

ITALIANO

NEWSLETTER

#03



ALPAERA

Interreg



Cofinancé par
l'Union Européenne
Cofinanziato
dall'Unione Europea

AtmoSud
Inspirer un air meilleur

Atmo
AUVERGNE-RHÔNE-ALPES
votre partenaire air

Arpa
PIEMONTE
Agenzia Regionale
per la Protezione Ambientale



ARPAL
Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente figure

France – Italia ALCOTRA

AGOSTO 2026

SOSTEGNO ALLA GOVERNANCE DELL'ARIA E DEL CLIMA NELLE AREE ALPINE ALCOTRA

Caro lettore,

Benvenuto alla terza edizione della newsletter del progetto ALP'AERA, finanziato dal programma Interreg Italia-Francia ALCOTRA 2021-2027.

In questa edizione presentiamo i progressi più significativi del progetto attraverso una serie di articoli che coprono le attività chiave: la nuova dashboard ALP'AERA Data, che rende accessibili online le osservazioni, le emissioni e gli scenari di qualità dell'aria dell'area transfrontaliera; le campagne di misura condotte da ARPA Liguria, ARPA Piemonte, ARPA Valle d'Aosta e AtmoSud su ozono, ossidi di azoto e black carbon; l'analisi dell'evoluzione delle emissioni, con la speciazione dei composti organici volatili, il relativo potenziale di formazione dell'ozono e un approfondimento sui sistemi di raffrescamento e climatizzazione; infine le simulazioni di scenario sull'impatto dei cambiamenti climatici sulla qualità dell'aria agli orizzonti 2050 e 2070.

Il progetto continua a svilupparsi con successo, coinvolgendo tutti i partner nella caratterizzazione degli impatti del cambiamento climatico sulla qualità dell'aria nelle valli alpine. Le campagne di misura estive si sono estese a nuovi siti di valle e i primi risultati stanno emergendo, fornendo dati preziosi per la governance ambientale transfrontaliera.

Se desideri seguire le nostre ultime attività ed essere informato sugli sviluppi del progetto, seguici sui nostri canali social e sul sito web di progetto disponibile al seguente link www.alpaera.eu.

Ti auguriamo una buona lettura!

I partner del progetto ALP'AERA

ALP'AERA Data: La dashboard della qualità dell'aria transfrontaliera Francia-Italia

Osservazioni, emissioni e scenari al 2070 riuniti in un unico portale: uno strumento di supporto alle decisioni al servizio dei territori alpini franco-italiani.

Come evolve la qualità dell'aria che respiriamo nelle valli alpine? Quali settori di attività incidono maggiormente sulle emissioni di inquinanti? E come sarà l'aria delle Alpi tra trenta o cinquant'anni? A queste domande intende rispondere la dashboard sviluppata nell'ambito del progetto ALP'AERA.

Il portale riunisce in un unico spazio tutti i dati necessari per comprendere l'evoluzione della qualità dell'aria nelle valli alpine franco-italiane a partire dal 2012. Risponde a un obiettivo più ampio: mettere a disposizione

dei decisori pubblici indicatori comuni, condivisi su entrambi i lati della frontiera, e strumenti operativi per sviluppare strategie di adattamento ai cambiamenti climatici. L'aumento delle concentrazioni di gas a effetto serra e le variazioni del contenuto di aerosol nell'atmosfera influenzano infatti direttamente il clima nelle aree alpine, con conseguenze molto concrete: il ritiro dei ghiacciai, la diminuzione del turismo invernale a causa della scarsità di neve, le ondate di calore e la siccità estiva, nonché gli impatti sulla salute legati al peggioramento della qualità dell'aria. Per rappresentare in modo chiaro questi aspetti, il sito è organizzato in diversi cruscotti complementari, ciascuno dei quali offre una prospettiva diversa sulla qualità dell'aria del territorio.



LA DASHBOARD DELLE OSSERVAZIONI

Questo primo modulo consente di consultare serie temporali a partire dal 2012 per seguire l'evoluzione delle concentrazioni misurate sul territorio di particolato atmosferico (PM₁₀ e PM_{2,5}), ozono e ossidi di azoto. Permette di visualizzare le tendenze di lungo periodo, individuare le aree maggiormente esposte e confrontare

i livelli attuali con i limiti normativi e con le raccomandazioni dell'Organizzazione Mondiale della Sanità. Si tratta di una fotografia dinamica dello stato della qualità dell'aria, aggiornata costantemente grazie ai dati raccolti sull'intero territorio transfrontaliero.

LA DASHBOARD DELLE EMISSIONI

Il secondo modulo è dedicato all'origine degli inquinanti atmosferici e dei gas a effetto serra. Le emissioni sono analizzate per settore (residenziale, trasporti, industria, agricoltura, ecc.) e per regione, consentendo di comprendere con precisione quali attività contribuiscono maggiormente all'inquinamento atmosferico e al riscaldamento globale. Questo livello di dettaglio rappresenta uno strumento prezioso per gli enti locali, poiché permette di orientare le politiche pubbliche – come i Piani Clima-Aria-Energia Territoriali francesi o i Piani regionali di Tutela della Qualità dell'Aria italiani – verso le azioni più efficaci a livello locale, evitando l'applicazione di misure generiche poco adatte alle specificità del territorio.

