due scenari, generati utilizzando tutto il dataset a disposizione, permettono di distinguere il periodo storico remoto (prima riga di Figura 2.11), ricadente nel periodo delle simulazioni *historical*, e il passato recente (seconda riga di Figura 2.11). Dalla loro analisi si intercettano situazioni meteorologiche perturbate anche in inverno e temporali convettivi sulle Alpi in estate.

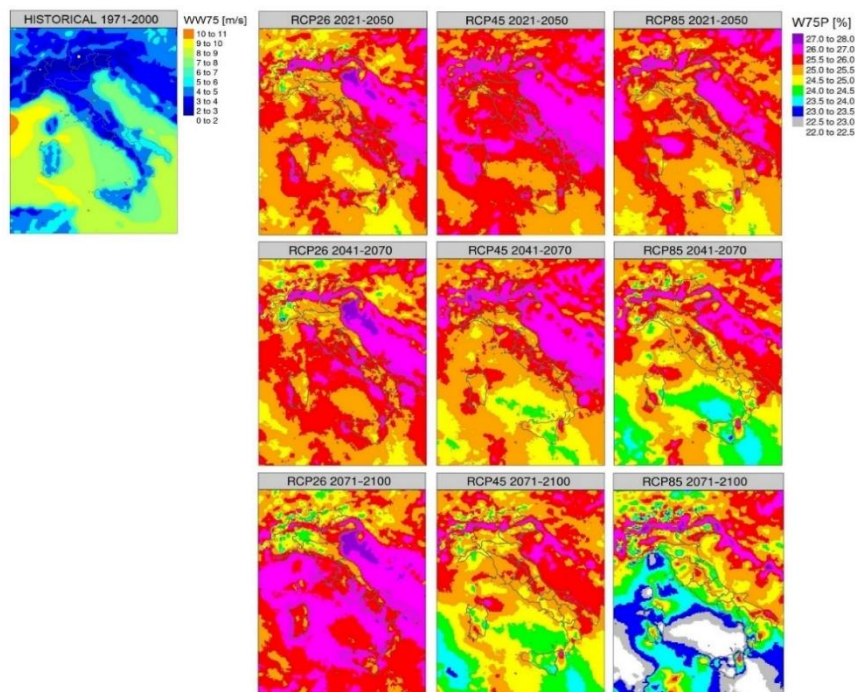


Figura 2.9 – Scenario medio multi modello di W75 [m/s] in REF (pannello *HISTORICAL* in alto a sinistra) e scenari di W75p [%] nelle ipotesi RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 (per colonna) nel futuro 2021-2050 (1<sup>a</sup> riga), 2041-2070 (2<sup>a</sup> riga) e 2071-2100 (3<sup>a</sup> riga) (pannelli a destra).

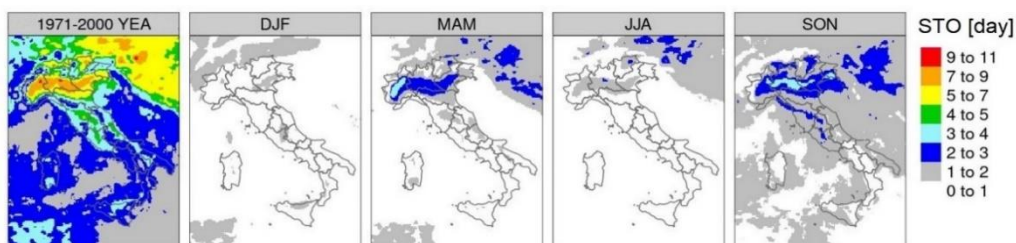


Figura 2.10 – Scenario medio multi modello di STO [m/s] in REF (1971-2000) a scala annuale e stagionale da sinistra a destra.

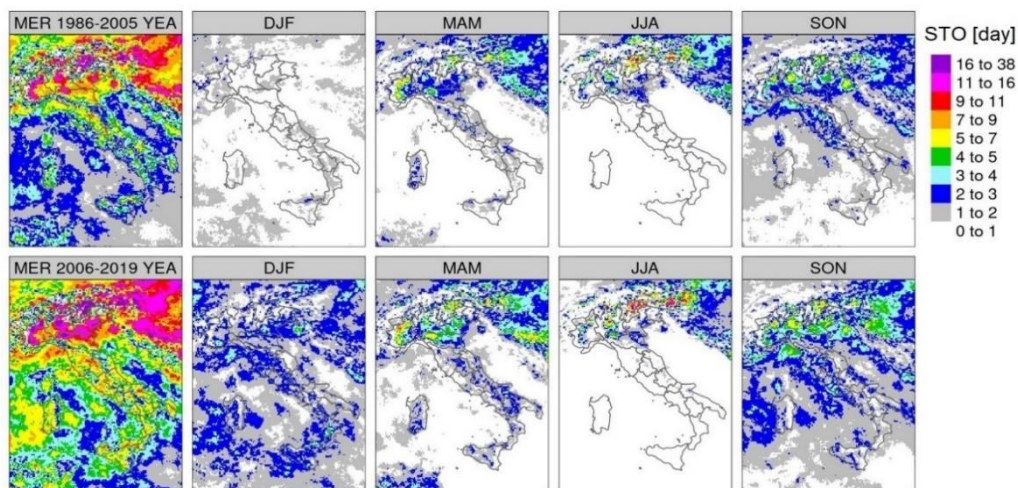


Figura 2.11 – Scenario STO dedotto da MERIDA a scala annuale e stagionale (per colonna) nel periodo 1986-2005 (riga superiore) e nel periodo 2006-2019 (riga inferiore).

Si osservi che, sebbene i *pattern* spaziali di STO siano simili tra media multi-modello (Figura 2.10) e rianalisi (Figura 2.11), l'*ensemble* tende a sottostimare la frequenza degli episodi. Nel futuro si attende su tutto il territorio nazionale un aumento dei valori di STO in tutti gli RCPs, come si evince dalle variazioni (anomalie) rappresentate per i 3 scenari futuri rispetto allo scenario REF, a scala annuale, rappresentati in Figura 2.12.

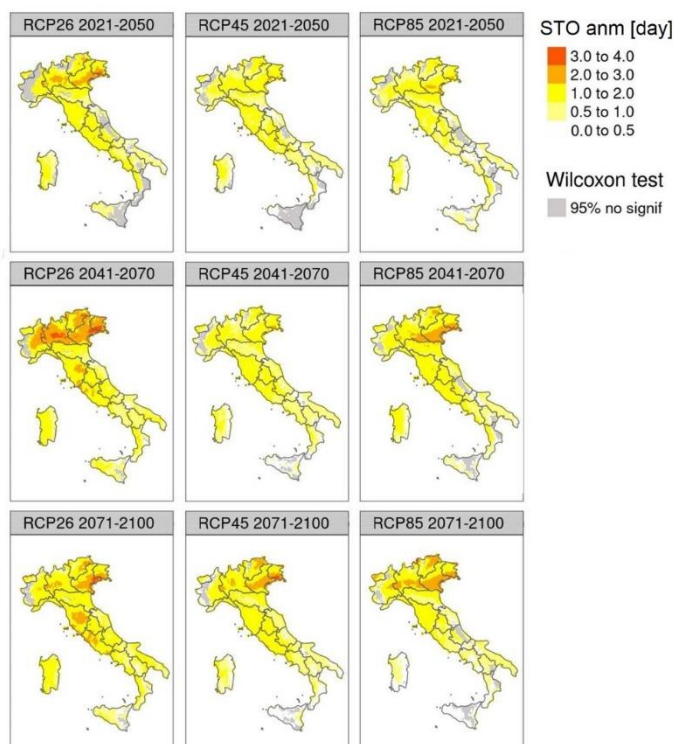


Figura 2.12 – Anomalie dello scenario medio multi modello di STO [day] a scala annuale sotto le ipotesi RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 (per colonna) negli scenari futuri 2021-2050, 2041-2070 e 2071-2100 (per riga) rispetto al periodo REF (Figura 2.10, pannello 1971-2000 YEA). Le anomalie sono colorate in grigio se non sono significative secondo il test di Wilcoxon con livello di confidenza al 95%.

La significatività statistica dell'anomalia è stata testata applicando il test di *Wilcoxon rank-sum* al 95% del livello di confidenza. La Pianura Padana e l'alto Adriatico sono le regioni più a rischio, essendo interessate da un aumento significativo di circa 3÷4 giorni all'anno, rispetto al periodo di riferimento, indipendentemente dall'RCP, sebbene con tempistiche diverse nel raggiungimento dell'incremento massimo.

### 2.4.3 Indice Geomorfico di Inondazione - GFI

Come detto in §2.3.2, l'area test dell'Italia nord-occidentale è stata suddivisa in 16 aree omogenee per la definizione del parametro GFI finalizzato alla determinazione delle aree inondabili. La Figura 2.13 riporta l'elenco con l'identificativo delle zone omogenee selezionate in LA 1.06, per questa analisi preliminare e la mappa per localizzarle sul territorio italiano.

Per ciascun bacino e per ciascun scenario, sono stati calcolati i livelli di precipitazione per RT=20, 200, 500 anni in REF e i corrispondenti tempi di ritorno nei trentenni futuri.

A titolo di esempio, la Figura 2.14 riporta, per il modello ID 1 (Tabella 2.3), la mappa dei livelli di precipitazione cumulata sulle 24 ore con RT = 20 anni nel periodo REF (mappa a) e i corrispondenti tempi di ritorno per periodi seguenti (mappe b÷e). Analogamente, la Figura 2.15 visualizza, sempre per il modello ID 1, i risultati ottenuti considerando RT = 200 anni.

Sebbene si evidenzia una certa variabilità nello scenario attuale (2001-2030) e in quelli futuri a breve e medio termine (2021-2040 e 2041-2070), si evince a lungo termine (2071-2100) una generale tendenza alla riduzione dei tempi di ritorno in tutte le zone. Tali risultati si verificano anche per gli scenari relativi a RT = 500 anni, e anche per le cumulate delle 48 ore (non mostrato).

Quanto riscontrato per il modello ID 1 è sostanzialmente generalizzabile per gli altri modelli.

Per dare contezza della variabilità fra i modelli e fornire una rappresentazione sintetica dei risultati, in Figura 2.16 e sono riportati i grafici box plot dei RT di ciascun bacino nei trentenni 1971-2000, 2001-2030, 2021-2040, 2041-2070 e 2071-2100 (indicati sinteticamente in figura con REF, 20s, 30s, 50s e 80s e differenziati per colore) nel caso della pioggia cumulata in 24. Analogamente, in Figura 2.17 sono riportati i grafici box plot per la precipitazione cumulata su 48 ore

Dalla statistica dei *box plot* sono stati esclusi i risultati dell'EVA non finiti (classificati "missing" in Figura 2.15) oppure eccessivamente elevati (RT > 700 anni).

Dall'analisi delle figure si conferma una tendenza alla riduzione dei tempi di ritorno lungo il secolo, associata anche a una minore dispersione fra i modelli. Tuttavia, la variabilità tra zone e per una stessa zona è molto marcata anche al cambiare del tempo di ritorno e del tempo di accumulo, in particolare negli scenari 20s e 30s. Tali risultati hanno un margine di incertezza non trascurabile.

| Id. | Zona Omogenea            | Mappa |
|-----|--------------------------|-------|
| 01  | DxPO_ZONA1               |       |
| 02  | SxPO_ZONA1               |       |
| 03  | PO_ZONA1                 |       |
| 04  | DoraBaltea_ZONA1         |       |
| 05  | DoraBaltea_ZONA2         |       |
| 06  | Sesia_ZONA1              |       |
| 07  | Tanaro_ZONA2             |       |
| 08  | Tanaro_ZONA3             |       |
| 09  | SxPO_ZONA2               |       |
| 10  | PO_ZONA2                 |       |
| 11  | PO_ZONA3                 |       |
| 12  | PO_ZONA4                 |       |
| 13  | DxPO_ZONA2               |       |
| 14  | Sesia_ZONA2              |       |
| 15  | Sesia_ZONA3              |       |
| 16  | SturaMonferrato_ZONA_TOT |       |

Figura 2.13 – Zone omogenee di interesse dell'asta del bacino del Po nell'Italia centro-occidentale. Da sinistra a destra: numero identificativo, nome sintetico e mappa di localizzazione.

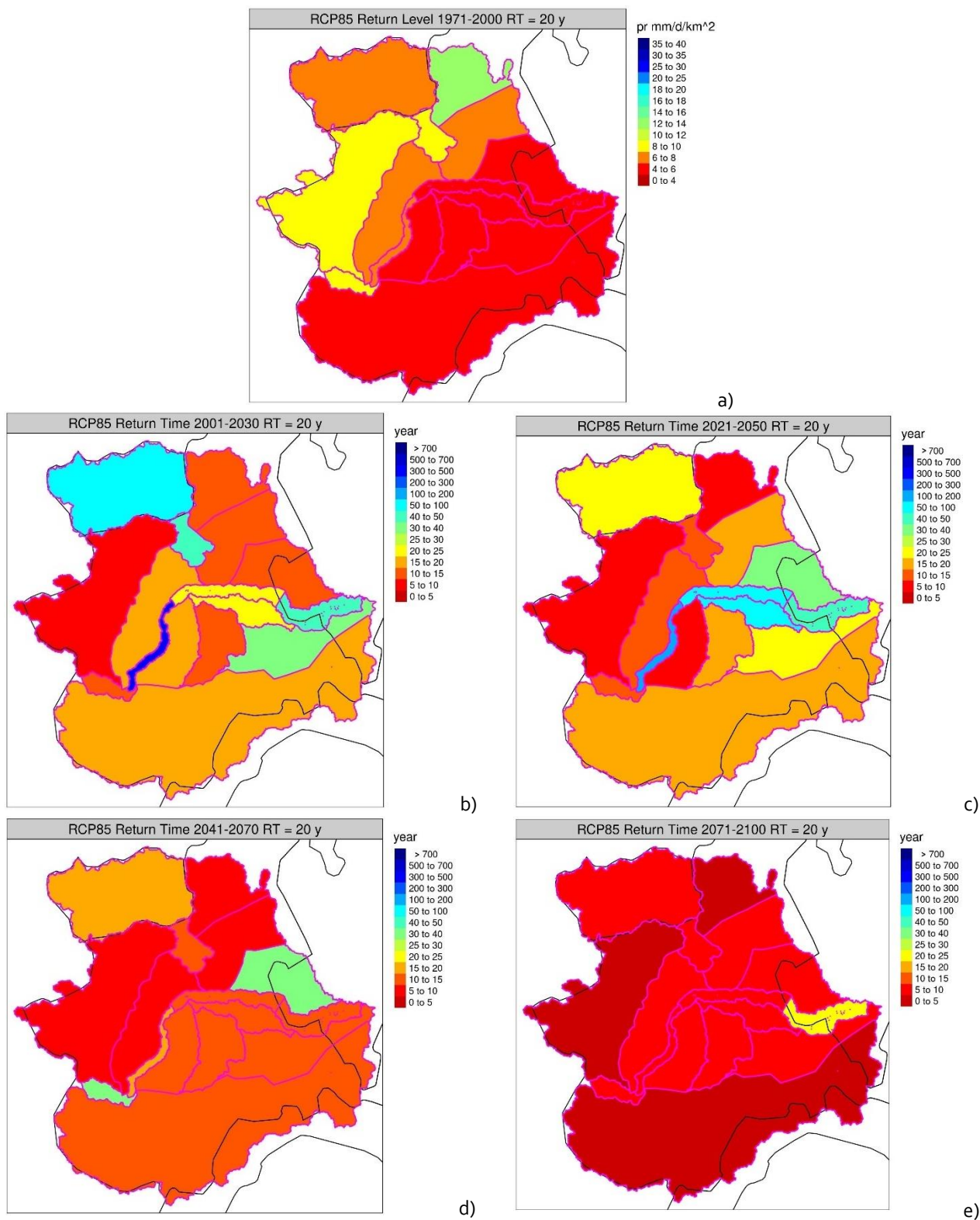


Figura 2.14 – Livelli di precipitazione cumulata nelle 24 ore per il modello ID 1 per area omogenea in REF con tempo di ritorno RT = 20 anni (a) e corrispondenti tempi di ritorno RT nei periodi futuri (b÷e) . Ogni mappa riporta nell'intestazione il periodo a cui si riferisce. Le linee magenta rappresentano i confini delle zone omogenee mentre le linee nere i confini delle regioni.

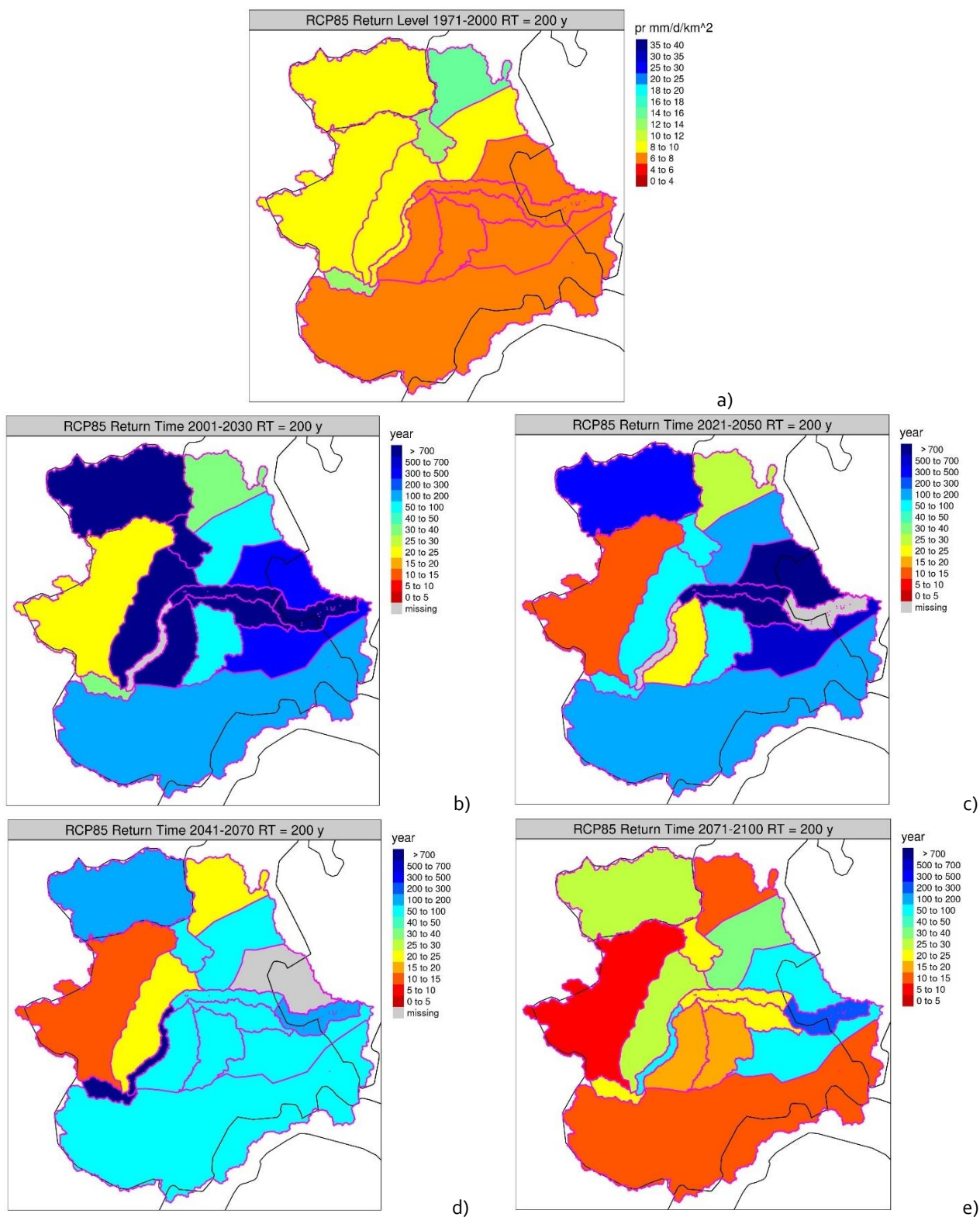


Figura 2.15 – Livelli di precipitazione cumulata nelle 24 ore per il modello ID 1 per area omogenea in REF con tempo di ritorno RT = 200 anni (a) e corrispondenti tempi di ritorno RT nei periodi futuri (b÷e) . Ogni mappa riporta nell'intestazione il periodo a cui si riferisce. Le linee magenta rappresentano i confini delle zone omogenee mentre le linee nere i confini delle regioni.