LA DASHBOARD DEGLI SCENARI FUTURI

È probabilmente il modulo più innovativo di ALP'AERA Data: integra proiezioni climatiche e di qualità dell'aria a medio termine (2050) e a lungo termine (2070). Combinando diversi scenari di riduzione delle emissioni con differenti scenari climatici, questo strumento consente di anticipare le future sfide ambientali sull'intero territorio ALCOTRA. Permette inoltre di analizzare sia l'evoluzione prevista degli inquinanti tradizionali sia quella di fenomeni emergenti, spesso meno evidenti, come la crescente diffusione della climatizzazione nelle Alpi. Spinta dall'aumento delle temperature e dalla maggiore frequenza delle ondate di calore, la climatizzazione potrebbe incidere sempre di più sui consumi energetici e sulle emissioni associate nei prossimi decenni, qualora non intervengano cambiamenti nei comportamenti e nelle politiche energetiche.

UNO STRUMENTO PENSATO PER DURARE

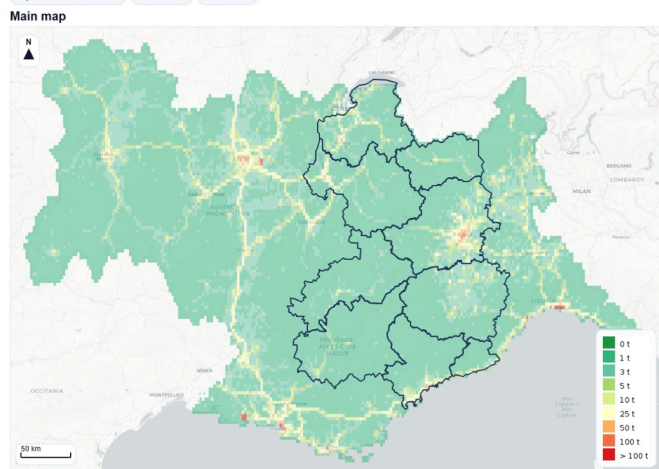
ALP'AERA Data non si limita a mettere a disposizione dati: è stato progettato come un vero e proprio strumento di supporto alle decisioni. Integrando osservazioni sul campo, inventari delle emissioni e modellazioni previsionali, offre una visione completa e integrata, indispensabile per elaborare strategie di adattamento coerenti su tutto il territorio alpino franco-italiano, superando i confini amministrativi.

Emissions (map)

Export 05/06/2026 12:14:56



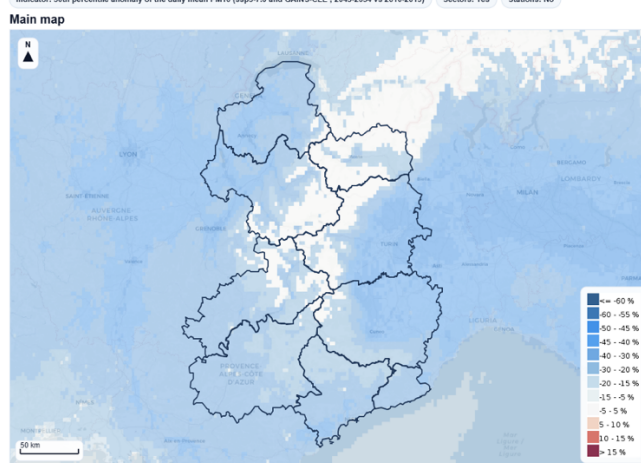
Layer: NOx emissions 2019 Sectors: Yes Stations: No



Future air quality



Indicator: 50th percentile anomaly of the daily mean PM10 (ssp3.7.0 and GAINS-CLE ; 2045-2054 vs 2010-2019) Sectors: Yes Stations: No



Esplora il portale! La dashboard è accessibile a tutti. Ti invitiamo a navigare tra i diversi moduli, confrontare i territori e osservare le tendenze che riguardano più da vicino la tua realtà.

➔ Visita direttamente il portale su: <https://alpaera-data.atmosud.org>

➔ Oppure dal sito web di progetto: <https://www.alpaera.eu/dashboard-progetto-alpaera.php?lang=it>

Campagne di misura: focus sulle attività di implementazione del sistema di misura della qualità dell'aria

L'Azione 3.1 del Progetto ALP'AERA mira a monitorare la qualità dell'aria lungo il confine italo-francese, combinando stazioni di misura fisse e campagne di rilevamento periodiche. Nel complesso, i cinque Partner di progetto dispongono di 84 siti di misura della qualità dell'aria ambiente distribuiti sull'area d'interesse del Progetto ALP'AERA (figura 1). Gli inquinanti atmosferici più rilevati sono NO_x, O₃, PM₁₀ e PM_{2,5}, mentre sono attualmente in fase di ampliamento le misurazioni di BC (Black Carbon) e UFP (Ultrafine Particles).

Le attività introdotte per il Progetto ALP'AERA si propongono non soltanto di mettere a fattor comune le misurazioni svolte dai diversi Partner ma soprattutto di incrementarle attraverso lo svolgimento di ulteriori campagne di monitoraggio. Attraverso queste attività si è cercato di:

- indagare porzioni di territorio ancora poco conosciute,
- stimare inquinanti cosiddetti "emergenti" come il BLACK CARBON (BC) e le PARTICELLE ULTRAFINI (UFP),
- valutare l'utilizzo di strumentazione non convenzionale per la misura degli inquinanti atmosferici e confrontare i dati raccolti con quelli misurati dalla strumentazione certificata.

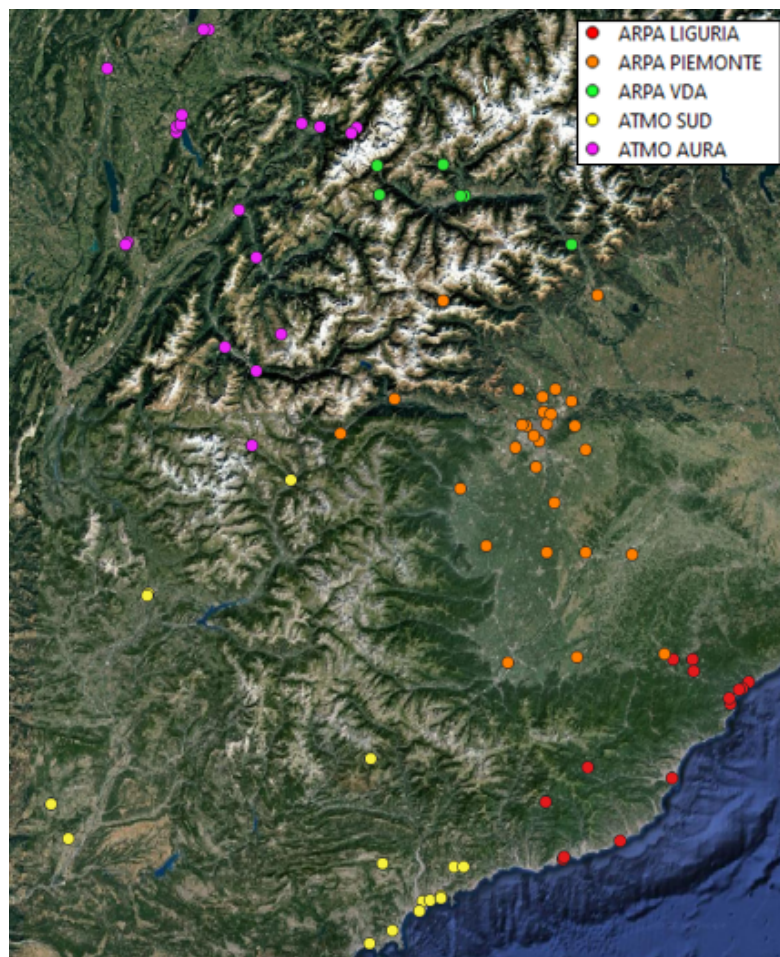


Figura 1 – Siti fissi di misura dei partner del progetto ALP'AERA

I Partner di progetto hanno pertanto messo in campo diverse attività sperimentali volte ad approfondire la conoscenza degli inquinanti maggiormente significativi a livello di cambiamento climatico; nella tabella a seguire si riepilogano le campagne di misure svolte o in corso di svolgimento all'interno dell'Azione 3.1 (tabella 1).

PARTNER	SITI DI MISURA	INQUINANTI MONITORATI
ARPA LIGURIA	PIGNA (IM) - loc. Colle Belenda	O ₃ , NO _x , parametri metereologici
ARPA VALLE D'AOSTA	2025: Antey-Saint-André, Challand-Saint-Anselme, Chambave, Pontboset 2026: Chambave, Cogne, Etroubles, Saint-Pierre	O ₃ , NO _x , COV, parametri metereologici (smart sensor)
ARPA PIEMONTE	Susa (TO) - Repubblica Ivrea (TO) - Liberazione	Black Carbon
ATMO SUD	Briançon Observatoire de Haute Provence	Black Carbon

Tabella 1 – Riepilogo delle campagne di misura del progetto ALP'AERA (Azione 3.1)

CAMPAGNE DI MISURA DI ARPA LIGURIA

Le campagne sono state condotte in due annate successive, nello specifico 2024 e 2025, con particolare focus sull'inquinante OZONO (O_3) con l'intento di valutare l'andamento delle sue concentrazioni nel contesto rurale delle Alpi Marittime. A questo scopo è stato individuato il sito di PIGNA (IM) – COLLE BELENDIA, particolarmente idoneo per descrivere l'andamento delle concentrazioni di ozono e dei suoi precursori nella porzione occidentale della Regione Liguria e degli eventuali trasporti a livello transfrontaliero, data la vicinanza al confine di Stato.

I risultati del confronto tra le due campagne di monitoraggio sono riportati nei grafici a seguire: in entrambi i periodi si nota una relazione inversa tra O_3 e NO_x molto attenuata e concentrazioni di O_3 caratterizzate da escursioni giornaliere/annuali piuttosto contenute (figura 3), anche rispetto alle altre postazioni della rete regionale.