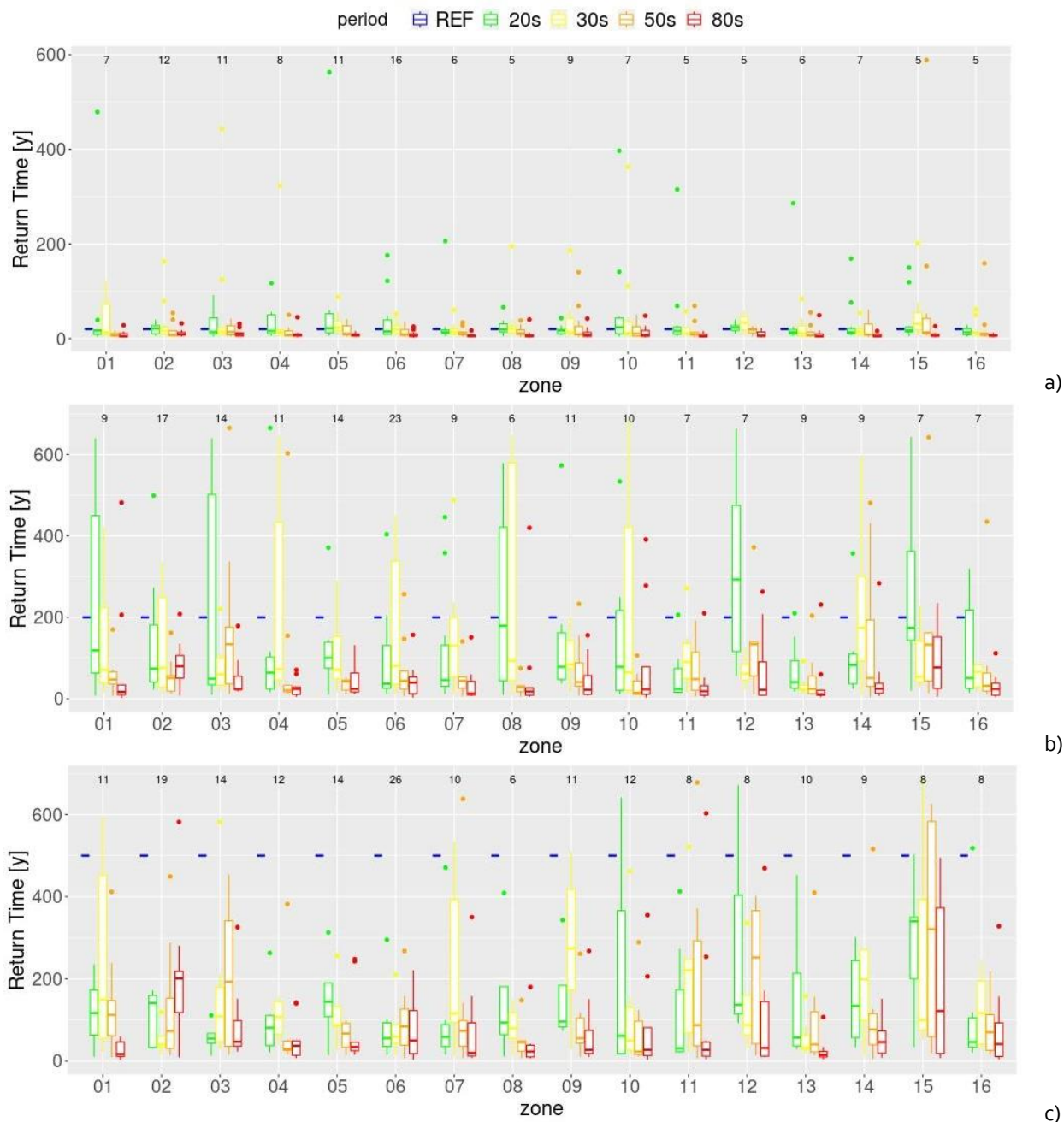


Figura 2.16 – *Boxplot* della distribuzione dei tempi di ritorno (asse y) dei modelli nei differenti trentenni per ciascuna zona omogenea (asse delle x), calcolati a partire dai RL di precipitazione cumulata nelle 24 ore con RT = 20 (a), 200 (b) e 500 (c) anni in REF. Il livello in mm/(d·km<sup>2</sup>) per ciascuna zona è indicato come etichetta in alto. I colori blu, verde, giallo, arancio, rosso si riferiscono rispettivamente ai trentenni 1971-2000, 2001-2030, 2021-2050, 2041-2070, 2071-2100 e sono indicati in legenda come REF, 20s, 30s, 50s e 80s.

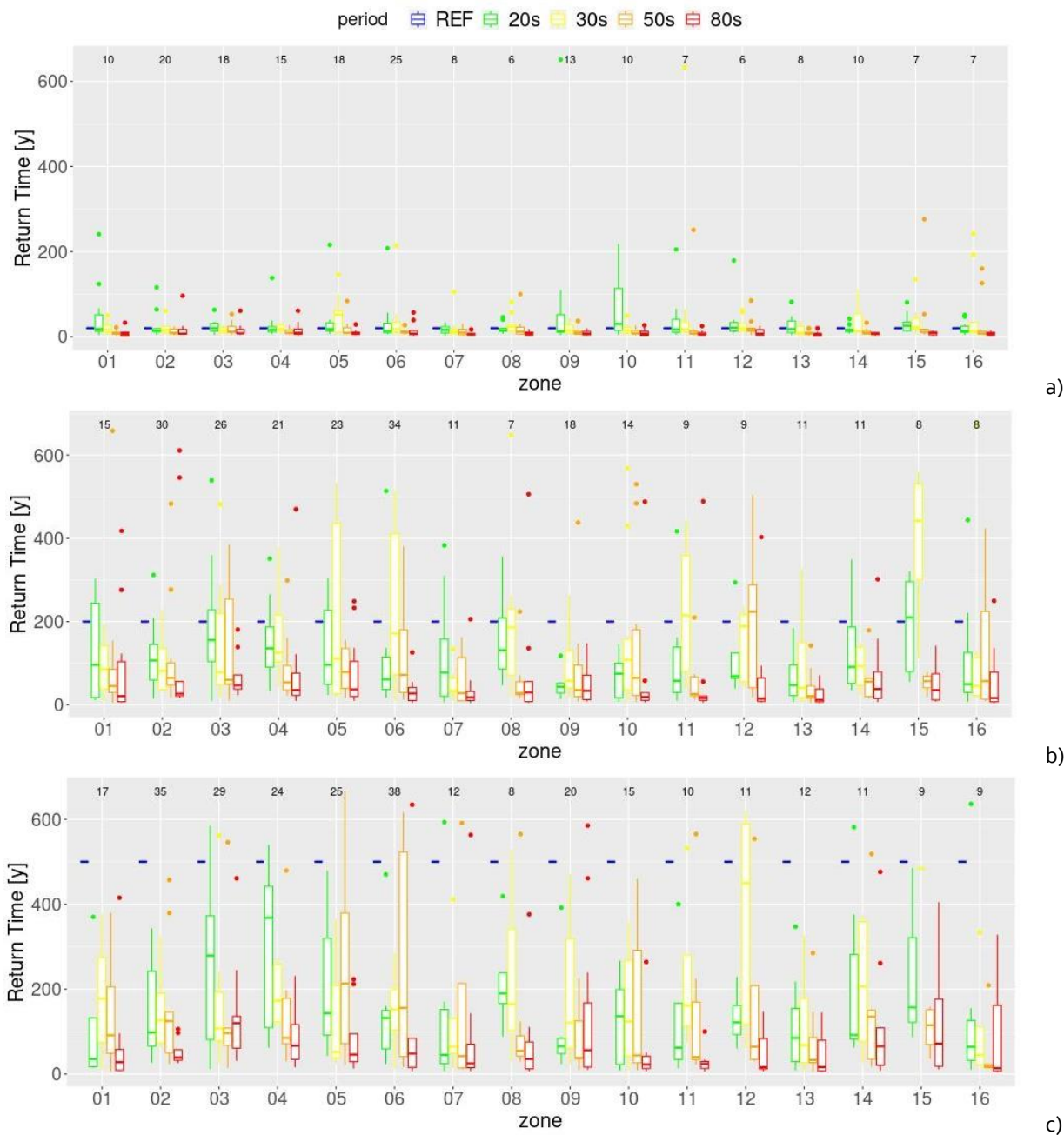


Figura 2.17 – *Boxplot* della distribuzione dei tempi di ritorno (asse y) dei modelli nei differenti trentenni per ciascuna zona omogenea (asse delle x) calcolati a partire dai RL di precipitazione cumulata nelle 48 ore con RT = 20 (a), 200 (b) e 500 (c) anni in REF. Il livello in mm/(d·km<sup>2</sup>) per ciascuna zona è indicato come etichetta in alto. Il livello in mm/(d·km<sup>2</sup>) per ciascuna zona è indicato come etichetta in alto. I colori blu, verde, giallo, arancio, rosso si riferiscono rispettivamente ai trentenni 1971-2000, 2001-2030, 2021-2050, 2041-2070, 2071-2100 e sono indicati in legenda come REF, 20s, 30s, 50s e 80s.

Poiché la metodologia applicata ipotizza un clima stazionario nei periodi considerati, al fine di verificare se i risultati possano dipendere dalla finestra temporale di dati che alimentano l'EVA (e quindi capire quanto l'assunzione di invarianza climatica possa essere considerata ragionevole), è stata effettuata un'analisi di sensitività, stimando i RL e RT con intervalli ventennali. A questo scopo è stato considerato come riferimento il periodo 1981 – 2000 (REF) e come scenari futuri i ventenni 2001-2020, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100.

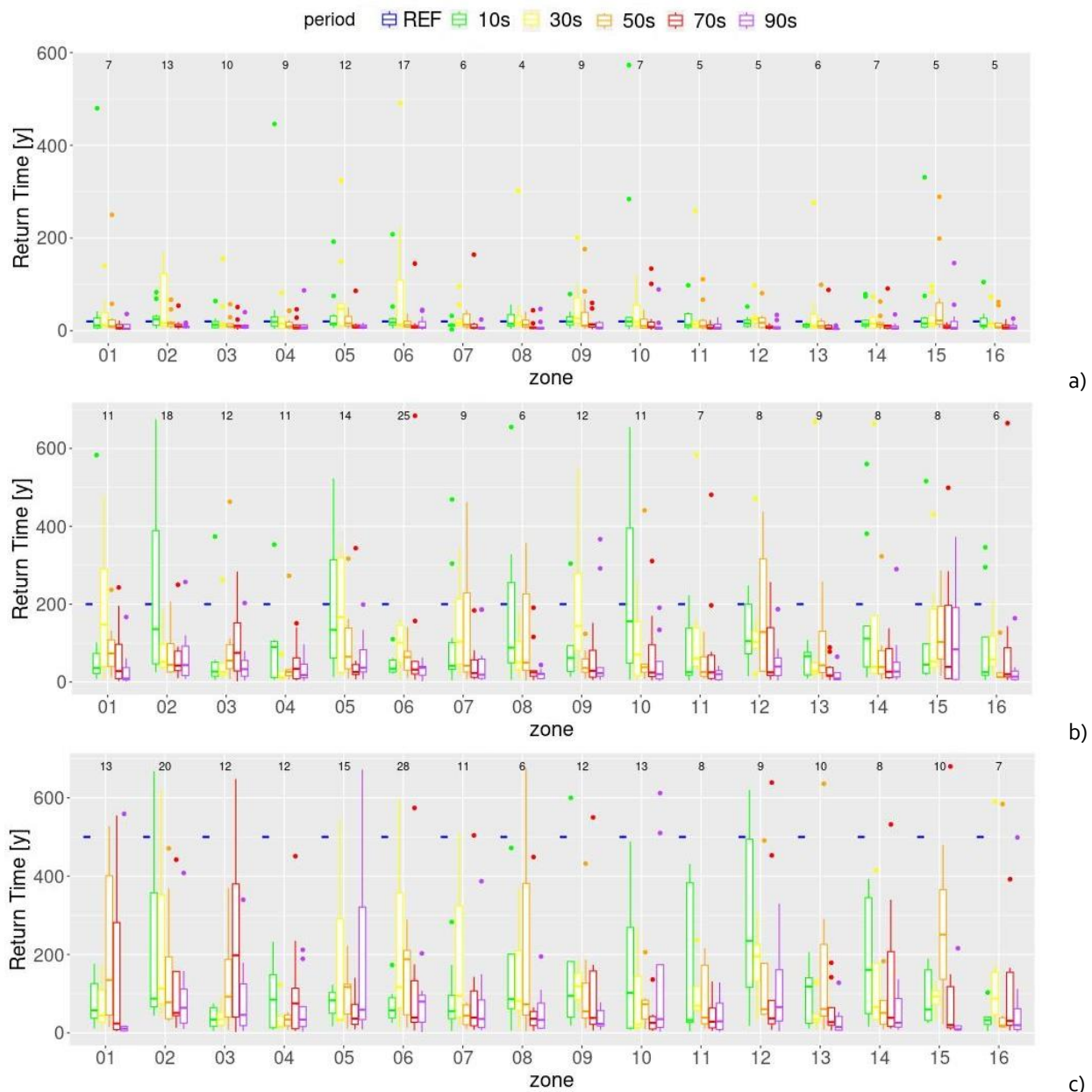


Figura 2.18 – Boxplot della distribuzione dei tempi di ritorno (asse y) dei modelli nei differenti ventenni per ciascuna zona omogenea (asse delle x) calcolati a partire da RL di precipitazione cumulata nelle 24 ore con RT = 20 (a), 200 (b) e 500 (c) anni in REF. Il livello in mm/(d·km<sup>2</sup>) per ciascuna zona è indicato come etichetta in alto. I colori blu, verde, giallo, arancio, rosso e viola si riferiscono rispettivamente ai ventenni 1981-2000, 2001-2020, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 e sono indicati in legenda come REF, 10s, 30s, 50s, 70s e 90s.



Dall'analisi delle Figura 2.18 e Figura 2.19 (analoghe a Figura 2.16 e Figura 2.17) si mantiene la tendenza alla diminuzione a lungo termine (90s) ma si osserva generalmente un'ancor maggior dispersione fra i modelli, imputabile all'aver alimentato EVA con un campione ridotto (20 dati anziché 30). La dispersione dei dati rende dubbia la significatività del segnale.

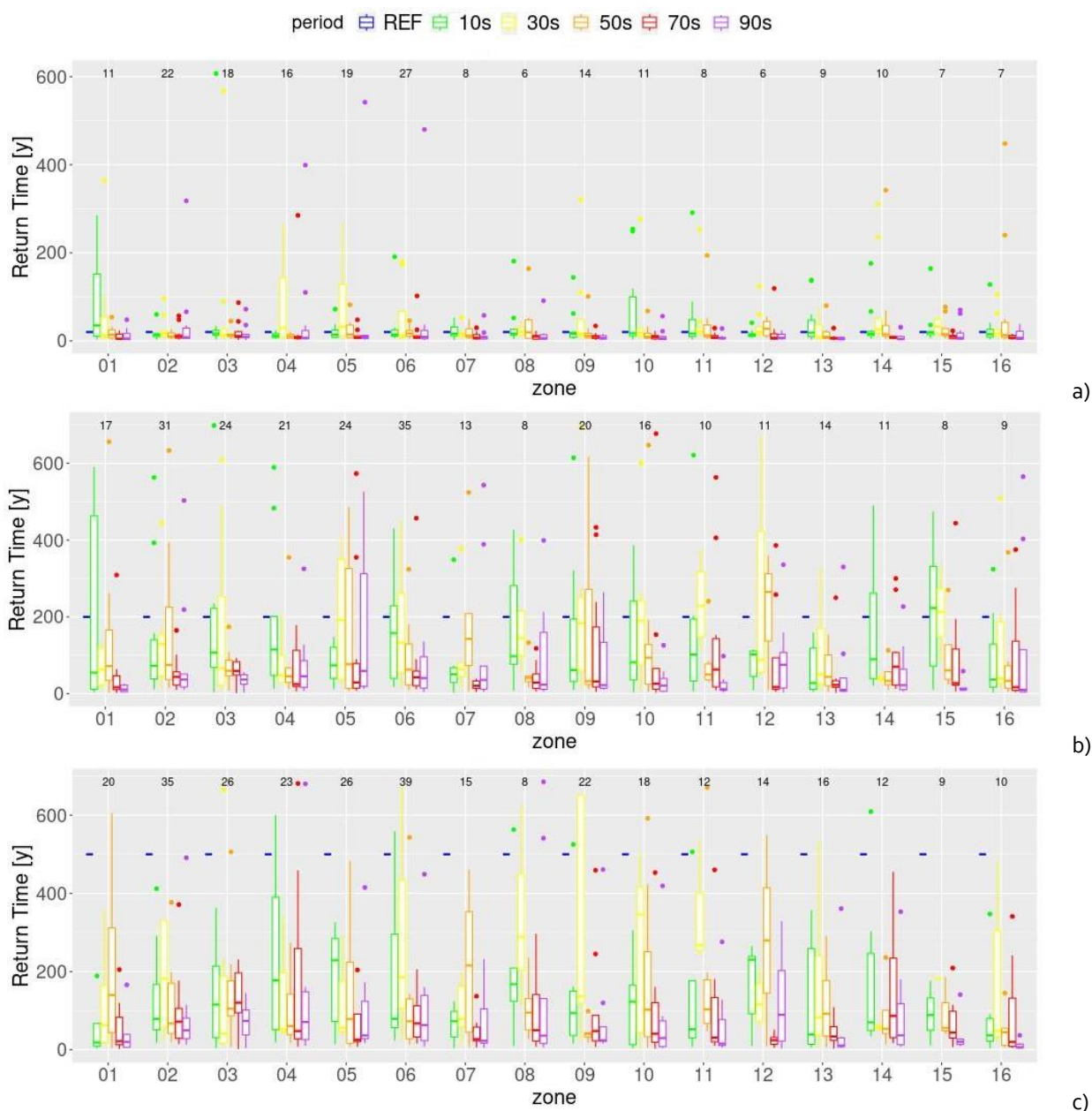


Figura 2.19 – Boxplot della distribuzione dei tempi di ritorno (asse y) dei modelli nei differenti ventenni per ciascuna zona omogenea (asse delle x) calcolati a partire da RL di precipitazione cumulata nelle 48 ore con RT = 20 (a), 200 (b) e 500 (c) anni in REF. Il livello in mm/(d·km<sup>2</sup>) per ciascuna zona è indicato come etichetta in alto. I colori blu, verde, giallo, arancio, rosso e viola si riferiscono rispettivamente ai ventenni 1981-2000, 2001-2020, 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 e sono indicati in legenda come REF, 10s, 30s, 50s, 70s e 90s.



L'analisi complessiva in quest'area *test* indica una riduzione dei RT delle piogge eccezionali e quindi un aumento della probabilità di occorrenza di eventi alluvionali nel lungo termine imputabile ai cambiamenti climatici in accordo con la letteratura allo stato dell'arte. Si rilevano, tuttavia, dei limiti nella metodologia di quest'analisi basata sull'EVA, poiché fornisce risultati statisticamente poco significativi e molto sensibili al campione in ingresso alla EVA stessa.

Inoltre, va considerata anche un'altra criticità nel metodo descritto: se eventi alluvionali nelle aree di piccoli bacini montani sono direttamente correlabili con eventi precipitativi estremi e quindi la corrispondenza tra tempi di ritorno delle piogge estreme e delle alluvioni è un'assunzione accettabile, si commette, invece, un errore di sottostima quando si considera l'asta principale del fiume, le cui inondazioni possono essere correlate sia alla pioggia che cade direttamente sulla zona, sia ai contributi di tutti i bacini a monte che la alimentano.

Al fine di superare questi limiti si propone nel successivo anno di ricerca di testare:

- tecniche, alternative alla classica EVA, che possano tenere conto della non stazionarietà del clima attuale e siano meno sensibili alla statistica del campione in ingresso;
- l'utilizzo di dati modellistici tri-orari che permettano di distinguere adeguatamente il comportamento dei bacini di piccole e di grandi dimensioni, avendo tempi di corrvazione e comportamenti differenti dal punto di vista idrologico.

Inoltre, si auspica l'estensione dell'analisi all'intero territorio italiano, come già effettuato per lo studio degli estremi climatici tramite indici e descritto ai paragrafi precedenti.



## 3 - SCENARI CLIMATICI FUNZIONALI ALLA CARATTERIZZAZIONE DEL PERICOLO D'INCENDI SUL TERRITORIO ITALIANO

### 3.1 Introduzione e stato dell'arte

Gli incendi boschivi sono una componente essenziale del sistema Terra, ma possono anche causare notevoli perdite umane ed economiche. A partire dalla fine del XVIII secolo, gli incendi catastrofici sono diventati sempre più ricorrenti. I Paesi dell'Europa meridionale, gli Stati Uniti e l'Australia sono alcuni Paesi in cui si sono registrate grandi tragedie, con incendi boschivi che hanno distrutto edifici, devastato comunità e, spesso, causato vittime, oltre che danni ambientali e grave inquinamento atmosferico.

Le influenze antropiche sull'attività degli incendi si sono accentuate a causa dell'industrializzazione e dei cambiamenti climatici. Ad esempio, l'insediamento di infrastrutture immerse nella vegetazione naturale contribuisce ad aumentare il rischio di incendi disastrosi dal punto di vista economico oltre che ambientale.

I ricercatori del *World Resource Institute*<sup>2</sup> affermano che negli ultimi 20 anni i grandi incendi hanno raddoppiato la superficie di territorio che riescono a coprire prima di essere spenti. Inoltre, denunciano che la perdita di biodiversità, che facilmente si verifica durante gli incendi, può portare a un'ulteriore velocità di propagazione degli incendi stessi. Da qui la necessità di agire nel monitoraggio delle aree più suscettibili per la prevenzione dei roghi. A scala globale si osserva una sostituzione della gestione indigena e tradizionale degli incendi con una lotta agli incendi su larga scala e della gestione dei combustibili [49]. Tuttavia, nel periodo 2003 -2020 è stato osservato un aumento del 25% degli incendi rispetto all'era preindustriale a causa di condizioni climatiche critiche, quali siccità del terreno e basso livello di umidità nell'aria e nella vegetazione [50]. In un recente studio condotto da ricercatori dell'Università del Maryland [51], si afferma che gli incendi boschivi provocano oggi una perdita di copertura arborea di 3 milioni di ettari in più all'anno rispetto al 2001 - un'area grande all'incirca come il Belgio - e rappresentano più di un quarto di tutta la perdita di copertura arborea degli ultimi 20 anni. In Europa, nonostante i molti soldi spesi per la prevenzione, in media si verificano 70.000 incendi ogni anno che bruciano più di mezzo milioni di ettari di aree forestali con un elevato numero di vittime: 307 negli anni 1998-2009, la maggior parte dei quali (85% del totale) si sono verificati nell'Europa mediterranea [52] [53] [54].