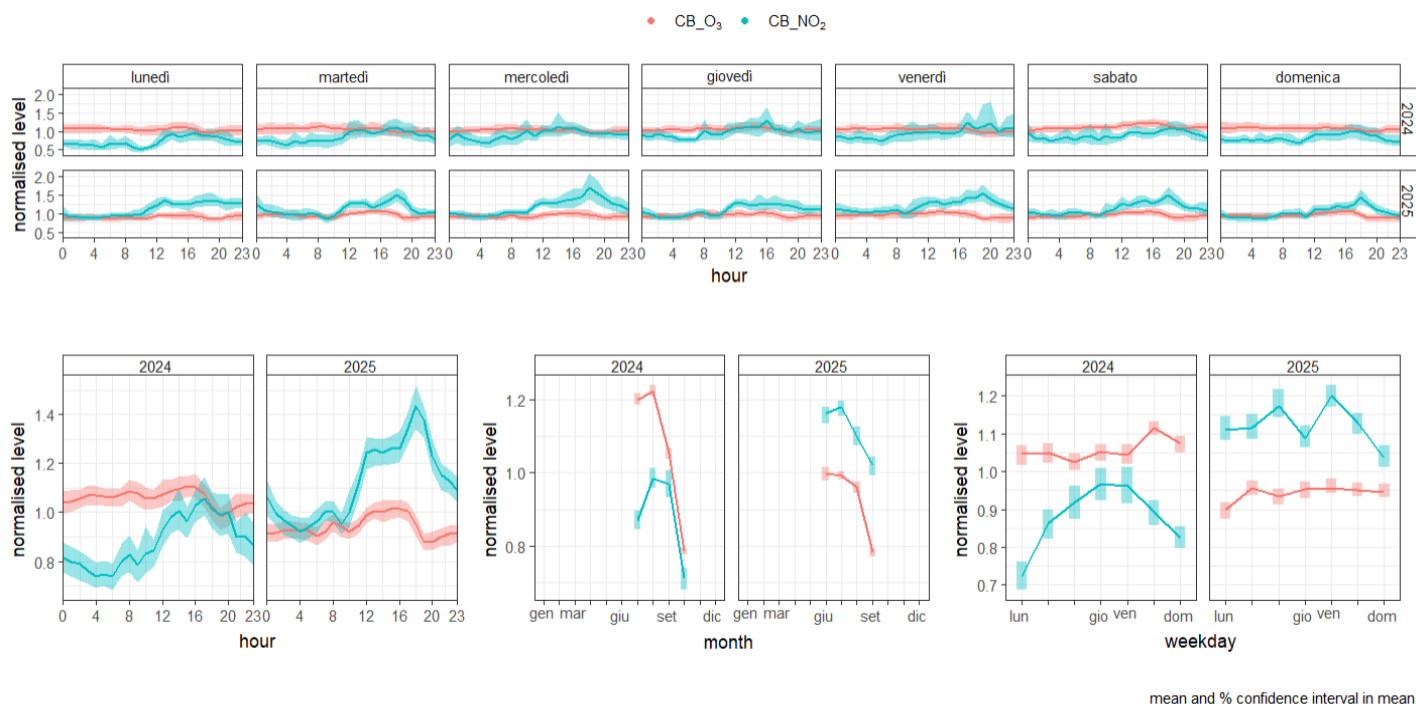


Figura 2 – Grafico Time Variation per le concentrazioni di ozono e biossido d'azoto durante le campagne 2024 e 2025

La dinamica delle concentrazioni di O_3 resta complessa, maggiormente influenzata dalle variabili meteorologiche come si nota dalle figure sottostanti (figura 4 e 5) nelle quali si riportano i grafici che evidenziano le concentrazioni dell'inquinante in relazione alle principali variabili climatiche che ne determinano e influenzano maggiormente le concentrazioni rilevate.

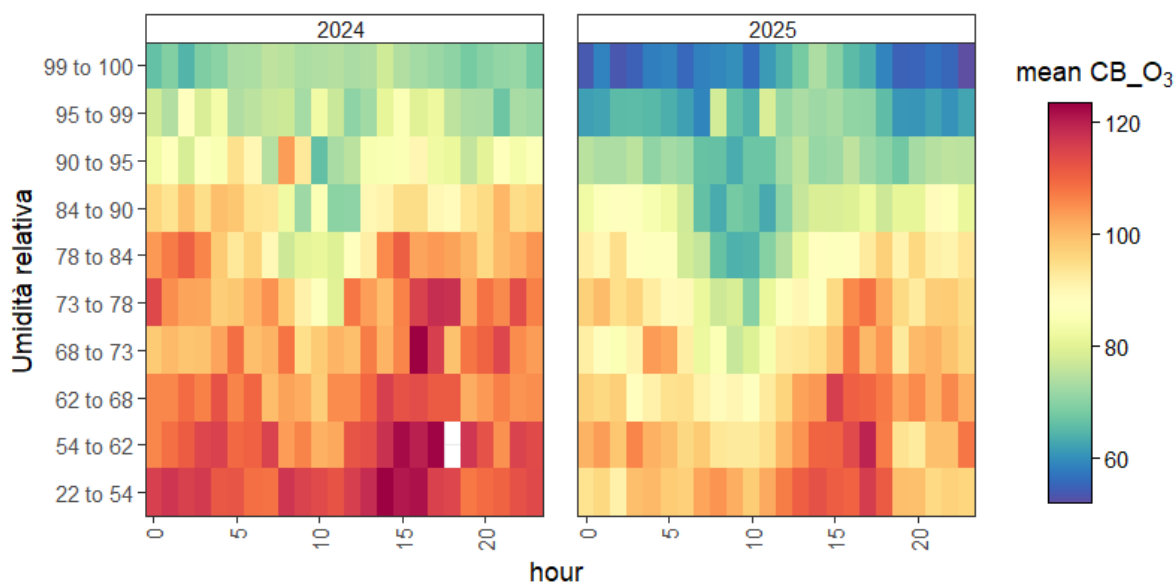


Figura 3 – Grafico Trend Level ozono/radiazione solare durante le campagne 2024 e 2025

PIGNA - Colle Belenda

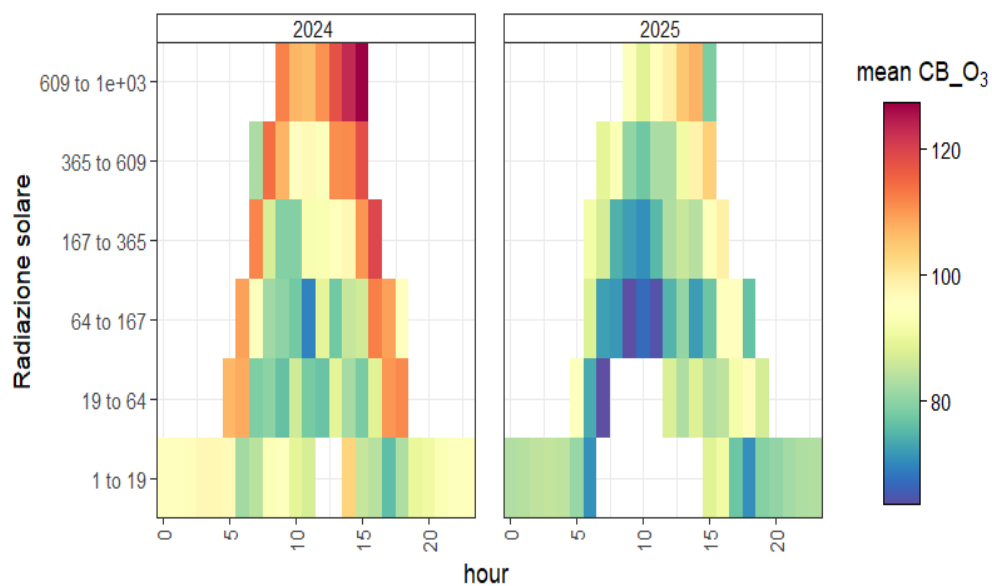
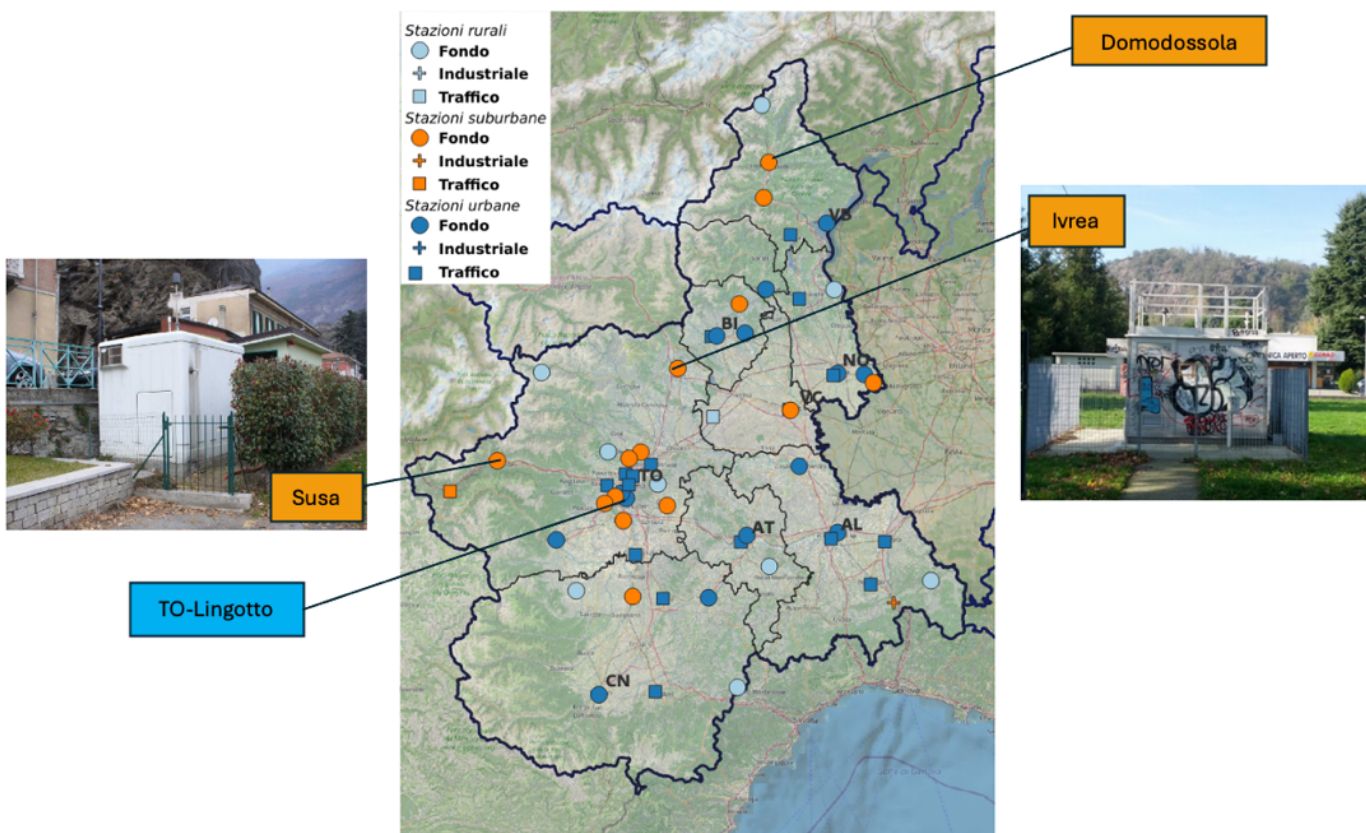