Il Sistema europeo di informazione sugli incendi boschivi EFFIS (*European Fire Information System*<sup>3</sup>) monitora un'area comprendente 43 Paesi in Europa, Medio Oriente e Nord Africa e permette di avere una panoramica degli incendi boschivi nell'area coperta dal Sistema stesso. Esso fornisce dati a partire dal 2000, con indicazioni relative anche all'estensione dell'area bruciata e alle caratteristiche di propagazione dell'incendio. L'estate del 2017 sarà probabilmente ricordata come una delle più devastanti dall'inizio delle registrazioni [55]. Il 2021 è stato un altro anno di grandi incendi e, conseguentemente, di enormi impatti. Il periodo più grave è stato quello tra il 1° e il 18 agosto, con diversi incendi catastrofici a seguito di un'ondata di calore che ha interessato l'Europa meridionale.

Nella recente pubblicazione di JRC [56] si trova un'analisi dettagliata relativa ai principali incendi verificatisi nel 2021 in alcuni Paesi del Mediterraneo: la superficie totale bruciata è di 1.113.464 ettari, un'area simile a quella mappata nel 2020. In totale, 500.566 ettari sono stati bruciati nell'UE, 417.807 ettari in altri Paesi europei e 195.091 in Medio Oriente e Nord Africa. Di questi, 102.598 ettari sono stati bruciati in aree protette, ovvero aree di particolare interesse per la presenza di specie e habitat preziosi e minacciati.

<sup>2</sup> <https://www.wri.org/insights/global-trends-forest-fires>

<sup>3</sup> <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>

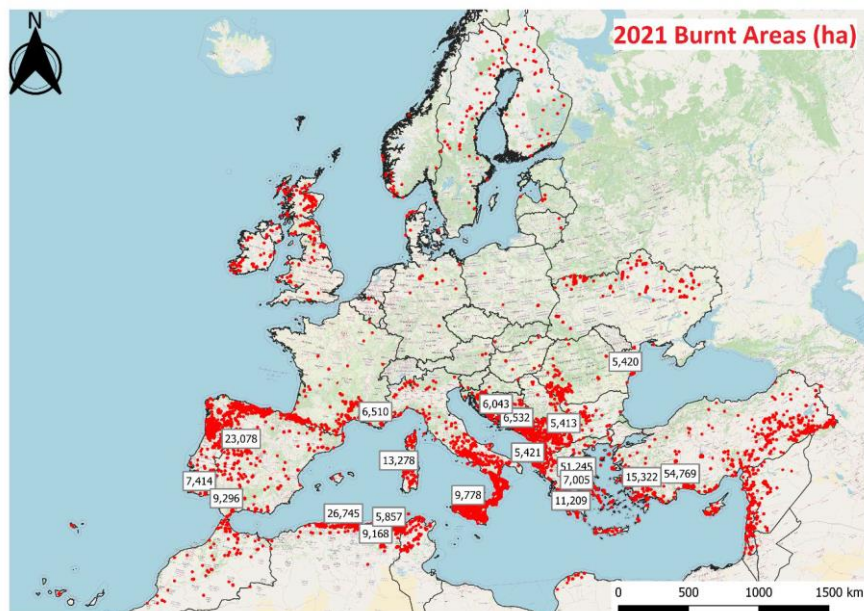


Figura 3.1 – Aree bruciate mappate durante la stagione degli incendi 2021. Gli incendi più grandi sono indicati in ettari (Fonte [56]).

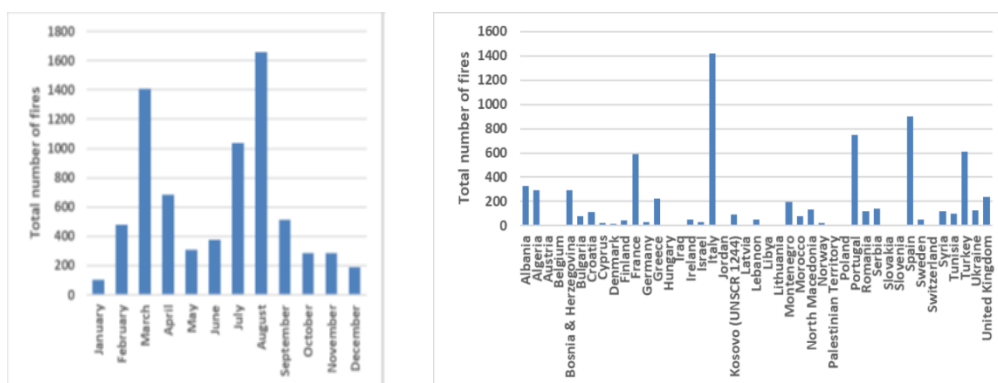


Figura 3.2 – Numero totale di incendi per mese (sinistra) e Paese (destra) nel 2021 (Fonte [56]).

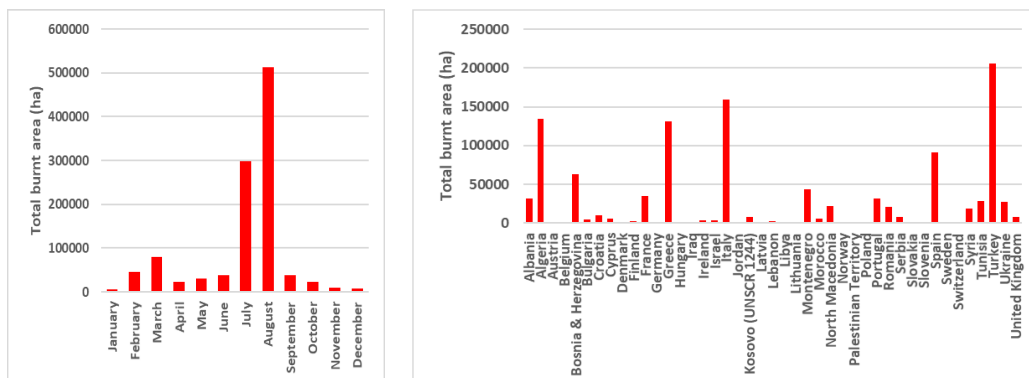


Figura 3.3 – Area bruciata totale degli incendi per mese (sinistra) e Paese (destra) nel 2021 (Fonte [56]).

Guardando la mappa e gli istogrammi nelle Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3, si osserva come il nostro territorio sia tra le aree più colpite del Mediterraneo, sia in termini di numero di incendi che di estensione di aree bruciate.



A livello europeo, la stagione 2023 è stata decisamente peggiore della media di quanto avvenuto negli anni fra il 2006 e il 2022 in termini di superficie di territorio bruciato. Al 31 agosto nei Paesi della UE sono bruciati complessivamente quasi 412mila ettari di territorio, rispetto ad una media di 347mila negli stessi periodi. Nel 2023, fra gennaio ed agosto, si sono sviluppati nella UE 1.230 incendi rispetto alla media annua di 1002 degli anni 2006-2022.

Per contrastare gli incendi boschivi e disporre di altre misure urgenti di protezione civile, nel 10/09/2021 entrava in vigore il Decreto-Legge convertito con modificazioni dalla L. 8 novembre 2021, n. 155 (in G.U. 08/11/2021, n. 266) ss. mm. ii.

Con riferimento all'analisi di ISPRA in [57], nel periodo 1° gennaio – 23 agosto si è registrato in aumento l'estensione delle aree interessate da grandi incendi boschivi, superando 64.000 ha, di cui oltre 10.000 hanno riguardato ecosistemi forestali, in gran parte della macchia mediterranea, boschi di leccio (63%), boschi e rimboschimenti di conifere (20%). L'Italia meridionale risulta la parte più colpita dal fenomeno. Infatti, nel comunicato si legge: "l'89% delle aree bruciate fino ad oggi risultano in Sicilia (72%) e in Calabria (17%). La provincia di Palermo risulta la più impattata (oltre 15800 ha, di cui il 20% foreste), a seguire la provincia di Reggio Calabria (8500 ha, il 18% di foreste), la provincia di Messina (5300 ha, il 19% di foreste) e la provincia di Siracusa (4300 ha, il 23% foreste). In crescita anche il numero di aree naturali protette con ecosistemi forestali percorsi da incendio. Le aree protette maggiormente colpite sono in provincia di Palermo (7), Caltanissetta (7), Siracusa (3) ed in provincia di Agrigento (3)".

Focalizzandoci sulla fenomenologia [58], l'insorgenza di un incendio è possibile se sono presenti simultaneamente tre elementi: una fonte di calore, l'ossigeno e il combustibile che, nel caso degli incendi boschivi, è dato dalla vegetazione. Una volta attivata la combustione, l'incendio produce energia che, trasferendosi dal focolaio verso l'ambiente circostante, permette l'auto-alimentazione del processo di combustione e la propagazione dell'incendio.

I meccanismi che concorrono a trasmettere l'energia dell'incendio sono l'irraggiamento, la convezione, la conduzione e il trasporto di tizzoni ardenti. Questi hanno maggiore/minore rilevanza a seconda delle condizioni ambientali, ovvero delle condizioni meteorologiche, dello stato della vegetazione e della topografia.

Le condizioni meteorologiche possono influenzare la probabilità di innesco di un incendio e la sua propagazione in vario modo. I fattori di influenza sono:

- 1) l'umidità atmosferica, la temperatura, la radiazione solare e le precipitazioni poiché determinano l'umidità della vegetazione/suolo e quindi incidono sull'energia necessaria per portare il combustibile alla temperatura di ignizione;
- 2) l'elettricità atmosferica, poiché i fulmini possono scatenare direttamente un incendio;
- 3) la direzione e l'intensità del vento e la stabilità atmosferica, in quanto possono aumentare/ridurre il flusso di ossigeno disponibile per il processo combustivo.

La vegetazione influisce sull'evoluzione di un incendio in quanto costituisce lo strato di combustibile sul quale il fuoco si propaga. A seconda delle caratteristiche della vegetazione (quantità, umidità, altezza, rapporto biomassa/necromassa, rapporto superficie/volume, grado di compattezza, distribuzione spaziale sia orizzontale che verticale), un incendio può assumere comportamenti diversi: basse quantità di combustibile determinano in generale incendi di ridotta intensità ma in grado di propagarsi rapidamente; elevati carichi di vegetazione infiammabile sono responsabili della produzione di incendi che producono grandi quantità di energia e sono più difficili da controllare.

Ultimo fattore è la topografia che, a differenza dei precedenti che sono variabili nello spazio e nel tempo, è di tipo statico, ovvero variabile solo nello spazio. La caratteristica topografica che influenza maggiormente il comportamento di un incendio è la pendenza. Essa, infatti, influisce sul preriscaldamento del combustibile vegetale e, comunque, a parità di altre condizioni, un incendio su un'area a pendenza elevata ha una velocità di propagazione e intensità molto superiori rispetto a incendi su aree pianeggianti.

Per quanto riguarda il sistema energetico, gli incendi rappresentano sia un grave pericolo per il danneggiamento delle infrastrutture che si trovano direttamente avvolte dalle fiamme, sia un



serio problema nella gestione delle reti per la messa fuori servizio di intere linee nelle aree potenzialmente coinvolte nell'incendio per motivi precauzionali e di sicurezza anche per le operazioni di spegnimento [59].

Sono stati fatti molti tentativi per quantificare il potenziale impatto dei cambiamenti climatici sui rischi di incendio (per esempio, si veda [60]). Uno dei metodi più efficaci è quello di valutare l'evoluzione di indici di pericolo di incendio. Il più utilizzato al mondo è il *Fire Weather Index* (FWI) [61] [62], progettato inizialmente per esigenze operative e di protezione civile al fine di stimare il pericolo di incendio per un tipo di combustibile generico. FWI è definito in base ai dati giornalieri di temperatura, precipitazioni, umidità relativa, per descrivere il contenuto di umidità dei combustibili forestali, e di vento, per tenere conto della modalità di propagazione.

FWI è parte integrante del sistema nazionale di valutazione del rischio di incendi boschivi in Canada (*Canadian Forest Fire Danger Forest Danger Rating System*, CFFDRS), istituito nel 1979, e ha trovato ampia applicazione nei servizi di allertamento di diversi Paesi: Asia sud-orientale, Nuova Zelanda, Messico, Florida e Argentina, nonché nel Mediterraneo [63]. Uno studio comparativo di diversi metodi di valutazione del pericolo di incendi nel Mediterraneo [64] ha rilevato che le componenti del sistema FWI risultano ben correlate con l'attività degli incendi nel sud del Portogallo, in Spagna, Francia e Italia, sebbene la vegetazione e il clima mediterraneo siano nettamente diverse da quelli canadese.

A causa delle complesse interazioni incendio-uomo-clima e dell'incompletezza dei dati storici, è difficile fare proiezioni future circa le traiettorie dei regimi di incendio. Tuttavia, sono queste informazioni fondamentali per la pianificazione di strategie di adattamento e di mitigazione.

Nell'ambito delle attività della Ricerca di Sistema degli anni precedenti [65] era già stato analizzato il pericolo di incendi in Italia atteso nei prossimi decenni. Lo studio è stato ripreso negli anni successivi e poi pubblicato [66]. A questo scopo erano stati utilizzati diversi dati: il *dataset* osservativo E-OBS<sup>4</sup>, le rianalisi EURO4M-APGD<sup>5</sup>, ERA-Interim<sup>6</sup>, due simulazioni climatiche regionali CNRM-ALADIN<sup>52</sup> e ICTP-RegCM<sup>4</sup> del Progetto Med-CORDEX<sup>7</sup>, alla risoluzione spaziale di 0,11° e sette modelli del Progetto ENSEMBLES [67] a 25 km di risoluzione orizzontale.

In [66] erano state analizzate le condizioni meteorologiche favorevoli all'innescio degli incendi nonché i valori dell'indice FWI. Dai risultati ottenuti si erano dedotte proiezioni multi-modello allarmanti, in quanto si deduceva, rispetto al periodo storico 1971-2000, un aumento del pericolo di incendio di almeno il 20% entro il 2050 per la maggior parte dell'Italia in estate, caratterizzata da condizioni future sempre più secche e più calde, in linea con altri studi.

Nella presente attività di ricerca, sulla base di 12 simulazioni Euro-CORDEX modellistiche (Tabella 2.3), quindi sulla base di un *dataset* più nuovo e popolato di quello utilizzato in [66], si vogliono aggiornare gli scenari di pericolo d'incendio. A questo scopo, in analogia con quanto fatto precedentemente, si considera interessante analizzare prima le tendenze delle principali variabili meteorologiche che concorrono a creare le condizioni favorevoli all'innescio e alla propagazione degli incendi, ovvero gli scenari dei valori estremi di temperatura, precipitazione e vento.

Le condizioni climatiche estreme relative a temperature elevate e scarsità idrica, ovvero giornate torride, periodi siccitosi, ondate di calore, sono state già analizzate in precedenti rapporti di ricerca di sistema [68] [42] e descritte in pubblicazioni internazionali ad essi riconducibili [4] [69]. I risultati ottenuti indicano che, senza o con parziali azioni di mitigazione (RCP8.5, RCP4.5), già a breve termine, soprattutto l'Italia meridionale e le Isole dovranno fare i conti con una significativa variazione del regime pluviometrico: in generale, seppure le precipitazioni estreme saranno più frequenti e più distruttive soprattutto in Pianura Padana e sulle coste orientali italiane (§2.4), si prevede una diminuzione dei giorni umidi e, di conseguenza, un allungamento dei periodi di

---

<sup>4</sup> <http://eca.knmi.nl/download/ensembles/ensembles.php>

<sup>5</sup> <http://www.euro4m.eu/>

<sup>6</sup> <http://apps.ecwf.int>

<sup>7</sup> <http://wcrp-corde.x.ipsl.jussieu.fr/>



siccità, che si estenderanno progressivamente dall'estate all'autunno e poi anche alla primavera, in particolare nelle regioni meridionali.

Nel seguito si analizzano gli scenari attesi caratterizzanti le situazioni di vento forte, come ulteriore elemento di indagine fra le condizioni meteorologiche che determinano il rischio di incendio.

## 3.2 Dataset e Metodologia per l'analisi del vento forte

Come detto sopra, tra le variabili meteorologiche più rilevanti nell'evoluzione degli incendi, il vento è sicuramente determinante perché ne favorisce la propagazione soprattutto se di forte intensità. Pertanto, l'analisi del vento condotta in [42] [13] è stata affinata. In particolare, si è analizzato l'evoluzione del vento massimo giornaliero (*windmax*) considerando tre diversi *dataset* di riferimento, rispetto ai quali capire come elaborare le proiezioni future di vento sulla base dei modelli Euro-CORDEX (Tabella 2.3), ovvero come fare l'*ensemble* dei modelli considerando il fatto che c'è uno *spread* elevato tra i risultati modellistici per la variabile vento (vedi materiale supplementare di [16]).

I *dataset* di riferimento sono le rianalisi MERIDA HRES; CERRA<sup>8</sup> e AEOLIAN [70]:

- MERIDA HRES (MERIDA *High-resolution for Renewable Energy Sources*, breviter MERHRES), evoluzione di MERIDA [45], è una rianalisi a risoluzione di 4 km centrata sull'Italia, specificatamente sviluppata in RSE per applicazioni relative alle fonti rinnovabili, ottenuta con un *downscaling* dinamico, applicando il modello WRF a campi di ECMWF ERA5 (risoluzione 30 km). Per le parametrizzazioni fisiche utilizzate nella configurazione di MERHRES e per ulteriori approfondimenti sulle sue prestazioni si rimanda al rapporto di Ricerca di Sistema [71]. Il *dataset* è disponibile per il periodo 1986 – 2021.
- CERRA (*Copernicus regional reanalysis for Europe*) è un sistema che fornisce una rianalisi paneuropea ad alta risoluzione orizzontale (5,5 km) forzata dalla rianalisi globale ERA5. Essa utilizza una serie completa di osservazioni in situ e di informazioni satellitari. Il *dataset* è disponibile per il periodo 2010 – 2019.
- AEOLIAN è un *dataset* ottenuto applicando il modello WRF su un dominio centrato sull'Italia, innestato sul dominio di calcolo di MERHRES, con risoluzione 1,33 km per il periodo 2015-2019 e poi esteso al periodo 1990-2019 mediante la tecnica statistica AnEn [70] con riferimento ai campi di vento di MERHRES. Il *dataset* è disponibile per il periodo 2000 – 2019.

La risoluzione temporale di MERHRES e AEOLIAN è oraria mentre quella di CERRA è trioraria. Quindi, per le rianalisi, il valore di *windmax* è ottenuto dal massimo tra i valori sub-giornalieri di ciascun *dataset*. Per i modelli climatici, invece, il valore di vento massimo giornaliero (sigla originale *sfcWindmax*) è disponibile direttamente dall'archivio Euro-CORDEX.

È stato considerato, come periodo di riferimento, il ventennio 2001-2020 e sono stati analizzati gli scenari futuri 2021-2040, 2031-2050, 2041-2060 (in analogia con studi precedenti) per indagare le eventuali variazioni attese nella prima metà del Secolo 21<sup>o</sup>, sotto l'ipotesi RCP8.5.

Dapprima, i valori delle rianalisi sono stati messi a confronto con 8 serie storiche disponibili, lunghe almeno 15 anni, fornite da alcune stazioni di misura in Emilia-Romagna (rete ARPA Emilia-Romagna) e Sicilia (rete SIAS), per avere un'indicazione<sup>9</sup> della rappresentatività delle rianalisi su un periodo piuttosto lungo.

Quindi, è stata analizzata la climatologia di *windmax* nel ventennio di riferimento 2001-2020 descritta dalle rianalisi e, sempre per lo stesso periodo 2001-2020, sono state esaminate le performance di ciascun modello nel riprodurre il clima attuale e individuare così il criterio più opportuno per produrre scenari multi-modello.

<sup>8</sup> <https://climate.copernicus.eu/copernicus-regional-reanalysis-europe-cerra>

<sup>9</sup> Si è detto "indicazione" e non "stima" perché il dato modellistico, rappresentativo del valor medio della griglia di calcolo, non è direttamente confrontabile con un dato osservato puntualmente soprattutto se la grandezza in oggetto è molto variabile nello spazio e nel tempo come è appunto *windmax*.



Infine, in analogia con studi precedenti [42] e con quanto descritto in §2.3.2, sono state elaborate le mappe di probabilità a diversi tempi di ritorno di *windmax* dal livello di intensità pari a 10 km/h fino a 200 km/h con passo 10 km/h, mediante la tecnica EVA, adottando il criterio *Block Maxima* e il metodo *L-moment* per definire la curva di distribuzione degli estremi.

### 3.3 Analisi della climatologia di riferimento

Con l'obiettivo di caratterizzare i valori estremi del vento tramite EVA, si sono considerati i valori dei massimi annuali di *windmax* nelle tre climatologie dedotte dalle rianalisi MERHRES, CERRA e AEOLIAN, ciascuna considerata nel suo più ampio periodo di sovrapposizione col periodo di riferimento 2001-2020. Esse sono descritte rispettivamente per riga in Figura 3.4 in termini di valor medio (1<sup>a</sup> colonna) e mediana (2<sup>a</sup> colonna), insieme alla deviazione standard (3<sup>a</sup> colonna) per rappresentare la variabilità spaziale dei massimi annuali di *windmax*.

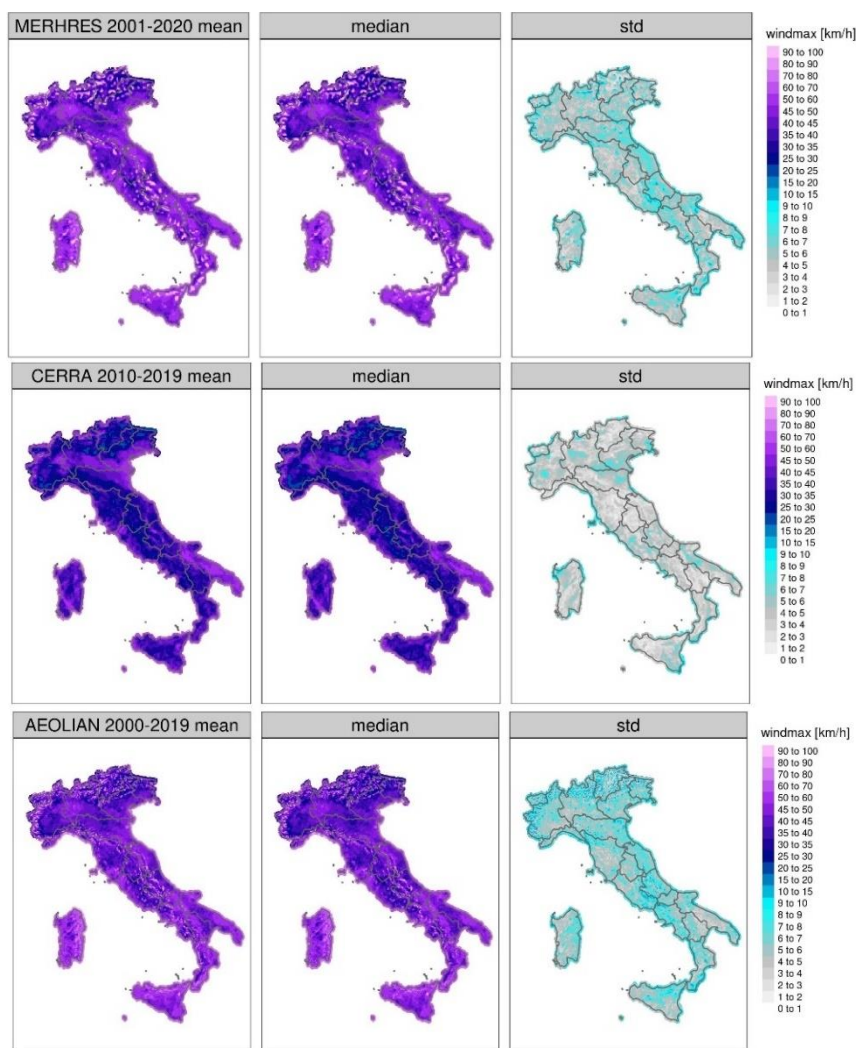


Figura 3.4 – Climatologia del regime anemologico descritta dai valori di intensità del vento massimo giornaliero [km/h] dedotto da MERHRES (1<sup>a</sup> riga), CERRA (2<sup>a</sup> riga) e AEOLIAN (3<sup>a</sup> riga), descritta in termini di valor medio (1<sup>a</sup> colonna) e mediana (2<sup>a</sup> colonna). La deviazione standard (3<sup>a</sup> colonna) indica la variabilità spaziale della variabile.

Confrontando le tre ricostruzioni, si evidenziano alcune differenze, in particolare risultano deboli le intensità descritte da CERRA rispetto ai valori stimati dai *dataset* MERHRES e AEOLIAN che, invece, descrivono valori di intensità e *pattern* spaziali del tutto confrontabili, con valori medi annuali e deviazioni standard massimi in corrispondenza delle creste montuose. I valori più bassi interessano correttamente la Valpadana e le zone dell'entroterra, tipicamente caratterizzate da venti deboli.

Le differenze tra CERRA e le altre due rianalisi è imputabile principalmente alla risoluzione temporale originale delle rianalisi stesse (trioraria per la prima e oraria per le altre due), che ha effetto sulla stima del vento massimo giornaliero, oltre alla limitata estensione temporale del data set CERRA.

Il confronto puntuale tra i valori di *windmax* annuali forniti dalle rianalisi con le osservazioni delle stazioni in Emilia-Romagna e Sicilia ha mostrato una generale sottostima delle rianalisi, mentre il confronto fatto coi modelli Euro-CORDEX è risultato più soddisfacente. Pertanto, si è preferito elaborare gli scenari climatici trattando i dati grezzi dei modelli climatici ricondotti alla risoluzione spaziale di 4 km, ovvero rimappati sulla griglia di MERHRES, con una semplice interpolazione bilineare. Si è fatto poi riferimento alle rianalisi per valutare qualitativamente i pattern spaziali ottenuti dalle ricostruzioni modellistiche.

Nell'analisi degli scenari di riferimento 2001-2020 dei massimi annuali per i singoli modelli Euro-CORDEX, si sono trovati risultati molto simili per le simulazioni realizzate con lo stesso modello regionale. A titolo esemplificativo, in Figura 3.5 si riportano gli scenari delle prime tre simulazioni elencate in Tabella 2.3, ottenute rispettivamente con i modelli regionali CLMcom-CCLM4, KNMI-RACMO22E e SMHI-RCA4.

La maggior differenza riguarda la ricostruzione del vento sulle Alpi. In particolare, si evidenziano limiti non trascurabili relativamente agli scenari dedotti dalle simulazioni ID 1 (CLMcom-CCLM4) e ID 2 (KNMI-RACMO22E). Infatti, tali scenari non ricostruiscono lo *speed up* del vento in corrispondenza alla cresta delle Alpi, come invece dovrebbe essere; descrivono invece una decelerazione del vento. Corretto è, invece, il pattern spaziale ottenuto dalla simulazione ID 3 (SMHI-RCA4) che descrive un vento particolarmente intenso proprio sui versanti settentrionali più elevati dell'arco alpino.

Pertanto, nel calcolo delle probabilità dell'*ensemble* modellistico (§3.4), si è scelto di operare in ciascun punto griglia non una media semplice fra i modelli, ma una media pesata ispirandosi a quanto proposto in [72], ovvero con pesi che decrescono in modo esponenziale rispetto agli scarti del vento massimo tra il modello e MERHRES nello scenario REF, normalizzati rispetto alla media del *bias* in valore assoluto dei modelli, come espresso nella formula 3.1:

$$p_{ens} = \sum_{i=1}^N a_i \cdot e^{-\left(\frac{b_i}{B}\right)^2} \cdot p_i \quad 3.1$$

dove:

$p_{ens}$ : probabilità dell'*ensemble* pesato per il singolo punto griglia

$p_i$ : probabilità del modello i-esimo per il singolo punto griglia

$i$ : indice del modello

$N$ : numero totale di modelli

$a_i$ : coefficiente di normalizzazione

$b_i$ : scarto (*bias*) fra il vento massimo del modello i-esimo e MERHRES nello scenario REF

$B$ : media del bias in valore assoluto fra i modelli.

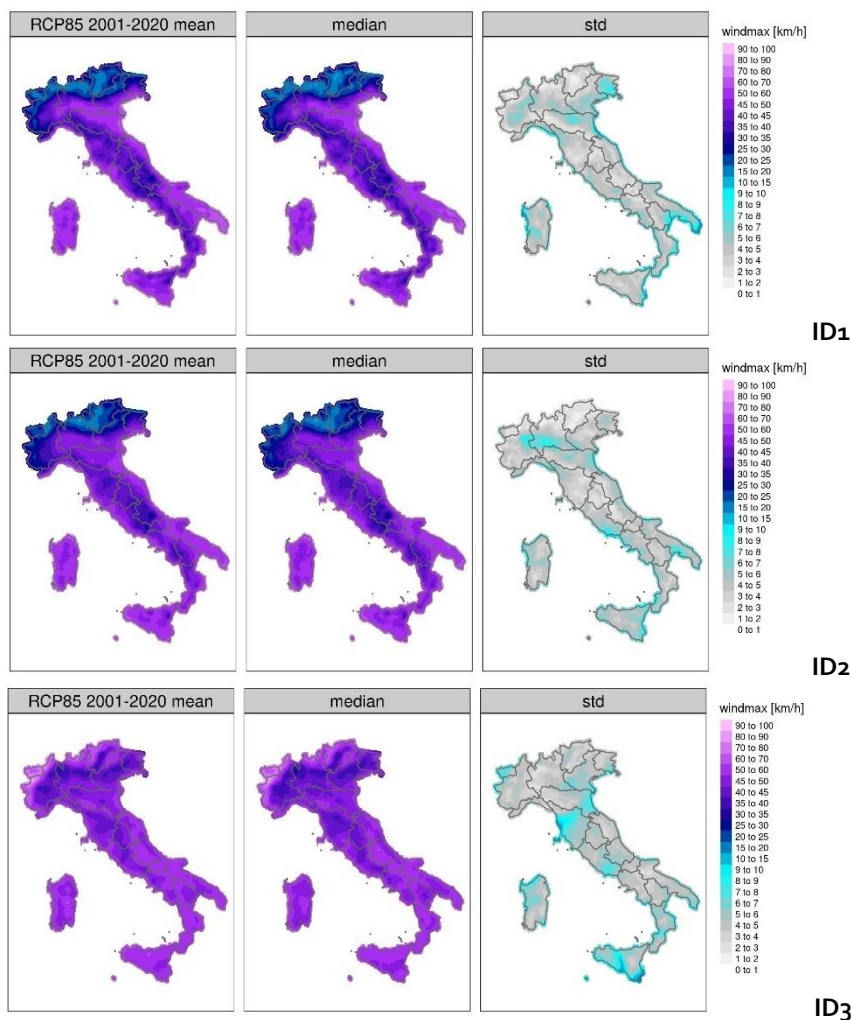


Figura 3.5 – Climatologia del regime anemologico descritta dai valori di intensità del vento massimo giornaliero [km/h] dedotto dalla simulazioni con ID=1 (prima riga), ID=2 (seconda riga) e ID=3 (terza riga), descritta in termini di valor medio (1^a colonna) e mediana (2^a colonna). La deviazione standard (3^a colonna) indica la variabilità spaziale della variabile.

### 3.4 Analisi delle mappe di probabilità

Nel seguito si riportano le mappe di probabilità ottenute mediante l'applicazione della tecnica EVA con il criterio *Block Maxima*. I tempi di ritorno sono calcolati per i livelli di intensità da 10 km/h a 200 km/h con passo 10 km/h.

Preliminarmente, sugli stessi punti di osservazione in Emilia Romagna e Sicilia, sono state generate le curve di distribuzione ottenute distintamente per ciascun modello. L'analisi ha mostrato una variabilità molto ampia anche tra simulazioni realizzate con lo stesso modello regionale (vedi colonna ID 3 e ID 10 rispetto all'osservato OBS in Figura 3.6). Inoltre, si è riscontrata una marcata divergenza delle curve di confidenza a tempi di ritorno paragonabili all'intervallo temporale considerato nell'analisi (20 anni) (vedi riga b in Figura 3.6).

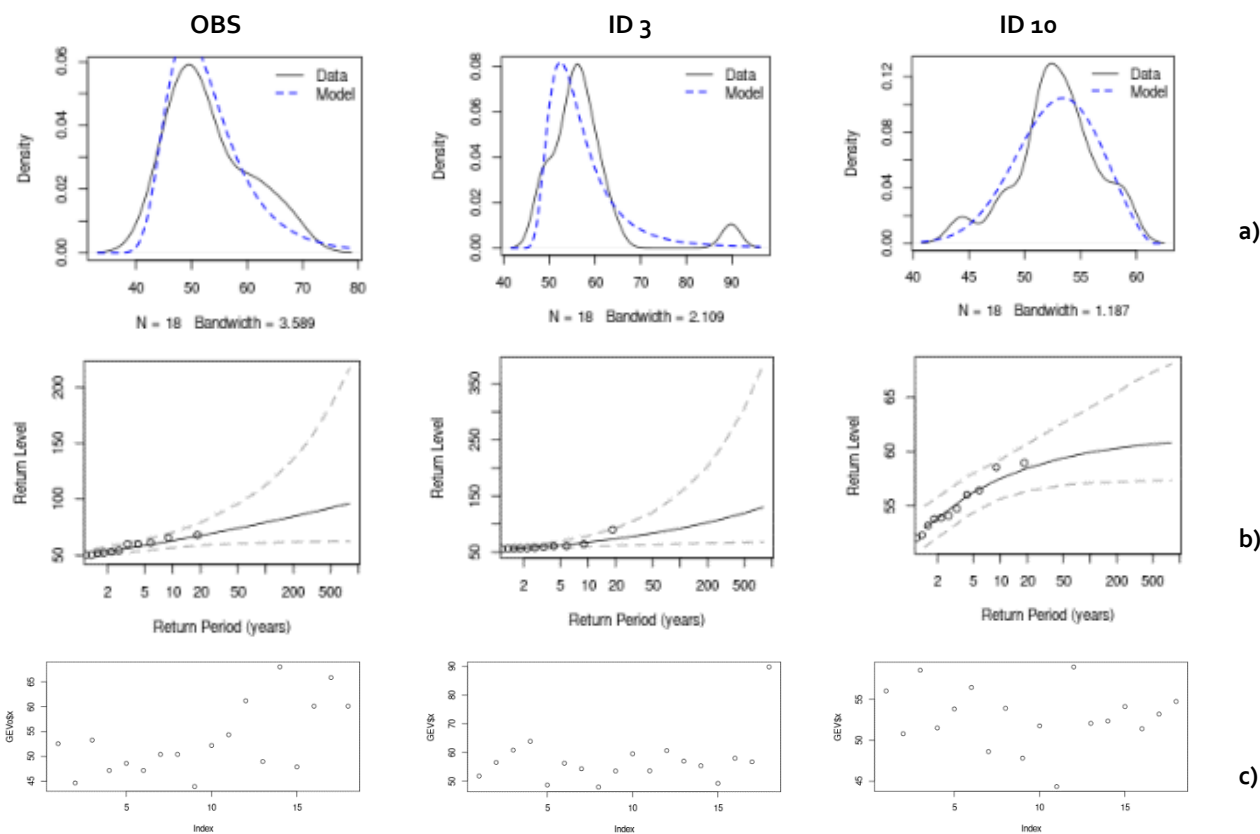


Figura 3.6 – Estratto della diagnostica EVA per la località Alia (Sicilia): a) curva della densità della distribuzione dai dati modellistici (linea continua) e modellizzata da EVA (linea blu tratteggiata); b) distribuzione RL vs. RT dei dati (pallini) e modellizzata (curva continua). Le linee tratteggiate indicano le curve di confidenza al 95%; c) *windmax* per ciascun anno del periodo 2002-2019, corrispondente al periodo di disponibilità dei dati osservati. La prima colonna si riferisce ai dati osservati (OBS), la seconda alla simulazione ID 3 e la terza alla simulazione ID 10.

Nonostante questo determini una forte incertezza nei risultati, si è proceduto, comunque, al calcolo dell'*ensemble* dei modelli, pesato tramite i valori di scenario della rianalisi MERHRES. In Figura 3.7 si riportano le mappe di probabilità calcolate per i dati MERHRES a diversi livelli di intensità. Sono state riportate le mappe solo fino a Lev100 (ovvero 100 km/h) in quanto per i livelli maggiori le probabilità sono praticamente nulle. Lo stesso vale per le mappe *multi-model* e, quindi, anche in questo caso, sono rappresentate in Figura 3.8 le mappe di probabilità fino al livello 100 km/h. Per la stessa ragione, in Figura 3.9 si riportano le anomalie per lo scenario 2021-2040 rispetto allo scenario di riferimento fino al valore 100 km/h. Analogamente, in Figura 3.10 e Figura 3.11 sono visualizzate le anomalie attese rispettivamente negli scenari 2031-2050 e 2041-2060. Relativamente al clima attuale, dal confronto tra la Figura 3.7 e Figura 3.8, si evince una ricostruzione modellistica soddisfacente in relazione alla distribuzione spaziale, in quanto, dalla media pesata dei modelli, si ritrovano praticamente le stesse strutture evidenziate dalla rianalisi: l'occorrenza annua di venti con intensità medio basse (< 40 km/h) ha probabilità di accadimento molto frequente (~1) sull'intero territorio; per intensità tra 50 km/h e 60 km/h i valori si mantengono ancora alti sui rilievi più elevati e sulle coste, ma si riducono drasticamente sulle restanti zone; per intensità > 70 km/h la rianalisi e la ricostruzione modellistica danno dei valori di probabilità nel tutto trascurabili.

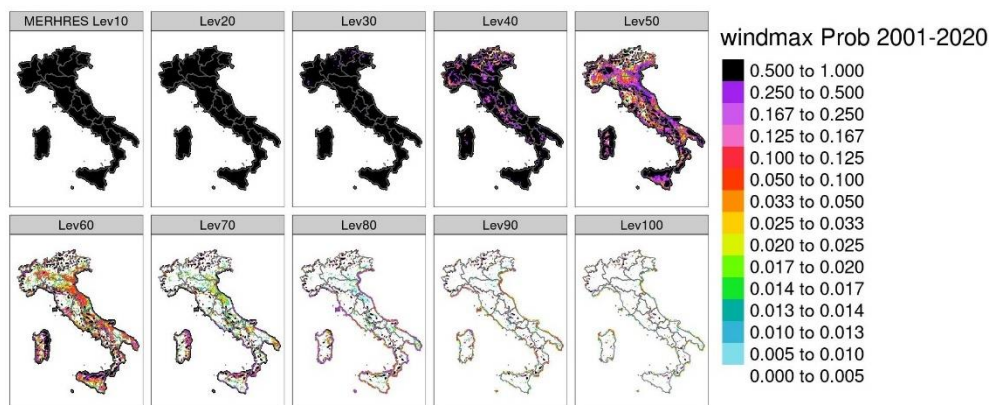


Figura 3.7 – Mappe di probabilità, ottenute applicando EVA ai dati MERHRES, a diversi livelli di intensità (Lev per colonna) per *windmax* nello scenario 2001-2020.

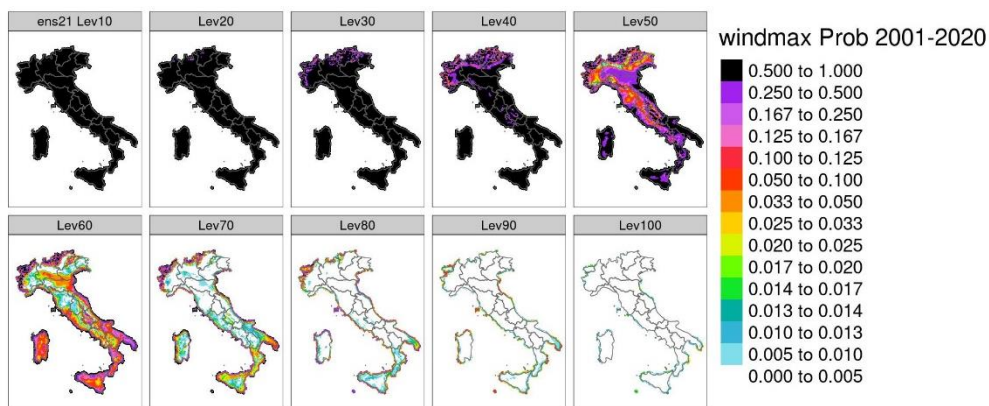


Figura 3.8 – Mappe di probabilità, ottenute applicando EVA a ciascun modello ed eseguendo poi la media pesata, a diversi livelli di intensità (Lev per colonna) per *windmax* nello scenario 2001-2020.

Poiché, invece nella realtà si verificano episodi con venti anche superiori a 100-120 km/h (come, ad esempio, durante la tempesta VAIA [43]), si deve concludere che il metodo utilizzato presenta alcuni limiti non trascurabili. Questi vanno, innanzitutto, ricercati nella qualità dei dati utilizzati, le cui risoluzioni spaziali e temporali sia per le rianalisi che per i modelli sono, evidentemente, troppo lasche quando si studiano fenomeni a scala spazio-temporale molto spinta com'è il vento forte. Nello specifico:

- le rianalisi sottostimano il vento forte, aspetto già emerso nel confronto puntuale con alcune stazioni di misura ma che non era stato generalizzato per la limitata estensione nello spazio e nel tempo del campione osservativo disponibile;
- i modelli climatici alla risoluzione 12 km (la più alta al momento disponibile), necessitano di un *downscaling* (statistico o dinamico) per riprodurre adeguatamente questi fenomeni, cosa che al momento non è stata fatta.

Nonostante tali limiti, un'indicazione della tendenza è illustrata dalle Figure 3.9, Figura 3.10 e Figura 3.11 rispettivamente per il breve, medio e lungo termine.

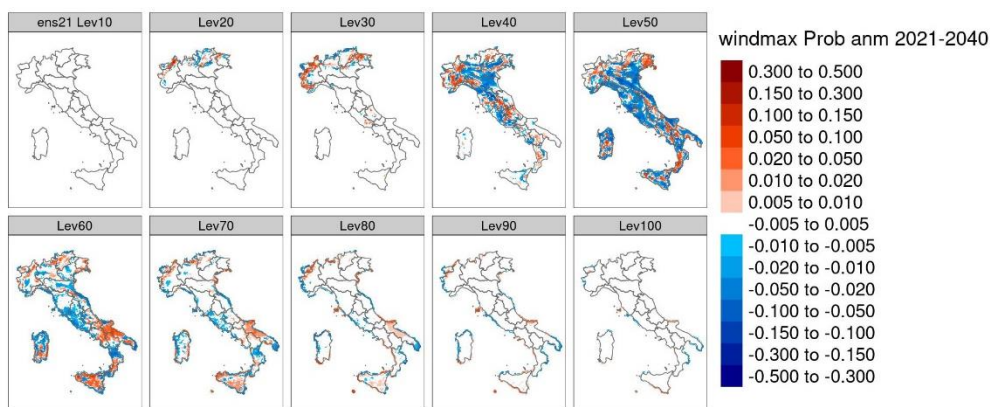


Figura 3.9 – Mappe di probabilità multi-modello come media pesata a diversi livelli di intensità (Lev per colonna) per *windmax* nello scenario 2021-2040, espresse come anomalie rispetto allo scenario di riferimento 2001-2020.