Figura 4 – Grafico Trend Level ozono/umidità relativa durante le campagne 2024 e 2025

CAMPAGNE DI MISURA DI ARPA PIEMONTE

Nell'ambito del Progetto ALP'AERA il monitoraggio del Black Carbon in Regione Piemonte ha riguardato le due stazioni di fondo suburbano di Ivrea-Liberazione e di Susa-Repubblica, coprendo il periodo 1° gennaio 2025 – 30 aprile 2026. L'installazione di due analizzatori AE36 ha permesso di implementare le misure di Black Carbon che in Piemonte è monitorato nelle stazioni di Torino-Lingotto e Domodossola a partire dal 2018.



Risultati del monitoraggio

Il monitoraggio in continuo del BC evidenzia una significativa variabilità stagionale con valori massimi nel periodo invernale e in diminuzione nel periodo più caldo, tale andamento è correlato a quello del $PM_{2.5}$.

In Figura 1 sono riportate le medie giornaliere di Black Carbon nel periodo 1° gennaio 2025 – 30 aprile 2026 nei siti di Susa e Ivrea. Il picco visibile a giugno 2025 in entrambe le stazioni è dovuto all'intenso fenomeno di dust dovuto all'incendio avvenuto in Canada. Il sito di Ivrea mostra in genere livelli maggiori di black carbon rispetto a Susa, ad eccezione del periodo estivo in cui i livelli sono pressoché sovrapponibili.

Black Carbon Totale dati giornalieri 2025_2026

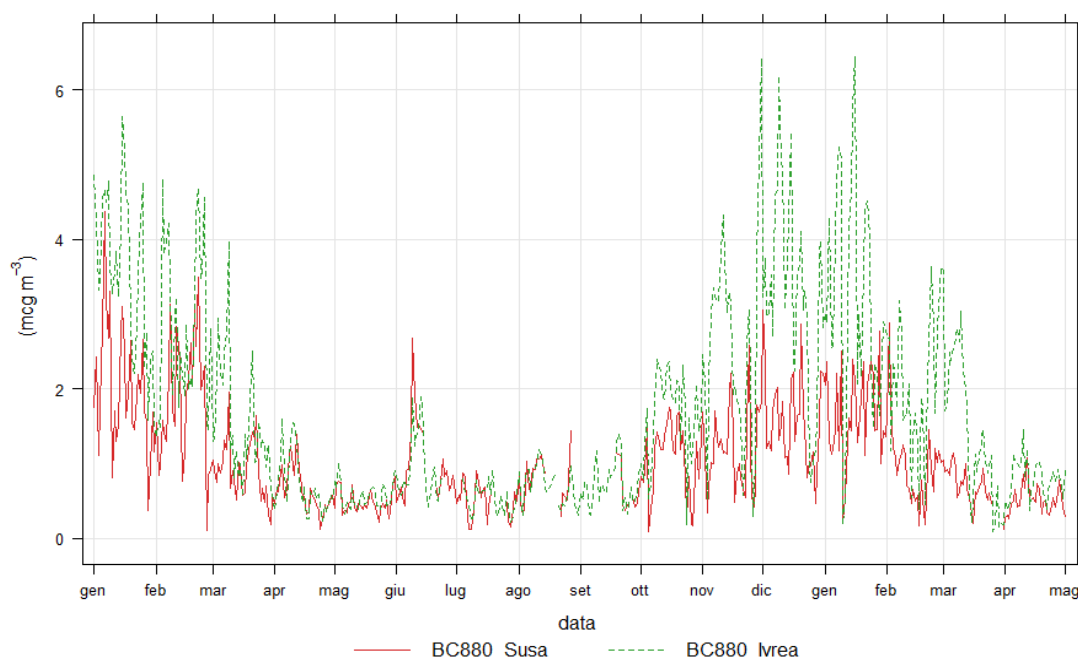


Figura 1

In Figura 2 è riportato l'andamento giornaliero, mensile e per giorni della settimana. L'andamento giornaliero mostra i due picchi: mattutino e serale dovuti alle emissioni da traffico e da combustione di biomassa. I mesi invernali di gennaio e dicembre sono quelli con i valori più elevati per le maggiori fonti emissive e situazioni meteorologiche più sfavorevoli alla dispersione. Anche in questo grafico mensile si nota l'anomalia a giugno dovuta all'incendio in Canada, che ha trasportato polveri fino in Europa.