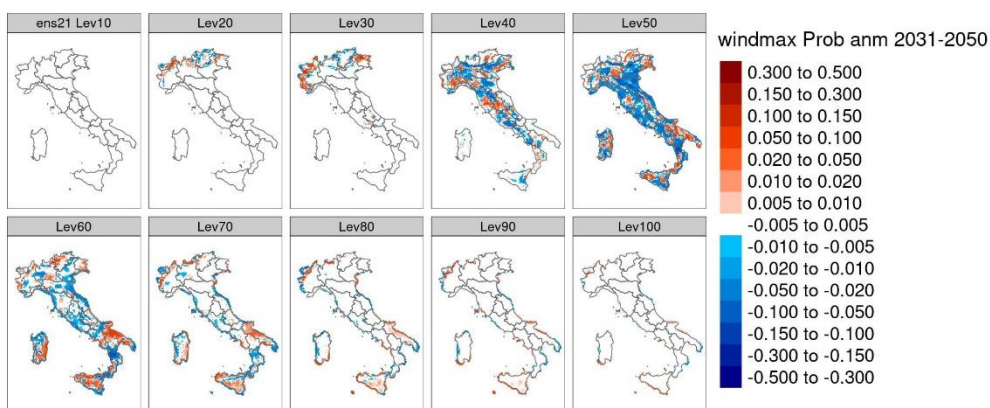


Figura 3.10 – Mappe di probabilità multi-modello com media pesata a diversi livelli di intensità (Lev per colonna) per *windmax* nello scenario 2031-2050, espresse come anomalie rispetto allo scenario di riferimento 2001-2020.

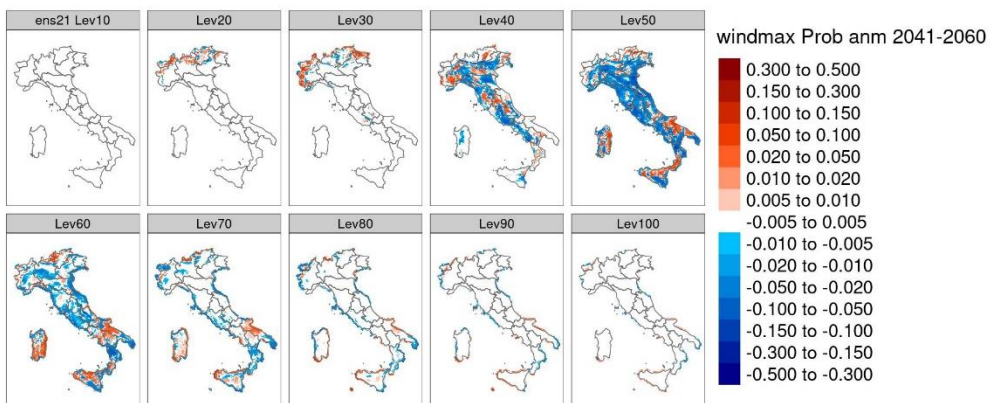


Figura 3.11 – Mappe di probabilità multi-modello com media pesata a diversi livelli di intensità (Lev per colonna) per *windmax* nello scenario 2041-2060 espresse come anomalie rispetto allo scenario di riferimento 2001-2020.

Confrontando visivamente le diverse mappe, si osservano pattern molto simili nei tre orizzonti temporali con variazioni di probabilità molto piccole, in diminuzione o in aumento. Ciò comporta, ad esempio, a medio-lungo termine per il livello 60 m/s in Valpadana orientale un aumento dei



tempi di ritorno dell'ordine di 10 anni e una riduzione sul Gargano della stessa entità. Si confermano così precedenti risultati secondo cui non sono attese variazioni significative del vento lungo il secolo, pur considerando l'intrinseca variabilità della grandezza vento e la dispersione fra i modelli. Ne consegue che l'impatto delle variazioni del regime anemologico sul pericolo di incendi, sarà ridotto rispetto a quello dovuto all'atteso innalzamento delle temperature e alle probabili modifiche del regime pluviometrico.



## 4 - CONCLUSIONI

Tra i fenomeni che possono mettere maggiormente a rischio il sistema elettrico, ci sono le alluvioni, le frane, gli incendi. Pertanto, nell'attività di quest'anno, sono state sviluppate delle metodologie per l'elaborazione di scenari climatici funzionali alla valutazione del rischio idrogeologico e alla caratterizzazione del pericolo d'incendi sul territorio italiano.

In particolare, per quanto riguarda il rischio idrogeologico, il sistema elettrico può subire gravi danni in caso di eventi precipitativi estremi. Questi, infatti, hanno la potenzialità di generare alluvioni, le quali possono allagare le stazioni primarie e secondarie o danneggiare la base dei piloni, oppure di innescare frane e smottamenti, i quali distruggono le infrastrutture sul loro percorso.

Relativamente agli incendi, essi rappresentano un grave pericolo per il sistema energetico, sia per i possibili danni alle infrastrutture che si trovano direttamente avvolte dalle fiamme, sia per la messa fuori servizio di intere linee nelle aree potenzialmente coinvolte nell'incendio, nonché per la sicurezza nelle operazioni di spegnimento.

A causa dei cambiamenti climatici, ci si attende, nei prossimi decenni, un'esacerbazione sia del rischio idrogeologico, dovuto alle modifiche del regime pluviometrico, sia del rischio incendi, per l'aumento di condizioni siccitose e ondate di calore. Quindi, in continuità con l'attività di ricerca condotta negli anni precedenti, è stata sviluppata una metodologia per elaborare scenari climatici futuri, relativi alle due minacce, sulla base dei modelli climatici Euro-CORDEX. A questo scopo, è stato selezionato un set di simulazioni realizzate sotto i tre diversi percorsi emissivi, i cosiddetti *Representative Concentration Pathways*: RCP8.5 (senza mitigazione, ovvero alte emissioni gas serra), RCP4.5 (mitigazione parziale), RCP2.6 (forte mitigazione, ovvero basse emissioni di gas serra). L'analisi ha quindi considerato anche l'ipotesi di forte riduzioni di gas serra, sebbene i percorsi emissivi RCP4.5 e RCP8.5 possano essere considerati i più probabili, secondo le analisi della serie storica globale delle misure a Plateau Rosa di CO<sub>2</sub> [13].

Relativamente al rischio idrologico, a valle di un'ampia ricognizione sullo stato dell'arte, sono stati analizzati gli scenari delle precipitazioni estreme tramite l'uso dell'indice R<sub>99pTOT</sub> che sintetizza la percentuale di precipitazione annua caduta con valori superiori al 99° percentile calcolato in un determinato periodo storico di riferimento. Inoltre, si è utilizzato l'indice STO (*Storm*), definito per stimare il numero di giorni all'anno, o per stagione, in cui contemporaneamente la pioggia supera il 99° percentile del periodo di riferimento e il vento è maggiore del 75° percentile del medesimo periodo di riferimento. Quindi, mentre R<sub>99pTOT</sub> descrive l'intensità delle piogge estreme e, quindi, può essere connesso direttamente a eventi alluvionali o franosi, STO cattura la concomitanza di un episodio alluvionale con il manifestarsi di venti moderati/forti, i quali possono danneggiare direttamente le infrastrutture elettriche, oppure causare danni indiretti tramite caduta di alberi o manufatti. La caduta di alberi, a sua volta, è favorita se il suolo è saturo d'acqua. L'analisi ha evidenziato che le precipitazioni estreme saranno più frequenti e più distruttive specialmente in Pianura Padana e sulle coste orientali; mentre il pericolo di episodi alluvionali, in concomitanza a venti moderati/forti, è atteso in aumento nel Centro-Nord Italia, in aree già storicamente afflitte da questi eventi meteorologici estremi.

È stata svolta un'ulteriore attività dedicata al rischio idrogeologico per supportare la stima della variazione dell'indice geomorfico di inondazione (GFI) coi cambiamenti climatici, utilizzato per identificare le aree inondabili e, conseguentemente, l'esposizione delle infrastrutture elettriche. Su un'area *test* del bacino del Po, sono state valutate, nel futuro, le variazioni dei tempi di ritorno delle precipitazioni estreme (aventi attualmente tempi di ritorno 20, 200 e 500 anni), a partire dalle cumulate nelle 24 e 48 ore, per zone omogenee/sottobacini, utilizzando l'*Extreme Value Analysis*. Si è trovata una generale tendenza alla riduzione dei tempi di ritorno delle piogge estreme, da cui è deducibile un aumento della probabilità di inondazioni, ma sono emersi alcuni limiti nella metodologia e qualche incertezza nei risultati a causa dello *spread* dei dati modellistici.



Pertanto, ci si prefigge, per il 2024, di esplorare altre tecniche e altri *dataset* modellistici per superare le debolezze emerse e di estendere l'analisi all'intero territorio italiano.

Riguardo agli incendi, il loro comportamento dipende da complesse interazioni fra le condizioni meteorologiche, la vegetazione e la topografia, tutti fattori ambientali che possono determinare una forte dinamicità spaziale e temporale nella loro evoluzione.

Con riferimento a studi condotti nel precedente triennio di ricerca, nonché a quanto sviluppato in [73], il potenziale impatto dei cambiamenti climatici sui rischi di incendio sarà quantificato attraverso il *Fire Weather Index* (FWI), un indice tra i più utilizzati al mondo. La sua stima si basa sul valore dei dati meteorologici giornalieri di temperatura, precipitazioni, umidità relativa, e vento. Prima di elaborare gli scenari di rischio di incendio con i modelli Euro-CORDEX, si è voluto investigare le variazioni delle diverse componenti meteorologiche. Gli scenari di temperatura e di precipitazione estremi erano stati studiati nelle attività degli anni precedenti e, relativamente alla precipitazione, anche nell'attività di quest'anno, in quanto funzionale alla valutazione del rischio idrogeologico. A completamento dello studio, si è analizzato il vento forte. A tale scopo sono state prodotte mappe di probabilità di accadimento a diversi livelli di intensità, applicando la tecnica EVA. I risultati non mostrano segnali di cambiamento significativi, piuttosto evidenziano forti incertezze sulle effettive variazioni del regime anemologico dovute al grande *spread* tra i modelli e alle caratteristiche della metodologia applicata.

Comunque, considerando gli scenari futuri elaborati per la temperatura e la precipitazione, nonché i risultati pubblicati in [66], è probabile che il pericolo d'incendi possa aumentare a causa della crisi climatica di origine antropica e, conseguentemente, possano peggiorare gli impatti economici e ambientali a causa degli incendi boschivi che, oltretutto, contribuiranno alle emissioni di gas serra, che sono in continuo aumento come si può osservare dal sito web OASI che riporta le misure aggiornate acquisite dalla stazione di Plateau Rosa (in Appendice 7.3).

Valutazioni quantitative sono previste a termine del triennio di ricerca, in quanto nel 2024 è pianificato uno studio in cui sarà calcolato l'indice FWI nelle diverse ipotesi di sviluppo socioeconomico.

Per arrivare a disporre di mappe di pericolo idrogeologico e di incendi, necessarie per la mitigazione dei danni causati da tali fenomeni, nel prossimo anno si amplieranno gli studi avviati: si produrranno mappe di pericolo di alluvioni, frane e incendi ampliando la base dati per incorporare, se possibile, conoscenze locali e si approfondiranno le tecniche con riferimento alla letteratura allo stato dell'arte per applicarle all'intero territorio nazionale.

Mappe di pericolo sull'Italia, a diversi orizzonti temporali, costituiscono indubbiamente un utile strumento per mitigare i danni causati dai cambiamenti climatici, in combinazione con la pianificazione e la progettazione dei paesaggi naturali e urbani. In particolare, permetteranno di attuare misure efficaci per rafforzare la resilienza del sistema energetico nazionale.

Si ricorda, inoltre, che nell'attività del 2023 è stato aggiornato il sito CLIMED, un sito Web GIS sviluppato per diffondere i risultati relativi ai diversi scenari di cambiamenti climatici, come descritto in Appendice 6 -. In Appendice 7 -sono, infine, descritti lo studio degli eventi di concentrazioni anomale di CO<sub>2</sub>, registrati nella stazione di misura di Plateau Rosa, l'aggiornamento del suo sito web di riferimento OASI e le attività condotte nell'ambito del Progetto ICOS.



## 5 - BIBLIOGRAFIA

- [1] IPCC, «Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,» [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge Univer, Cambridge, 2021.
- [2] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, «Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici,» dicembre 2023.
- [3] F. Giorgi, P. Lionello, «Climate change projections for the Mediterranean Region,» vol. 63, p. 90–104, 2008.
- [4] P. Faggian, «Future precipitation scenarios over Italy,» *Water*, vol. 13, n. 1335, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13101335>.
- [5] P. Lionello, L. Scarascia, «The relation of climate extremes with global warming in the Mediterranean region and its north versus south contrast,» *Reg. Environ. Chang.*, vol. 20, n. 31, 2020. doi: 10.1007/s10113-020-01610-z.
- [6] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - ISPRA, «Rapporto sulle condizioni da pericolosità da alluvione in Italia e indicatori di rischio associati,» 353/2021, 2021.
- [7] Istituto Superiore per la protezione e la Ricerca Ambientale - ISPRA, «Ecosistemi ed INCENDI FORESTALI: aggiornamento al 31 agosto 2023,» 2023. [Online]. Available: <https://www.isprambiente.gov.it/files2023/notizie/report3108incendi.pdf>. [Consultato il giorno 1° dicembre 2023].
- [8] G. Forzieri, A. Bianchi, F. B. e Silva, M. A. M. Herrera, A. Lebloise, C. Lavalle, J. C. J. H. Aerts, L. Feyen, «Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe,» *Global Environmental Change*, vol. 48, p. 97–107, 2018.
- [9] EIA - U.S. Energy Information Administration, «International Energy Outlook,» 2023.
- [10] Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente, «Documento per la consultazione 645/2017/R/EEL "Incremento della resilienza delle reti di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica,» 2017.
- [11] Terna S.p.A. ed RSE S.p.A., *Metodologia per il calcolo del beneficio per l'incremento della resilienza della RTN. Delibera ARERA 09/2022, Allegato A.76.*, 2022.
- [12] D.P. Van Vuuren; J. Edmonds; M. Kainuma; K. Riahi; A. Thomson; K. Hibbard; G.C. Hurtt; T. Kram; V. Krey; J.-F. Lamarque et al.;, "The representative concentration pathways: an overview," *Climatic Change*, vol. 109, no. DOI 10.1007/s10584-011-0148-z, p. 5–31, 2011.
- [13] P. Faggian, A. Trevisiol, F. Apadula, «Scenari climatici di manicotto di neve/ghiaccio e vento forte in relazione agli impatti sul sistema elettro-energetico nazionale,» *Ricerca di Sistema, RSE*, n. 22014043, Milano, 2022.
- [14] F. Giorgi; W. Gutowski, «Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative,» *Annu. Rev. Environ. Resour.*, vol. 40, p. 467–490, 2015.
- [15] G. A. Meehl, «Overview of the Copupled Model Intercomparison Project,» *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 86, pp. 89-93, 2005.
- [16] P. Faggian, A. Trevisiol, G. Decimi, «Future projections of wet snow frequency and wet snow load on overhead,» *Cold Regions Science and Technology*, vol. 217, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103980>.
- [17] L. Makkonen, «Estimation of wet snow accretion on structures,» *Cold regions science and technology*, vol. 17, n. 1, pp. 83-88, 1989.
- [18] M. Domínguez-Tuda, H. A. Gutiérrez-Jurado, «Global analysis of the hydrologic sensitivity to climate variability,» *Journal of Hydrology*, vol. 603 Part A, n. 126720, ISSN 0022-1694, 2021.
- [19] D. P. Panday, M. Kumar, «Climate indices and hydrological extremes: Deciphering the best fit model,» *Environmental Research*, vol. 215 Part 2, n. 114301, ISSN 0013-9351, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114301>.



- [20] Y. Trambly, D. Ruelland, D., S. Somot, R. Bouaicha, E. Servat, «High-resolution Med-CORDEX regional climate model simulations for hydrological impact studies: a first evaluation of the ALADIN-Climate model in Morocco,» *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 17, p. 3721–3739, 2013. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3721-2013>.
- [21] M. Osuch, D. Lawrence, H.K. Meresa et al., «Projected changes in flood indices in selected catchments in Poland in the 21st century,» *Stoch Environ Res Risk Assess*, vol. 31, p. 2435–2457, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1296-5>.
- [22] J. Kofi Mensah, E. A. Ofosu, S. M. Yidana, K. Akpoti, A. T. Kabo-bah, «Integrated modeling of hydrological processes and groundwater recharge based on land use land cover, and climate changes: A systematic review,» *Environmental Advances*, vol. 8, n. 100224, ISSN 2666-7657, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100224>.
- [23] X. Yang, Q. Liu, Y. He, X. Luo, X. Zhang, «Comparison of daily and sub-daily SWAT models for daily streamflow simulation in the Upper Huai River Basin of China,» *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 30, p. 959–972, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1099-0>.
- [24] M. García-Valdecasas Ojeda, F. Di Sante, E. Coppola, A. Fantini, R. Nogherotto, F. Raffaele, F. Giorgi, «Climate change impact on flood hazard over Italy,» *Journal of Hydrology*, vol. 615 Part A, n. 128628, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128628>.
- [25] A. Shadmehri Toosi, G.H. Calbimonte, H. Nouri, S. Alaghmand, «River basin-scale flood hazard assessment using a modified multi-criteria decision analysis approach: A case study,» *Journal of Hydrology*, vol. 574, n. ISSN 0022-1694, pp. 660-671, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.072>.
- [26] A. Shadmehri Toosi, S. Doulabian, E. G. Tousi, G. H.umberto Calbimonte, S. Alaghmand, «Large-scale flood hazard assessment under climate change: A case study,» *Ecological Engineering*, vol. 147, n. 105765, ISSN 0925-8574, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105765>.
- [27] S. Janizadeh, S. Chandra Pal, A. Saha, I. Chowdhuri, K. Ahmadi, S. Mirzaei, A. Hossein Mosavi, J. P. Tiefenbacher, «Mapping the spatial and temporal variability of flood hazard affected by climate and land-use changes in the future,» *Journal of Environmental Management*, vol. 298, n. 113551, ISSN 0301-4797, , 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113551>.
- [28] World Meteorological Organisation, Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 7, 2009.
- [29] M. Costea, «Using the Fournier Indexes in estimating Rainfall Erosivity: Case Study – The Secasul Mare Basin,» *Aerul si Apa. Componente ale Mediului*, pp. 313-320, 2012.
- [30] C. Samela, T. J. Troy, S. Manfreda, «Geomorphic classifiers for flood-prone areas delineation for data-scarce environments,» *Adv. Water Resour*, vol. 102, p. 13–28, 2017.
- [31] S. Manfreda, C. Samela, C., «A digital elevation model based method for a rapid estimation of flood inundation depth,» *J Flood Risk Management*, vol. 12 ( Suppl. 1), n. e12541, 2019. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12541>.
- [32] F. Viterbo, M. Lacavalla, S. Sperati, F. Cavalleri, B. Vitali, F. D'Amico, R. Bonanno, «Affinamento della rianalisi meteorologica e idrologica a supporto del sistema elettrico nazionale per l'individuazione delle minacce atmosferiche e al suolo,» *Ricerca di Sistema, RSE*, n. 23013107, Milano, 2023.
- [33] L. Alfieri, F. Dottori, R. Betts, P. Salamon, L. Feyen, «Multi-Model Projections of River Flood Risk in Europe under Global Warming,» *Climate*, vol. 6, n. 6, 2018. <https://doi.org/10.3390/cli6010006>.
- [34] L. Alfieri, P. Burek, L. Feyen, G. Forzieri, «Global warming increases the frequency of river floods in Europe,» *Hydrol. Earth Syst.*, vol. 19, p. 2247–2260, 2015. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2247-2015>.
- [35] L. Feyen, R. Dankers, K. B'odis, P. Salamon, J.I. Barredo, «Fluvial flood risk in Europe in present and future climates,» *Clim. Change*, vol. 112, p. 47–62, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0339-7>.
- [36] F. Di Sante, E. Coppola, E., F. Giorgi, «Projections of river floods in Europe using EURO-CORDEX, CMIP5 and CMIP6 simulations,» *Int. J. Climatol.*, vol. 41, p. 3203–3221, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7014>.
- [37] R. Vautard, N. Kadyrov, C. Iles et al., «Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble,» *J. Geophys. Res. Atmos*, vol. 126, n. e2019JD032344, , 2021. <https://doi.org/10.1029/2019JD032344>.