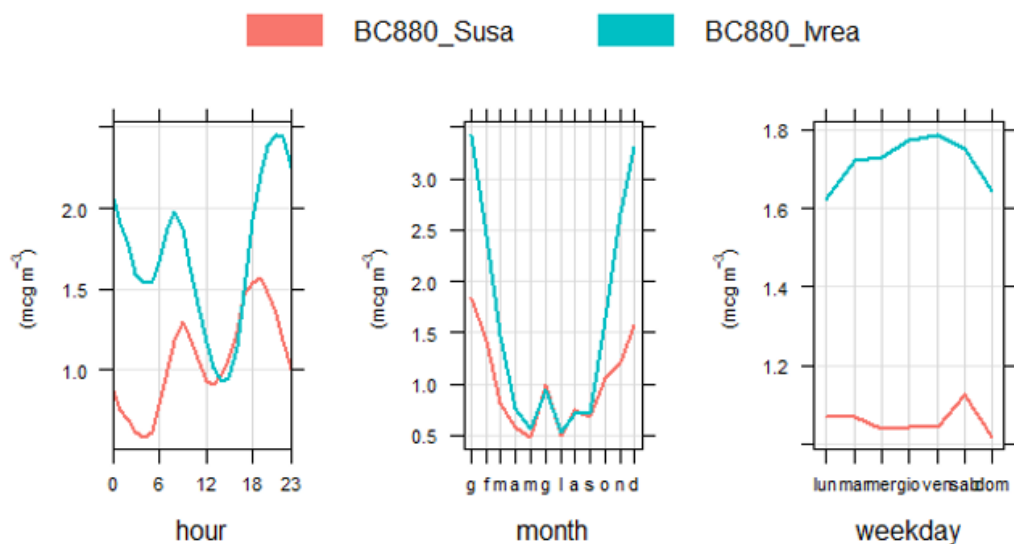


Figura 2

Gli analizzatori di Black Carbon permettono anche di stimare il contributo dovuto alla combustione di biomassa e quello determinato dai combustibili fossili.

In Figura 3 in cui è riportato l'andamento del giorno tipo, si osserva che in entrambi i siti è prevalente il contributo della componente fuel.

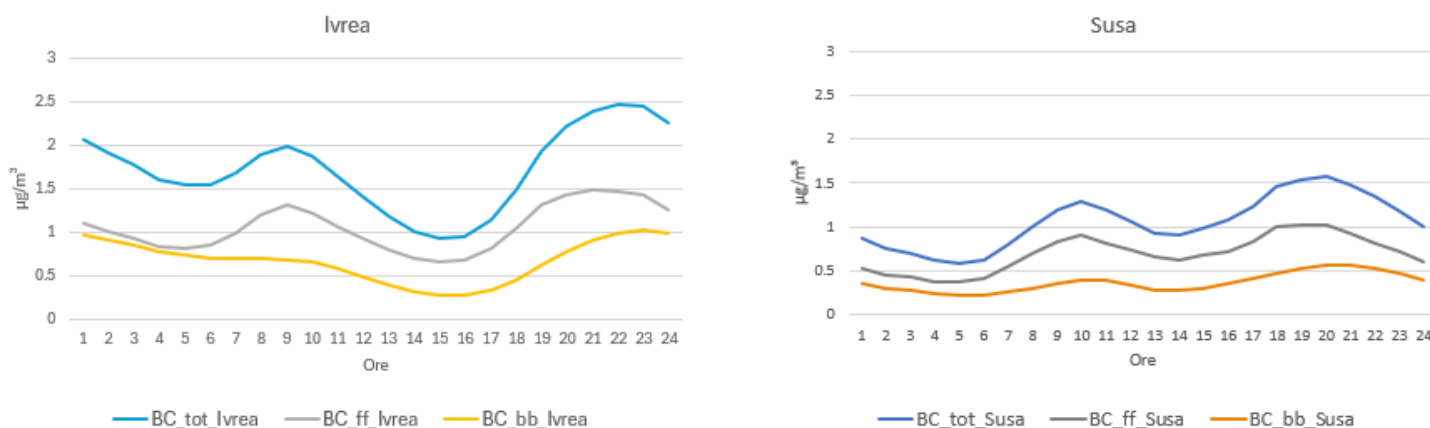


Figura 3

Confrontando i dati monitorati nell'ambito del progetto ALP'AERA con quelli degli strumenti installati nelle stazioni di TO-Lingotto e Domodossola (VB) della rete di rilevamento regionale si osserva, in Figura 4, che il Black Carbon totale di Ivrea ha un livello e andamento equivalente a Torino-Lingotto mentre Susa ha un andamento giornaliero simile a Domodossola, ma concentrazione molto più basse.