- [38] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - ISPRA, «Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio», 356/2021, 2021.
- [39] L. Mancusi, A. Abbate, «La pericolosità idrogeologica alla RTN: studi preliminari per la definizione una metodologia a scala nazionale», Ricerca di Sistema, RSE, n. 22014044, Milano, 2022.
- [40] Spano D., Mereu V., Bacciu V., Marras S., Trabucco A., Adinolfi M., Barbato G., Bosello F., Breil M., Chiriaco M. V., Coppini G., Essenfelder A., Galluccio G., Lovato T., Marzi S., Masina S., Mercogliano P., Mysiak J., Noce S., Pal J., Reder A., Rianna G., , Analisi del rischio. I cambiamenti, 2020. DOI: 10.25424/CMCC/ANALISI\_DEL\_RISCHIO.
- [41] A. J. Cannon, «Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables», *Clim. Dyn.*, vol. 50, p. 31–49, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>.
- [42] P. Faggian, G. Decimi, A. Trevisiol, «Hazard e multi-hazard assessment per il sistema elettrico», Ricerca di Sistema, RSE, n. 21010296, Milano, 2021.
- [43] L. Giovannini, S. Davolio, M. Zaramella, D. Zardi, M. Borga, «Multi-model convection-resolving simulations of the October 2018 Vaia storm over Northeastern Italy», *Atmospheric Research*, vol. 253, n. 105455, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105455>.
- [44] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - ISPRA, «I normali climatici 1991-2020 di temperatura e precipitazione in Italia», Stato dell'Ambiente 99/2022, 2022.
- [45] R. Bonanno, M. Lacavalla e S. Sperati, «A new high-resolution Meteorological Reanalysis Italian Dataset: MERIDA», *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 145, n. 721, pp. 1756-1779, 2019.
- [46] S. Coles, An introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Bristol UK: Springer, 2001.
- [47] F. Grazzini, G. Fragkoulidis, V. Pavan, G. Antolini, «The 1994 Piedmont flood: an archetype of extreme precipitation events in Northern Italy», *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, vol. 1, pp. 283-295, 2020.
- [48] F. Grazzini, G.C. Craig, C. Kheil, G. Antolini, V. Pavan, «Extreme precipitation events over northern Italy. Part I: A systematic classification with machine-learning techniques», *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 146, pp. 69 - 85, 2020.
- [49] D. M. J. S. Bowman, C. A. Kolden, J. T. Abatzoglou et al., «Vegetation fires in the Anthropocene», *Nature Rev Earth Environ*, vol. 1, p. 500–515, 2020. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0085-3>.
- [50] D. Richardson, A.S. Black, D. Irving et al., «Global increase in wildfire potential from compound fire weather and drought», *Climate and Atmospheric Science*, vol. 5, n. 23, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00248-4>.
- [51] A. Tyukavina, P. Potapov, M. C. Hansen et al., «Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019. Frontiers in Remote Sensing», *Frontiers in Remote Sensing*, 2022. doi: 10.3389/frsen.2022.825190.
- [52] A. Camia, T. D. Houston, J. San-Miguel-Ayanz, «The European fire database: development, structure and implementation», in *6th Intl. Conf. on For. Fire Res. Azo*, Coimbra, Portugal, 2010.
- [53] European Environment Agency, «Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe. An overview of the last decade, Technical Report No. 13/2010», Copenhagen, Denmark, 2010.
- [54] G. Schmuck, J. San-Miguel-Ayanz, A. Camia et al., «Forest fires in Europe 2010», Joint Research Centre–Institute for Environment and Sustainability, Eur, 24910, 2011.
- [55] Joint Research Centre, «Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2016», IRC Science for Policy Report. European Commission, Ispra (Italy), 2017. <http://effis.jrc.ec.europa.eu/reports-and-publications/annual-fire-reports>.
- [56] Joint Research Center, «Analysis of 2021 critical wildfire events in the Mediterranean region – European Commission», JRC Technical Report, Ispra (Italy), 2023. doi:10.2760/562495 KJ-NA-31-638-EN-N.
- [57] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - ISPRA, «Ecosistemi ed INCENDI FORESTALI: aggiornamento al 24 agosto 2023», 24 agosto 2023. [Online]. Available: [https://www.isprambiente.gov.it/files2023/notizie/report2408incendi\\_ispra.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/files2023/notizie/report2408incendi_ispra.pdf). [Consultato il giorno 1° dicembre 2023].



- [58] M. Salis, B. Arca, G. Pellizzaro, «Perche e come si propagano gli incendi,» SISEF, 1° luglio 2021. [Online]. Available: <https://sisef.org/2021/07/01/perche-e-come-si-propagano-gli-incendi/> . [Consultato il giorno 1° dicembre 2023].
- [59] M. de Nigris, E. Collino, P. Faggian, F. Viterbo, L. Minto, F. Pietrocola, S. Talomo, C. Vergine, «Wildfires as increasing threat to Overhead Lines: Experience in Italy,» in *INMR*, Bangkok, 2023.
- [60] T. J. Brown, B. L. Hall, A. L. Westerling, « The impact of twentyfirst century climate change on wildland fire danger in the western United States: an applications perspective.,» *Clim Change*, vol. 62, p. 365–388, 2004.
- [61] C. E. Van Wagner, «Development and structure of a Canadian forest fire weather index system. Forestry Technical Report 35,» Canadian Forestry Service, Ottawa, 1987.
- [62] B. Wotton B, M. Alexander M, S. Taylor, «Updates and revisions to the 1992 Canadian forest fire behavior prediction system.,» Information Report Number: GLC-X-10, 2009.
- [63] A. P. Dimitrakopoulos, A. M. Bemmerzoukb, I. D. Mitsopoulousa ID, «Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment,» *Meteorol Appl*, vol. 18, p. 83–93, 2011.
- [64] D.X. Viegas, G. Biovio, A. Ferreira, A. Nosenzo, B. Sol, «Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe,» *Int J Wildland Fire*, vol. 10, p. 235–246, 1999.
- [65] P. Faggian, R. Bonanno, «Climate Change and fire risk in Italy,» Ricerca di Sistema, RSE, n. 16002342, Milano, 2015.
- [66] P. Faggian, «Estimating fire danger over Italy in the next decades,» *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, vol. 3, n. 15, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41207-018-0053-1>.
- [67] P. Van Der Linden, J. Mitchell, «ENSEMBLES: climate change and its impacts: summary of research and results from the ENSEMBLES project,» Met Office Hadley Centre, Exeter, 2009.
- [68] P. Faggian, G. Decimi, «Future Scenarios of Climatic Extremes projected over Italy,» Ricerca di Sistema, RSE, n.19012830, Milano, Italy, 2019.
- [69] P. Faggian, A. Trevisiol, «Climate Extreme Scenarios affecting the Italian Energy System with a Multi-Hazard Approach,» *Submitted to the Journal Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, 2023.
- [70] S. Sperati, S. Alessandrini, F. D'Amico, W. Cheng, C.M. Rozoff, R. Bonanno, M. Lacavalla, M. Aiello, D. Airolidi, A. Amaranto, G. Decimi, M. A. Vergata, «A new Wind Atlas to support the expansion of the Italian wind power fleet,» *Wind Energy*, pp. 1-19, 2023. DOI: 10.1002/we.2890.
- [71] Matteo Lacavalla; Riccardo Bonanno; Simone Sperati, «Dataset MERIDA per il calcolo dei tempi di ritorno delle principali minacce meteorologiche per l'alimentazione dei modelli di vulnerabilità della rete,» Ricerca di Sistema, RSE, n. 20010741, Milano, 2020.
- [72] E. C. Massoud, V. Espinoza, B. Guan, D. E. Waliser, «Global Climate Model Ensemble Approaches for Future Projections of Atmospheric Rivers,» *Earth's Future*, vol. 7, p. 1136–1151, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019EF001249>.
- [73] R. Bonanno, M. Lacavalla, S. Sperati et al., «Affinamento di sistemi di previsione, allertamento e monitoraggio di minacce meteorologiche per la rete di trasmissione e distribuzione di energia elettrica,» Ricerca di Sistema, RSE, n. 23013119, Milano, 2023.
- [74] G. Decimi, P. Faggian, «Il sito web GIS CLIMED,» Ricerca di Sistema, RSE, n. Il sito web GIS CLIMED, Miano, 2019.
- [75] J. Brioude, D. Arnold, A. Stohl, M. Cassiani, D.; Morton, P. Seibert, W. Angevine, S. Evan, A. Dingwell, J. D. Fast, R. C. Easter, I. Pissio, J. Burkhardt, G. Wotawa, «The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1,» *Geoscientific Model Development*, vol. 6.6, pp. 1889-1904, 2013.
- [76] S. Trini Castelli, «MILORD - reload. Internal report ISAC-TO,» ISAC, Torino, 2012.
- [77] S. Ferrarese, F. Apadula, F. Bertiglia, C. Cassardo, A. Ferrero, L. Fialdini, C. Francone, D. Heltai, A. Lanza, A. Longhetto, M. Manfrin, R. Richiardone, C. Vannini, «Inspection of high-concentration CO<sub>2</sub> events at the Plateau Rosa Alpine station.,» *Atmospheric Pollution Research*, vol. 6.3, pp. 415-427, 2015.
- [78] M. Gallarate, *Analysis of extreme CO<sub>2</sub> concentration events at Alpine stations using a Lagrangian dispersion model - Tesi di laurea Magistrale*, Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Torino, 2023.



- [79] F. Apadula, C. Cassardo, S. Ferrarese, D. Heltai, A. Lanza, «Thirty Years of Atmospheric CO<sub>2</sub> Observations at the Plateau Rosa Station, Italy.,» *Atmosphere*, vol. 10.7, 2019.
- [80] D. Anfossi, S. Trini Castelli, «An outline of Lagrangian stochastic dispersion models. Chapter 8 in: D: Moreira, M. Vilhena M.,» in *Air Pollution and Turbulence: Modeling and Applications (1st ed.)*, CRC Press, 2009.

## 6 - APPENDICE: AGGIORNAMENTO SITO CLIMED

Il sito CLIMED (*CLimate analysis over MEDiterranean Region with focus over Italy*) è stato sviluppato per poter analizzare diversi scenari di cambiamenti climatici sull'Italia, dedotti elaborando i dati forniti dai più recenti *dataset*, relativi sia al clima osservato che a quello futuro, sulla base di alcune simulazioni modellistiche Euro-CORDEX (Tabella 2.3) nelle tre configurazioni RCP8.5, RCP4.5 e RCP2.6.

Il suo scopo è fornire, a livello grafico, una pluralità di risultati numerici che descrivono le condizioni climatiche future attese con diverse forzanti antropogeniche. Pertanto, le finalità di CLIMED sono complementari all'attività di diffusione condotta partecipando a conferenze nazionali e internazionali e scrivendo articoli *peer-review*.

Il sito CLIMED era stato realizzato nelle attività di ricerca del precedente triennio [74].

Le motivazioni che hanno portato all'aggiornamento del sito CLIMED nel corso delle attività di quest'anno sono due:

- l'aggiunta di nuove variabili e indicatori dedicati alla descrizione di effetti non rappresentati nella versione precedente;
- un aggiornamento del *framework* utilizzato (*Angular v.16*) per la realizzazione dell'applicazione *web*, dato che la versione del *framework* utilizzato precedentemente (*AngularJS*) è ormai troppo vecchia e non più supportata.

### 6.1 Descrizione del sito

CLIMED permette la visualizzazione di diverse variabili:

- variabili meteorologiche (es. temperatura media dell'aria, precipitazione, vento)
- indici di estremi climatici ETCCDI
- indici *multi-hazard* definiti *ad hoc* per caratterizzare situazioni particolarmente critiche per il sistema energetico

Il sito è stato organizzato per consentire l'analisi climatica di ogni singola grandezza, sia nel passato che nel futuro.

Infatti, una volta selezionata la variabile di interesse, la pagina presenta quattro pannelli che propongono mappe tematiche caratterizzanti i decenni passati e le proiezioni future.

A titolo esemplificativo, la Figura 6.1 mostra la pagina del sito CLIMED dedicata all'analisi della temperatura dell'aria con selezionato i *run* RCP4.5.

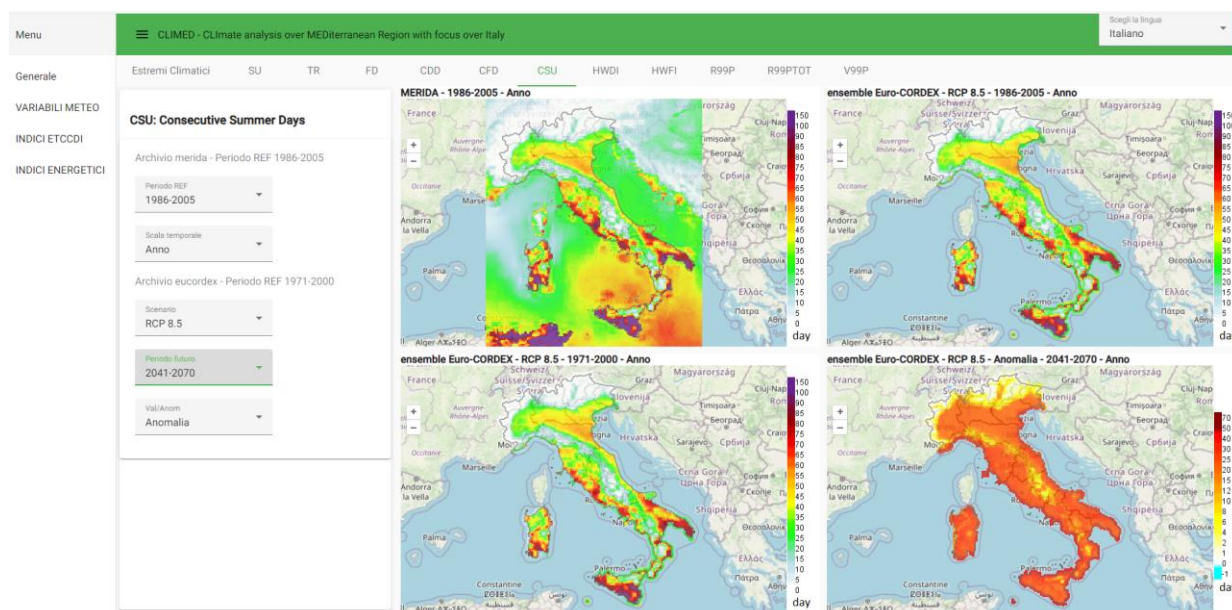


Figura 6.1 – Pagina di CLIMED che visualizza l'indice CSU (*Consecutive Summer Days*), rappresentativo della durata massima di giorni consecutivi con temperature massime superiori a 25°C in un dato periodo. In questa pagina CSU è visualizzato a scala annuale. La prima riga rappresenta CSU nel periodo 1986-2005 dedotto da MERIDA (a sinistra), a confronto con CSU ottenuto facendo un *ensemble* dei modelli (a destra). La seconda riga mostra lo scenario multi-model nel trentennio di riferimento 1971-2000 (a sinistra) e lo scenario 2021-2050 (a destra), espresso in termini di anomalie, nell'ipotesi del percorso emissivo RCP8.5. Dai menù a sinistra e dalla barra di navigazione è possibile esplorare facilmente altre variabili/indici per altri periodi/scenari a scala annuale/stagionale e in diverse ipotesi di forzanti radiative RCPs.



Relativamente alle variazioni climatiche storiche, è possibile confrontare gli scenari tra il passato lontano (1986-2005) e il passato vicino (2006-2019); riguardo alle variazioni future, è possibile comparare lo scenario del periodo di riferimento (1971-2000) con lo scenario atteso a breve termine (2021-2050), oppure a medio termine (2041-2070) o, ancora, a lungo termine (2071-2100).

Riguardo al passato, è possibile raffrontare gli scenari ottenuti con la rianalisi meteorologica MERIDA con quelli multi-modello. Questi ultimi sono dedotti dalle simulazioni *historical* per descrivere il passato lontano; invece, per il passato recente, sono visualizzabili i risultati modellistici nei tre diversi RCPs, secondo la selezione fatta dell'utente.

Riguardo al futuro, le proiezioni *multi-model* si riferiscono allo stesso RCP scelto nell'analisi del clima passato. Le proiezioni future possono essere raffigurate anche tramite le anomalie rispetto al clima di riferimento. Anzi, questa modalità di visualizzazione è consigliata perché permette di cogliere più chiaramente le variazioni attese.

## 6.2 Realizzazione del sito web

L'applicazione web CLIMED è di tipo *client/server* ed è stata costruita utilizzando il *framework Angular v.16* e la libreria di componenti *Angular Material* per la realizzazione dell'interfaccia utente.

Un database *PostgreSQL* con estensione geografica *PostGIS* gestisce l'archivio dei dati in diversi formati: tabelle, *shapefile*. La realizzazione delle mappe è gestita dal server geografico *GeoServer* installato come applicazione web sul server *Apache Tomcat*. Per costruire le mappe richieste dall'utente attraverso l'applicazione web, *GeoServer* impiega dati di tipo e formato differente (*raster e/o shapefile*). *GeoServer* produce "on the fly" le mappe e le fornisce come servizio WMS/OGC (*Web Map Service Open Geospatial Consortium*).

Attraverso un'interfaccia web di amministrazione di *GeoServer* è possibile impostare tutti i parametri (sistema di riferimento, modalità di rendering, colori, etc.) che definiscono ciascuna mappa pubblicata. *GeoServer* può inoltre essere amministrato con un'API (*Application Program Interface*) di tipo REST (*Representational State Transfer*). Questa modalità risulta utile quando il volume delle mappe da amministrare è tale da non essere più praticamente gestibile con la sola interfaccia web.

CLIMED è predisposto per visualizzare i grafici dell'andamento delle serie temporali delle variabili meteo o degli indici; questa funzionalità è stata realizzata con la libreria grafica *Dygraph* utilizzando i dati contenuti nel database *PostgreSQL*.

La pubblicazione sulla rete *Internet* dell'applicazione CLIMED avviene per mezzo del server web *Apache*.

Diversi linguaggi di programmazione sono stati utilizzati per l'implementazione di CLIMED: *Typescript/Javascript*, *HTML*, *PHP*, *SQL*, *CSS*.

Nella Figura 6.2 viene mostrato lo schema a blocchi dell'applicazione CLIMED.

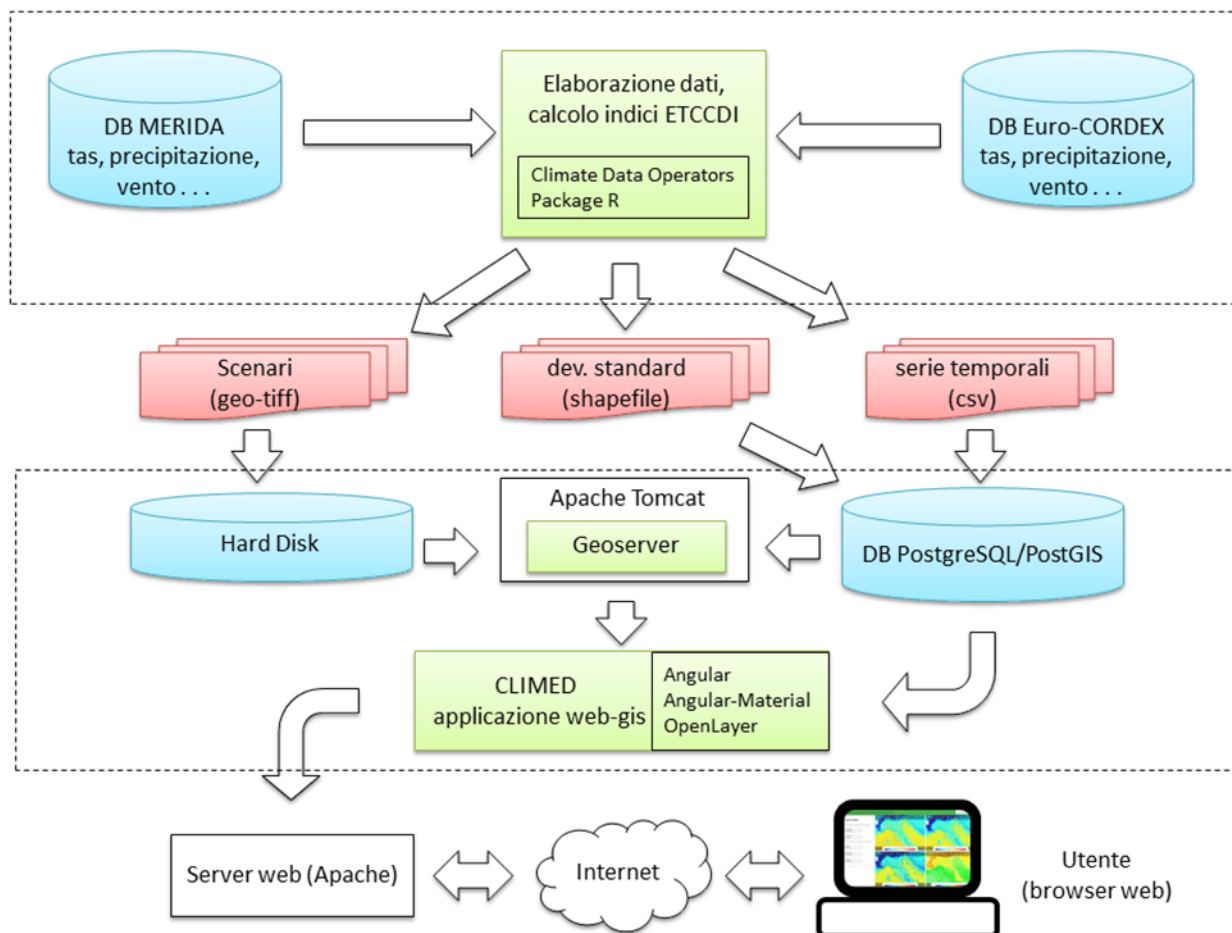


Figura 6.2 – Schema a blocchi dell'applicazione CLIMED.

## 7 - APPENDICE: STUDIO DEGLI EVENTI ANOMALI REGISTRATI NELLA STAZIONE DI MISURA DEL PLATEAU ROSA, PARTECIPAZIONE AL PROGETTO ICOS E AGGIORNAMENTO DEL SITO WEB OASI

Sono qui riportati i risultati ottenuti in merito allo studio degli eventi anomali di concentrazione di CO<sub>2</sub> registrati nella stazione di misura del Plateau Rosa. A tal scopo è stato utilizzato prevalentemente il modello FLEXPART [75], effettuando anche un confronto con i risultati ottenuti usando il modello MILORD [76]. Questi due modelli sono utilizzati per valutare il trasporto delle masse d'aria in arrivo al Plateau Rosa e risultano utili per stimare la localizzazione delle sorgenti di emissione. Sono, inoltre, sintetizzati i risultati ottenuti nell'ambito del progetto europeo ICOS (*Integrated Carbon Observation System*, <https://www.icos-atc.lsce.ipsl.fr/>) e indicati gli aggiornamenti effettuati sul sito web OASI (<https://oasi.rse-web.it/>).

### 7.1 Studio degli eventi anomali registrati nella stazione di misura del Plateau Rosa

La stazione di monitoraggio atmosferico di Plateau Rosa (PRS) è ubicata presso il laboratorio Testa Grigia (45.93°N, 7.71°E, 3480 m s.l.m.) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) ed è gestita da RSE S.p.A. È affiliata alla rete internazionale ICOS (*Integrated Carbon Observation System*) e fa parte del programma GAW (*Global Atmospheric Watch*). L'attività di monitoraggio della concentrazione di CO<sub>2</sub> atmosferica è iniziata nel 1989 con misurazioni episodiche ed è proseguita dal marzo del 1993 con misurazioni in continuo, rendendo così possibile di disporre ora di 30 anni di misure di CO<sub>2</sub>. La posizione isolata ed elevata della stazione è ideale per monitorare le concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> di *background* atmosferico non influenzate da sorgenti o pozzi locali. Tuttavia, in occasioni molto rare, masse d'aria con un contenuto elevato di gas serra possono raggiungere la stazione, determinando eventi di concentrazione estrema [77]. In questo lavoro, sono stati individuati gli eventi estremi presenti nella serie (Tabella 7.1) e sono state studiate le aree di provenienza nel corso di due episodi eseguendo simulazioni di rilascio all'indietro con il modello di dispersione lagrangiana FLEXPART-WRF [75]. Questa attività è stata effettuata in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Torino nel corso di una tesi di laurea magistrale [78].

Tabella 7.1 – Eventi di concentrazione estrema rilevati presso la stazione di PRS.

| Data       | Scarto (ppm) |
|------------|--------------|
| 14/12/1995 | 11.43        |
| 03/12/1997 | 11.90        |
| 11/11/1999 | 11.64        |
| 28/11/2003 | 11.25        |
| 19/02/2004 | 11.68        |
| 23/02/2004 | 12.17        |
| 22/02/2005 | 10.93        |
| 23/02/2005 | 10.37        |
| 28/02/2005 | 11.15        |
| 30/10/2007 | 10.95        |
| 06/03/2009 | 12.83        |
| 25/02/2013 | 11.70        |
| 08/11/2017 | 10.87        |



### 7.1.1 Identificazione degli eventi estremi di concentrazione di CO<sub>2</sub>

Per identificare gli eventi estremi sono state calcolate le concentrazioni medie giornaliere e considerate le loro deviazioni dalle medie mensili mobili di fondo. I valori del fondo atmosferico sono stati identificati applicando alle serie l'algoritmo *Background Data Selection* (BaDS) sviluppato da RSE nell'ambito di RdS [79]. I giorni in cui la deviazione dal fondo mensile superava la soglia di  $6\sigma$  (10.2 ppm) sono stati classificati come eventi di concentrazione estrema di CO<sub>2</sub>. Sono stati oggetti di ulteriori analisi gli episodi relativi all'8 novembre 2017 e al 19 e 23 febbraio 2004.

### 7.1.2 Il caso studio del 8 novembre 2017

L'evento estremo più recente si è verificato nel novembre 2017. La durata è stata di circa tre giorni con un picco di concentrazione pari a 421.31 ppm misurato alle 14:00 UTC dell'8 novembre (Figura 7.1). Le serie orarie del PRS (in blu) sono confrontate con quelle di altre due stazioni di monitoraggio alpine: la stazione svizzera di Jungfraujoch (JFJ, in rosso) e la stazione austriaca di Sonnblick (SNB, in verde). I dati suggeriscono che JFJ abbia identificato lo stesso evento, mentre SNB non sia stata coinvolta.

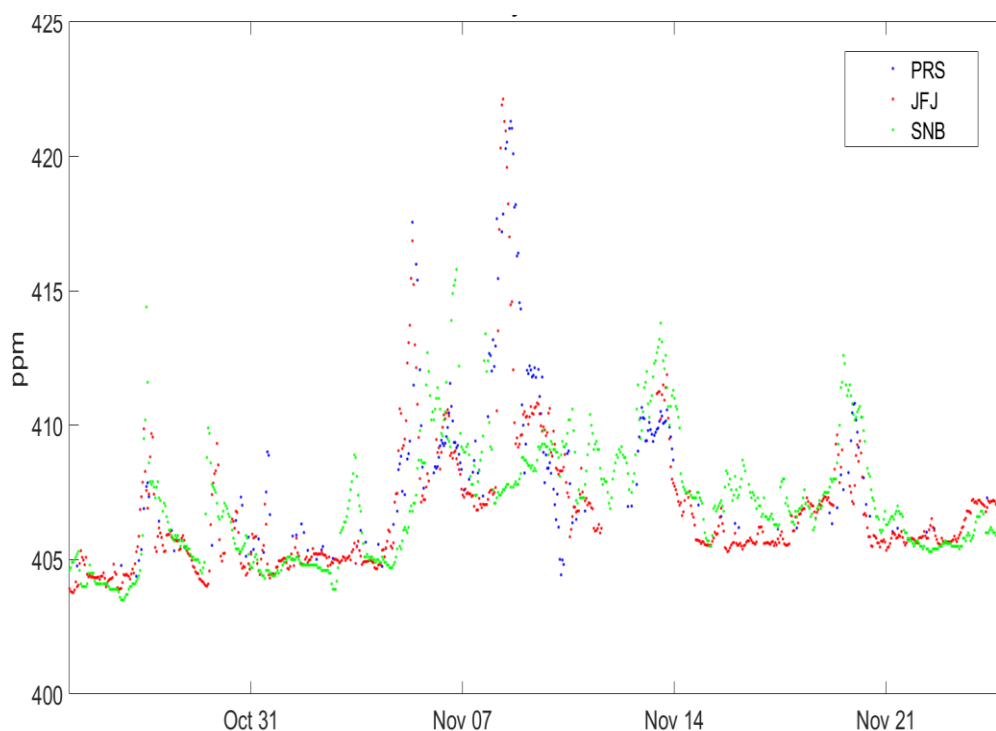


Figura 7.1 – Concentrazioni orarie di CO<sub>2</sub> atmosferica misurata presso le stazioni alpine PRS, JFJ e SNB.

### 7.1.3 Risultati delle simulazioni con FLEXPART-WRF

Il modello di dispersione lagrangiano *FLEXible PARTICle* WRF (FLEXPART-WRF) [75] è stato applicato per valutare le aree di provenienza delle particelle d'aria che trasportano la concentrazione elevata di CO<sub>2</sub>. I campi meteorologici in ingresso a FLEXPART sono stati forniti dalle simulazioni WRF (modello regionale di previsione meteorologica) eseguite su un dominio innestato con una risoluzione orizzontale di 3 km e 50 livelli verticali.

Sono state eseguite diverse simulazioni variando il tempo di rilascio e il numero di particelle, in particolare in Figura 7.2 è riportato il risultato di FLEXPART-WRF rilasciando 100.000 particelle durante 18 ore. Tutte le simulazioni effettuate hanno evidenziato la presenza di due flussi d'aria principali nelle ore precedenti l'evento. Il primo flusso proviene dal confine occidentale del dominio (dalla Francia orientale) e scorre ad alta quota, mentre il secondo che comprende la maggior parte delle particelle, scorre all'interno del *Planetary Boundary Layer* (PBL) sopra le regioni altamente industrializzate della Lombardia e del Veneto nella Pianura Padana. Quest'ultimo flusso sembra essere la fonte più probabile dell'evento studiato.



Date: 07/11/2017 21:00:00

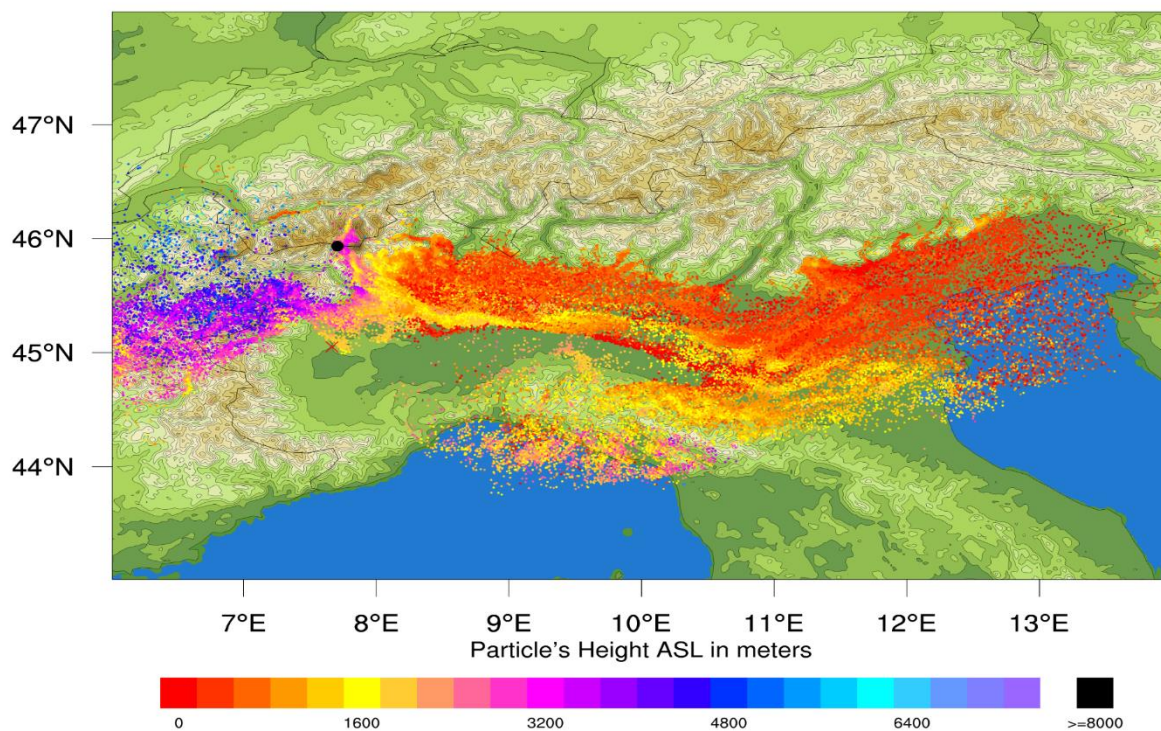


Figura 7.2 – Posizione delle particelle d'aria simulate da FLEXPART, rilascio presso la stazione di PRS di 100.000 particelle nel corso di 18 ore.

Sono state quindi eseguite ulteriori simulazioni all'indietro con particelle rilasciate presso JFJ e SNB. I dati di *input* sono stati forniti dallo stesso *run* WRF utilizzato per i rilasci da PRS. Entrambe le simulazioni FLEXPART sono iniziate l'8 novembre al mattino e si sono concluse il 7 novembre alle 00:00 UTC, 20.000 particelle sono state rilasciate da ciascuna stazione.

La simulazione relativa al rilascio di particelle da JFJ mostra risultati simili a quelli di PRS (Figura 7.3).

Date : 07/11/2017 20:00:00

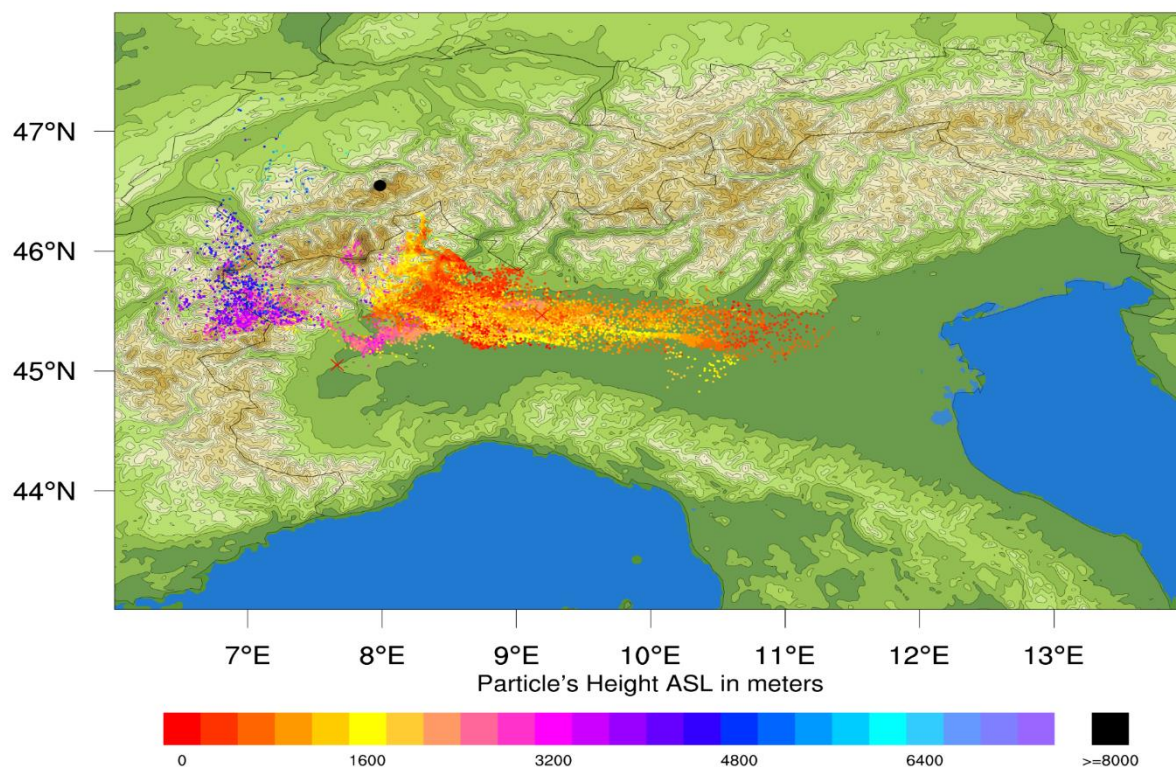


Figura 7.3 – Posizione delle particelle d'aria simulate da FLEXPART, rilascio presso la stazione di JFJ di 20000 particelle.

La simulazione identifica infatti due flussi d'aria principali: il primo proviene, ad alta quota, dal confine occidentale del dominio, mentre il secondo, che costituisce la maggior parte delle particelle, attraversa la Pianura Padana transitando negli strati atmosferici inferiori, ben all'interno del PBL.

Questo risultato conferma che l'evento di concentrazione estrema che ha colpito PRS ha coinvolto anche JFJ.

Le particelle simulate dalla simulazione FLEXPART con rilascio dalla stazione SNB seguono invece traiettorie differenti. L'analisi ha evidenziato la presenza di un unico flusso d'aria (Figura 7.4) che raggiunge la stazione dal confine orientale del dominio transitando al di sopra del PBL e sorvolando zone scarsamente popolate come il mare Adriatico e la regione dell'Istria. Il risultato di questa simulazione conferma che l'evento non è stato rivelato dalla stazione SNB.



Date : 07/11/2017 23:00:00

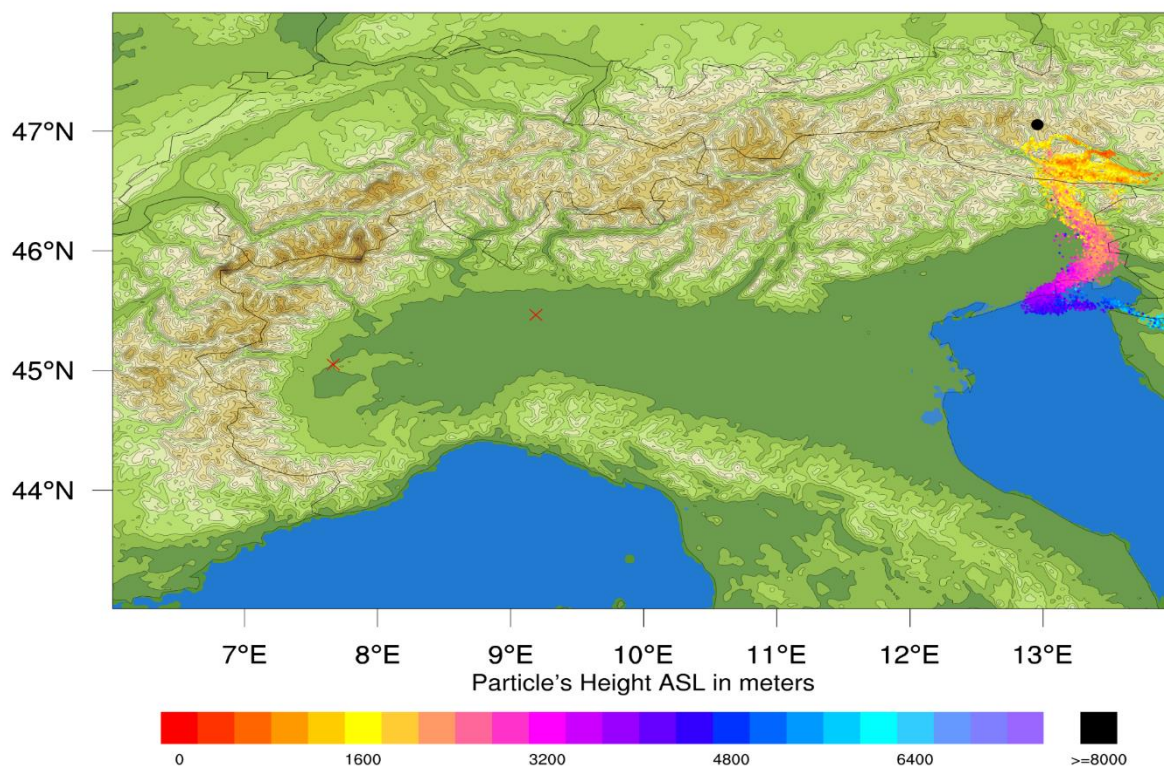


Figura 7.4 – Posizione delle particelle d'aria simulate da FLEXPART, rilascio presso la stazione di SNB di 20000 particelle.

#### 7.1.4 Confronto con il modello MILORD

Sono quindi state eseguite alcune simulazioni della durata di due giorni utilizzando il modello di particelle lagrangiane a lungo raggio MILORD (*Model for the Investigation of Long Range Dispersion*) [80] [76] con il rilascio di 10.000 particelle. L'*input* meteorologico è dato dalle analisi dell'ECMWF su un dominio a griglia di 0.5 x 0.5 gradi e 15 livelli di pressione verticale. L'emissione di 10.000 particelle è durata 1 ora dalle ore 14:00 UTC dell'8 novembre alle 13:00 UTC. I risultati della prima giornata di simulazione mostrano due principali segnali: uno corrispondente a masse provenienti dalle regioni industrializzate orientali dell'Italia (Pianura Padana) e che scorrono ad una quota prevalente al di sotto dei 1000 m, l'altro corrispondente a masse provenienti da ovest e nord -ovest (Francia occidentale) con quota di percorrenza prevalente superiore ai 3000 m. A scala regionale, MILORD replica i risultati riscontrati con FLEXPART-WRF, evidenziando il contributo principale della Pianura Padana.

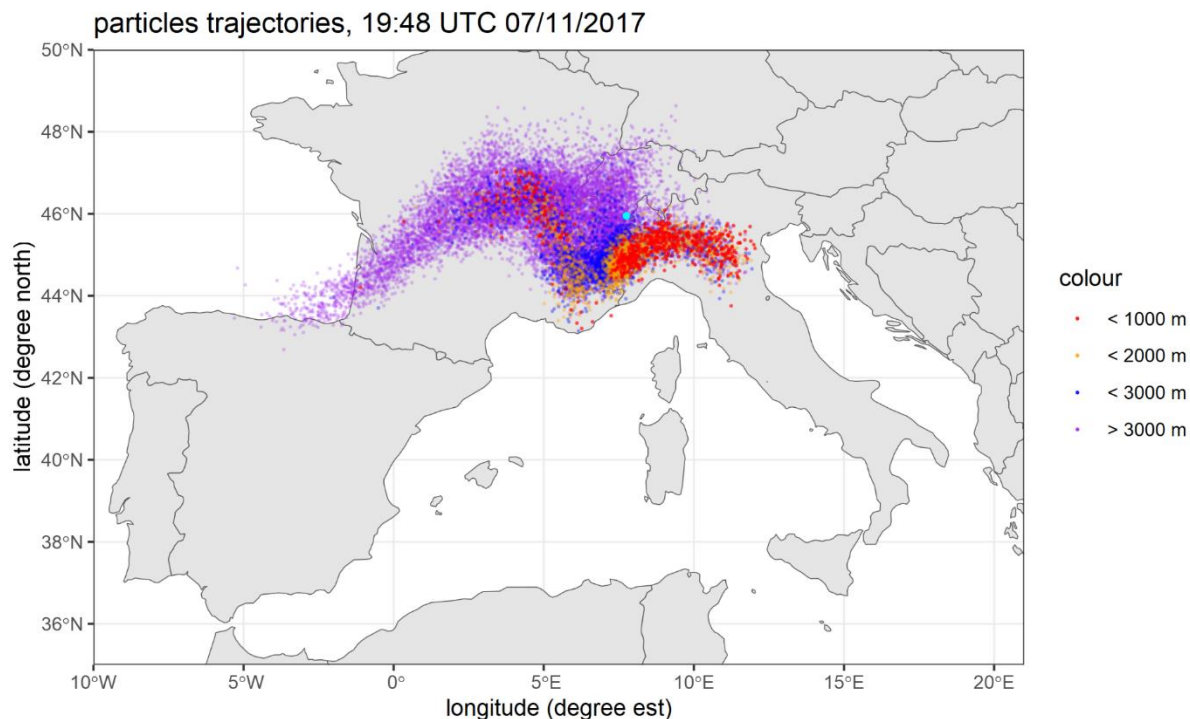


Figura 7.5 – Posizione delle particelle d'aria simulate da MILORD, rilascio presso la stazione di PRS di 10000 particelle.

### 7.1.5 Considerazioni finali

In quasi trent'anni di misurazioni in continuo, la stazione di monitoraggio alpino del Plateau Rosa ha registrato solo 13 eventi estremi di concentrazione di CO<sub>2</sub>. Questo fatto conferma che la stazione di Plateau Rosa è idonea per indagare lo stato atmosferico di fondo. Si è studiato l'evento più recente (8/11/2017) con simulazioni multiple consistenti in rilasci di particelle all'indietro con i modelli di dispersione lagrangiana FLEXPART-WRF e MILORD. Secondo i risultati di tali simulazioni, la fonte più plausibile di CO<sub>2</sub> sono le masse d'aria che risiedono all'interno del PBL della Pianura Padana prima di raggiungere la stazione. La stazione svizzera Jungfraujoch è stata interessata dalla stessa massa d'aria, mentre la stazione austriaca Sonnblick non ha rilevato l'evento.

## 7.2 Partecipazione al progetto ICOS

La rete di stazioni ICOS è composta da oltre 170 stazioni di misura, collocate in 16 paesi dell'Unione Europea, caratterizzanti tre distinti comparti: atmosfera, ecosistema terrestre e oceani. Il comparto Atmosfera, ad oggi, comprende 46 stazioni operative (Figura 7.6) di cui quattro collocate sul territorio nazionale (Ispra, Lampedusa, Cimone e Plateau Rosa). I dati raccolti nelle stazioni del comparto *Atmosphere* sono elaborati automaticamente e sottoposti al controllo di qualità (*Quality Control – QC*) dell'*Atmosphere Thematic Centre*, per poi essere soggetti al QC del *Principle Investigator* (PI) della stazione e infine esaminati congiuntamente dalla MSA (*Monitoring Station Assembly*) che si riunisce, con la presenza di tutti i PI, due volte l'anno per discutere, sviluppare e migliorare le basi scientifiche e tecniche delle osservazioni realizzate presso le stazioni atmosferiche della rete europea ICOS. Al termine di questo processo i dati di tutte le stazioni che hanno contribuito alla *Release* finale sono ufficialmente pubblicati sul *Carbon Portal* di ICOS (<https://www.icos-cp.eu/observations/carbon-portal>).

Il *Central Analytical Laboratories* di ICOS (CAL) fornisce i gas di calibrazione e analizza i campioni prelevati presso le stazioni per un ulteriore controllo di qualità e per ampliare l'insieme dei parametri osservati.



Figura 7.6 – Stazioni atmosferiche ICOS.

Nell'ambito del progetto ICOS la stazione di monitoraggio di classe 2 del PRS deve garantire la misura in piena continuità delle seguenti grandezze:

- concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), del metano ( $\text{CH}_4$ ) e del vapore acqueo ( $\text{H}_2\text{O}$ );
- temperatura, umidità relativa e pressione atmosferica nonché la velocità e la direzione del vento.

Lo strumento attualmente operativo è il PICARRO G2301 il cui principio di funzionamento si basa su una tecnica spettroscopica altamente sensibile denominata CRDS (*Cavity Ring-Down Spectroscopy*) anche conosciuta come CRLAS (*Cavity Ring-down Laser Absorption Spectroscopy*). Questo strumento è in grado di effettuare, se gestito al meglio e in piena funzionalità, accurate misure necessarie per raggiungere gli obiettivi di compatibilità inter-laboratorio stabiliti dal WMO/GAW (in particolare:  $\pm 0.1$  ppm per la  $\text{CO}_2$  e  $\pm 2$  ppb per il  $\text{CH}_4$ ).

I dati acquisiti in *real time*, oltre ad essere archiviati in RSE, sono inviati in *Near Real Time* quotidianamente, nei formati richiesti da ICOS, alla sede centrale (ATC). Ogni anomalia di funzionamento deve essere comunicata, in tempi brevi, sia per i dati del Picarro sia per quelli meteorologici all'ATC. Al fine di tenere sotto attenta verifica la qualità del funzionamento della strumentazione, sono previsti, nell'ambito delle linee guida di ICOS, vari *test* da eseguire con frequenze prefissate. In particolare, ogni sei mesi circa si effettuano i seguenti *test*: *droplet test*, per la correzione dell'effetto del vapor d'acqua sulle misure di  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , e lo *shelter test* per la verifica della stabilità della linea di campionamento al fine di verificarne eventuali interferenze dovute a residui che possono formarsi lungo le pareti interne della linea di campionamento (presenza di particolato o di tracce di vapore acqueo in forma liquida o altro ancora). Inoltre, ogni anno circa, deve essere effettuata la prova di tenuta (*vacuum test*) della linea creando il vuoto, mediante un'apposita pompa di aspirazione e un misuratore di pressione, al fine di verificare che non si manifestino delle perdite.

Infine, con frequenza auspicabile al massimo mensile, è necessario effettuare il *Quality Control* (QC) di tutti i dati prodotti relativi alle concentrazioni misurate (monitoraggio dell'aria e verifiche di taratura, utilizzando gli standard di riferimento agganciati in automatico al Picarro), ai controlli del corretto funzionamento dei flussi di campionamento e di misura del Picarro e della temperatura e pressione della cavità, e, non ultimo, delle misure meteorologiche.

Il QC viene effettuato *online* su sistemi realizzati *ad hoc* dall'*Atmosphere Thematic Centre* di ICOS (<https://www.icos-cp.eu/observations/atmosphere/atc>). Ulteriori informazioni e dettagli sull'attività svolta nell'ambito del progetto ICOS si possono acquisire direttamente dal sito web OASI (<https://oasi.rse-web.it/la-stazione-di-monitoraggio-del-plateau-rosa/#Adeguamento>) oppure consultando le specifiche ICOS (<https://box.lsce.ipsi.fr/index.php/s/YKxksYdSoVUtPPr>).

## 7.3 Sito web OASI

Il sito web OASI (<https://oasi.rse-web.it/>) viene sistematicamente aggiornato fornendo, su base giornaliera, i grafici dell'andamento della temperatura esterna della stazione e della concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica e del metano del giorno precedente. L'aggiornamento è effettuato mostrando, sempre quotidianamente, le medie orarie della settimana per entrambi i gas serra monitorati riportando anche i soli valori notturni poiché facilmente rappresentativi delle condizioni di fondo atmosferico (<https://oasi.rse-web.it/medie/>). Un ulteriore aggiornamento riguarda l'andamento delle serie storiche (medie orarie) della concentrazione atmosferica dei due gas serra e dei valori dei *trend* annuali (tasso di crescita annuale) calcolati a fine marzo 2023 (<https://oasi.rse-web.it/serie-storiche/>). A tal riguardo, in Figura 7.7 – Medie orarie di CO<sub>2</sub> [ppm] per il periodo 23/03/1993 – 31/03/2023 (scala di riferimento WMOX2019), sono riportate, per la CO<sub>2</sub>, le medie orarie (in rosso) del periodo 23/03/1993 – 31/03/2023 e sono evidenziate, in verde, le medie orarie di fondo (*background*) ottenute con il criterio di selezione dei dati denominato BaDS. A partire dalle misure orarie rappresentative del fondo si è proceduto al calcolo delle medie giornaliere, mensili e annuali e in Figura 7.8 si mostra l'andamento dei valori mensili da cui si è calcolato il *trend* mensile e annuale, rispettivamente pari a 0.178 ppb e 2.137 ppm. In Figura 7.9, analogamente a quanto fatto per la CO<sub>2</sub>, sono mostrate le medie orarie (in rosso) del periodo 01/01/2008 – 31/03/2023 e i valori di fondo in verde per il CH<sub>4</sub>. Nella Figura 7.10 sono riportati i valori medi annuali di fondo con il *trend* annuale per il periodo 2008 – 2022 risultato pari a 9.24 ppb (il dato del 2019 non è riportato poiché mancavano le stime di alcuni valori medi mensili di fondo). L'aggiornamento dei dati all'intero anno 2023 sarà effettuato a seguito della nuova *release* di ICOS che è realizzata entro la fine di ogni mese di marzo. La precedente *release* è stata effettuata a fine marzo 2023 ([https://meta.icos-cp.eu/collections/hx5\\_JRH1Pgt\\_olBUkr5vxa5](https://meta.icos-cp.eu/collections/hx5_JRH1Pgt_olBUkr5vxa5)).



Figura 7.7 – Medie orarie di CO<sub>2</sub> [ppm] per il periodo 23/03/1993 – 31/03/2023 (scala di riferimento WMOX2019).

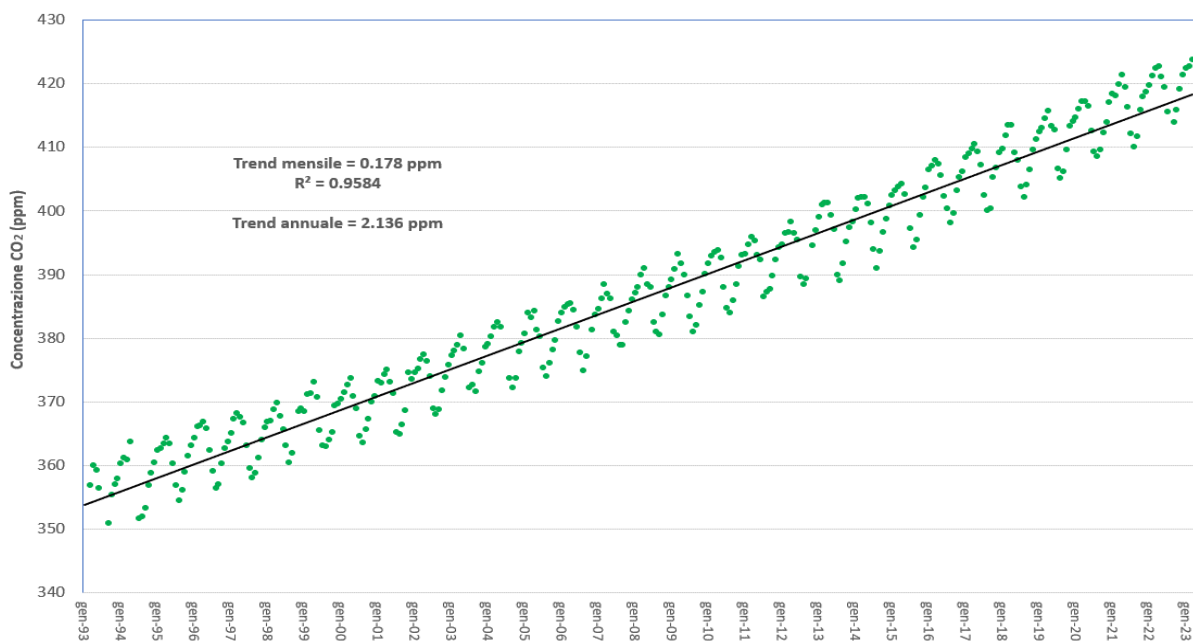


Figura 7.8 – Medie mensili di fondo di CO<sub>2</sub> [ppm] per il periodo marzo 1993 – marzo 2023 (scala di riferimento WMOX2019).

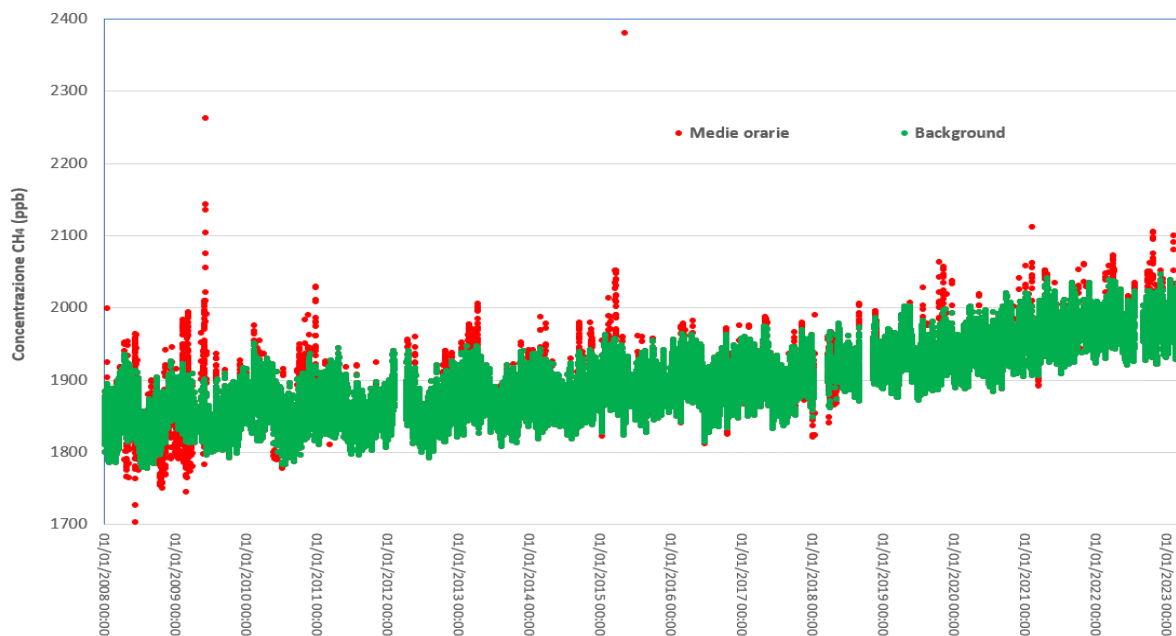


Figura 7.9 – Medie orarie di CH<sub>4</sub> [ppb] per il periodo 01/01/2008 – 31/03/2023 (scala di riferimento NOAA2004).

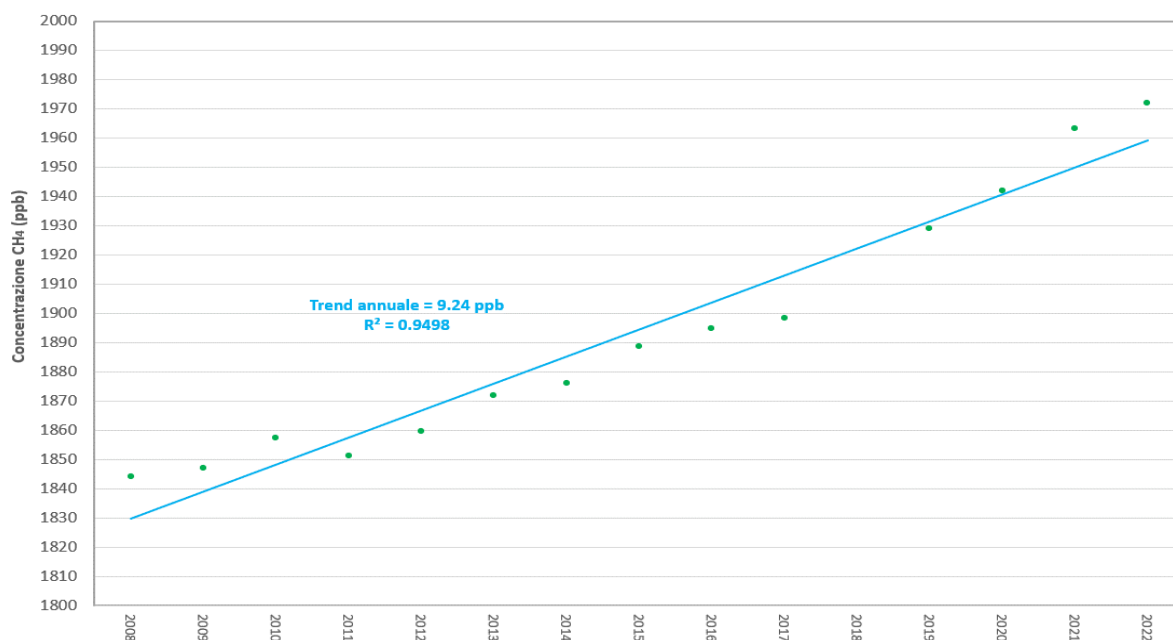


Figura 7.10 – Medie annuali di fondo di CH<sub>4</sub> [ppb] per il periodo 2008 – 2022 (scala di riferimento NOAA2004).



## 8 - ACRONIMI

| Acronimo     | Descrizione                                                                                  |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| API          | <i>Application Program Interface</i>                                                         |
| ARERA        | Autorità di Regolazione per Energia, Reti e Ambiente                                         |
| ATC          | <i>Atmosphere Thematic Centre</i>                                                            |
| BaDS         | <i>Background Data Selection</i>                                                             |
| CAL          | <i>Central Analytical Laboratories</i>                                                       |
| CETEMPS      | <i>Center of Excellence Telesensing of Environment and Model Prediction of Severe events</i> |
| CLIMED       | CLImate analysis over MEDiterranean Region                                                   |
| CLIWAC       | Climate Wet snow Accrecion Model                                                             |
| CMCC         | Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici                                         |
| CRLAS        | <i>Cavity Ring-down Laser Absorption Spectroscopy</i>                                        |
| CRDS         | <i>Cavity Ring-Down Spectroscopy</i>                                                         |
| DJF          | Stagione invernale costituita dai mesi dicembre, gennaio e febbraio                          |
| EFFIS        | <i>European Fire Information System</i>                                                      |
| ETCCDI       | <i>Expert Team on Climate Change Detection and Indices</i>                                   |
| Euro-CORDEX  | <i>Coordinated Downscaling Experiment - European Domain</i>                                  |
| EVA          | <i>Extreme Value Analysis</i>                                                                |
| FLEXPART-WRF | <i>FLEXible PARTicle WRF</i>                                                                 |
| FI           | <i>Fournier Index</i>                                                                        |
| FWI          | <i>Fire Weather Index</i>                                                                    |
| GAW          | <i>Global Atmosphere Watch</i>                                                               |
| GFI          | <i>Geomorphic Flood Index</i>                                                                |
| GHG          | <i>Greenhouse gases / gas serra</i>                                                          |
| HPH          | <i>High Probability Hazard</i>                                                               |
| ICOS         | <i>Integrated Carbon Observation System</i>                                                  |
| ICTP         | <i>International Centre of Theoretical Physics</i>                                           |
| ISPRA        | Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale                                 |
| JFJ          | <i>Jungfraujoch monitoring station</i>                                                       |
| JJA          | Stagione estiva costituita dai mesi giugno, luglio e agosto                                  |
| LPH          | <i>High Probability Hazard</i>                                                               |
| MAM          | Stagione primaverile costituita dai mesi marzo, aprile e maggio                              |
| MERIDA       | <i>MEteorological Reanalysis Italian DATaset</i>                                             |
| MFI          | <i>Modified Fournier Index</i>                                                               |



| Acronimo                              | Descrizione                                                                                                                                    |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MILORD                                | <i>Model for the Investigation of Long-Range Dispersion</i>                                                                                    |
| MPH                                   | <i>Medium Probability Hazard</i>                                                                                                               |
| OASI                                  | <i>Osservazioni Ambientali della Stazione Internazionale di monitoraggio del Plateau Rosa.</i>                                                 |
| OGC                                   | <i>Open Geospatial Consortium</i>                                                                                                              |
| PBL                                   | <i>Planetary Boundary Layer</i>                                                                                                                |
| PI                                    | <i>Principle Investigator</i>                                                                                                                  |
| PNACC                                 | Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici                                                                                        |
| ppb                                   | <i>Parts per billion</i>                                                                                                                       |
| ppm                                   | <i>Parts per million</i>                                                                                                                       |
| PRS                                   | <i>Plateau Rosa monitoring station</i>                                                                                                         |
| QC                                    | <i>Quality Control</i>                                                                                                                         |
| RCP/RCPs                              | <i>Rapresentative Concentration pathway/s</i>                                                                                                  |
| RCP2.6                                | <i>low RCP in which radiative forcing is stabilized at approximately 2.6 Wm<sup>-2</sup> after 2100</i>                                        |
| RCP4.5                                | <i>intermediate RCP in which radiative forcing is stabilized at approximately 4.5 Wm<sup>-2</sup> after 2100</i>                               |
| RCP8.5                                | <i>one high RCP for which radiative forcing reaches greater than 8.5 Wm<sup>-2</sup> by 2100 and continues to rise for some amount of time</i> |
| R / R <sub>med</sub>                  | Precipitazione cumulata giornaliera / R mediata su 3 giorni                                                                                    |
| R <sub>99p</sub>                      | Percentuale di giorni con R superiore a RR <sub>99</sub>                                                                                       |
| R <sub>99pTOT</sub>                   | Percentuale di pioggia caduta nei giorni con R superiore a RR <sub>99</sub>                                                                    |
| REF                                   | Periodo di riferimento (Reference)                                                                                                             |
| RR <sub>99</sub> / R <sub>99med</sub> | 99° percentile di R / R <sub>med</sub> in un periodo di riferimento                                                                            |
| RSE                                   | Ricerca sul Sistema Energetico S.p.A.                                                                                                          |
| SNB                                   | <i>Sonnblick monitoring station</i>                                                                                                            |
| SON                                   | Stagione autunnale costituita dai mesi settembre, ottobre e novembre                                                                           |
| STO                                   | Indice <i>Storm</i>                                                                                                                            |
| RT                                    | Tempo di Ritorno                                                                                                                               |
| UTC                                   | <i>Coordinated Universal Time</i>                                                                                                              |
| W                                     | Intensità del vento medio giornaliero                                                                                                          |
| W <sub>75</sub>                       | 75° percentile di W in un periodo di riferimento                                                                                               |
| W <sub>75p</sub>                      | Percentuale di giorni con W superiore a W <sub>75</sub>                                                                                        |
| WMO                                   | <i>World Meteorological Organization</i>                                                                                                       |
| WMS                                   | <i>Web Map Service</i>                                                                                                                         |
| WRF                                   | <i>Weather Research and Forecasting model</i>                                                                                                  |
| WSLD                                  | <i>Wet Snow Load Days Index</i>                                                                                                                |



| Acronimo | Descrizione                          |
|----------|--------------------------------------|
| WSLF     | <i>Wet Snow Load Frequency Index</i> |
| YEA      | <i>Year</i>                          |