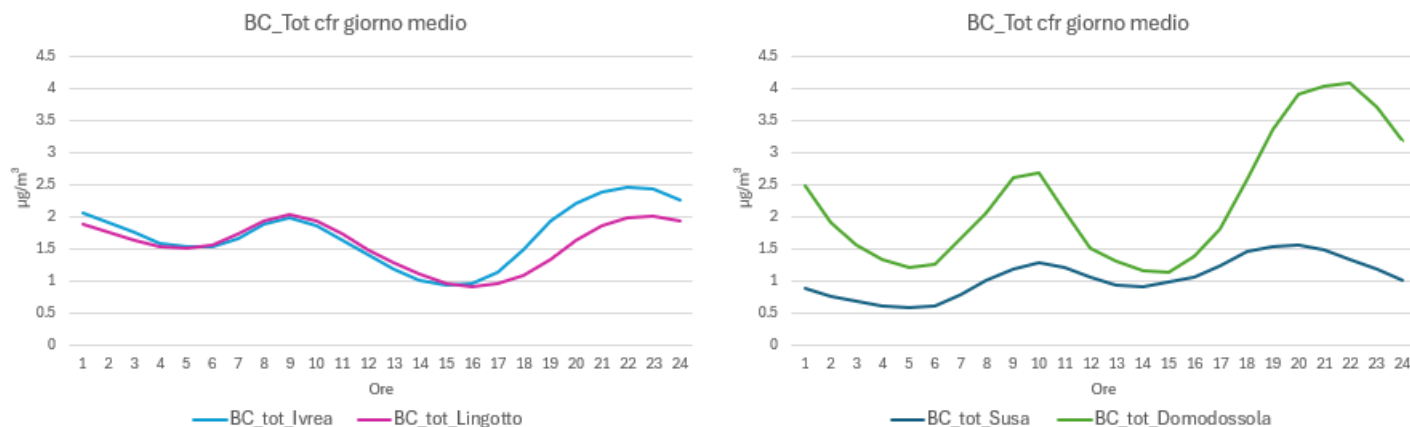


Figura 4

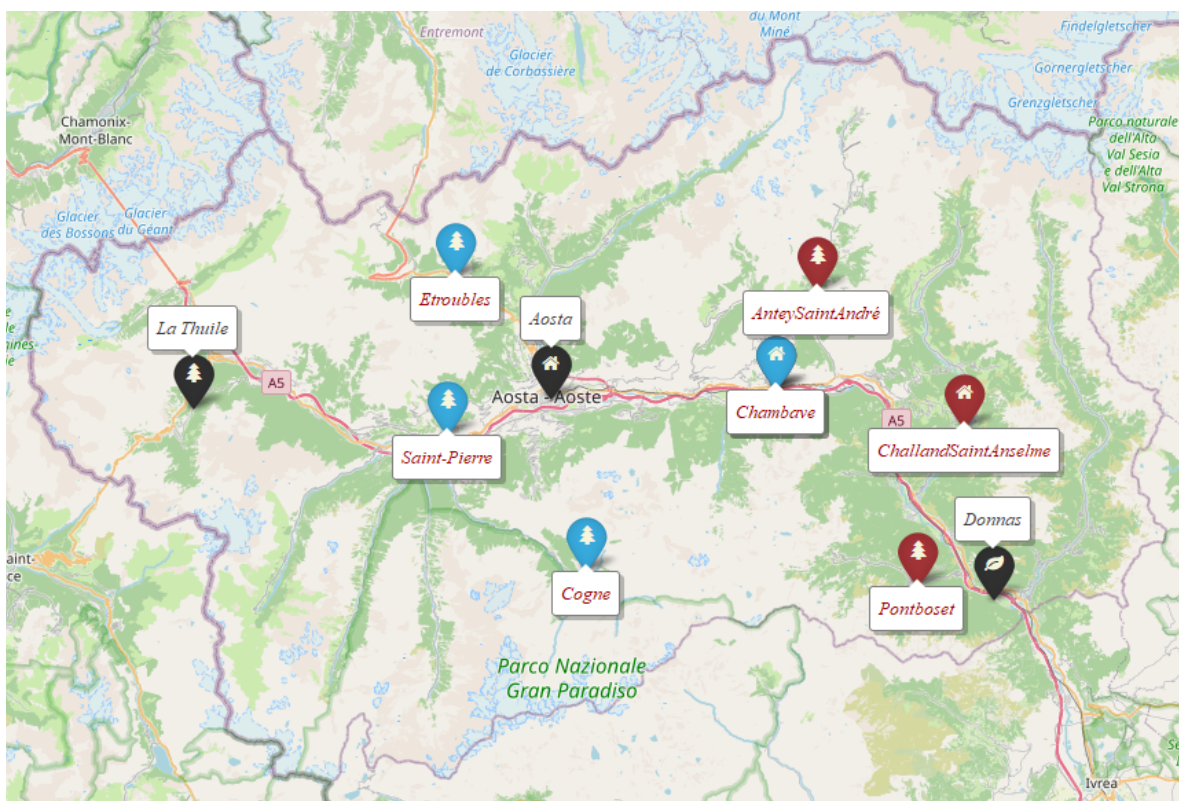
Nella tabella seguente sono riportati i valori medi e massimi dei dati orari di Black Carbon totale registrati nelle 4 stazioni nel corso del 2025.

Anno 2025 BC_tot (dati orari)	media	massima
Domodossola (VB)	2.2	22.3
To-Lingotto	1.6	13.4
Ivrea	1.7	17.1
Susa	1.1	7.6

CAMPAGNE DI MISURA DI ARPA VALLE D'AOSTA

Le campagne di misura a cura di Arpa Valle D'Aosta hanno come focus l'inquinante OZONO ed i composti organici volatili (COV) e sono attualmente in corso di realizzazione. Il piano di campionamento prevede l'utilizzo di analizzatori non convenzionali (smart sensor), opportunamente tarati all'inizio del periodo di campagna attraverso un interconfronto con analizzatori certificati appartenenti alla rete di misura regionale. Sono state realizzate due campagne di misura:

- Da maggio a settembre 2025 in 4 località nella parte orientale della regione Antey-Saint-André, Challand-Saint-Anselme, Chambave, Pontboset;
- Da maggio ad agosto 2026 in 3 località nella parte occidentale della regione Cogne, Etroubles, Saint-Pierre e di nuovo a Chambave.



Sono stati utilizzati smart sensor AQMesh, che utilizzano celle elettrochimiche per la misura degli inquinanti. Il confronto con la strumentazione di riferimento della rete di monitoraggio di ARPA Valle d'Aosta ha mostrato che le misure di ozono degli AQMesh sono ben correlate con quelle di riferimento, ma sono inferiori: per tale motivo alle misure dei sensori è stata applicata una correzione calcolata con una regressione lineare.



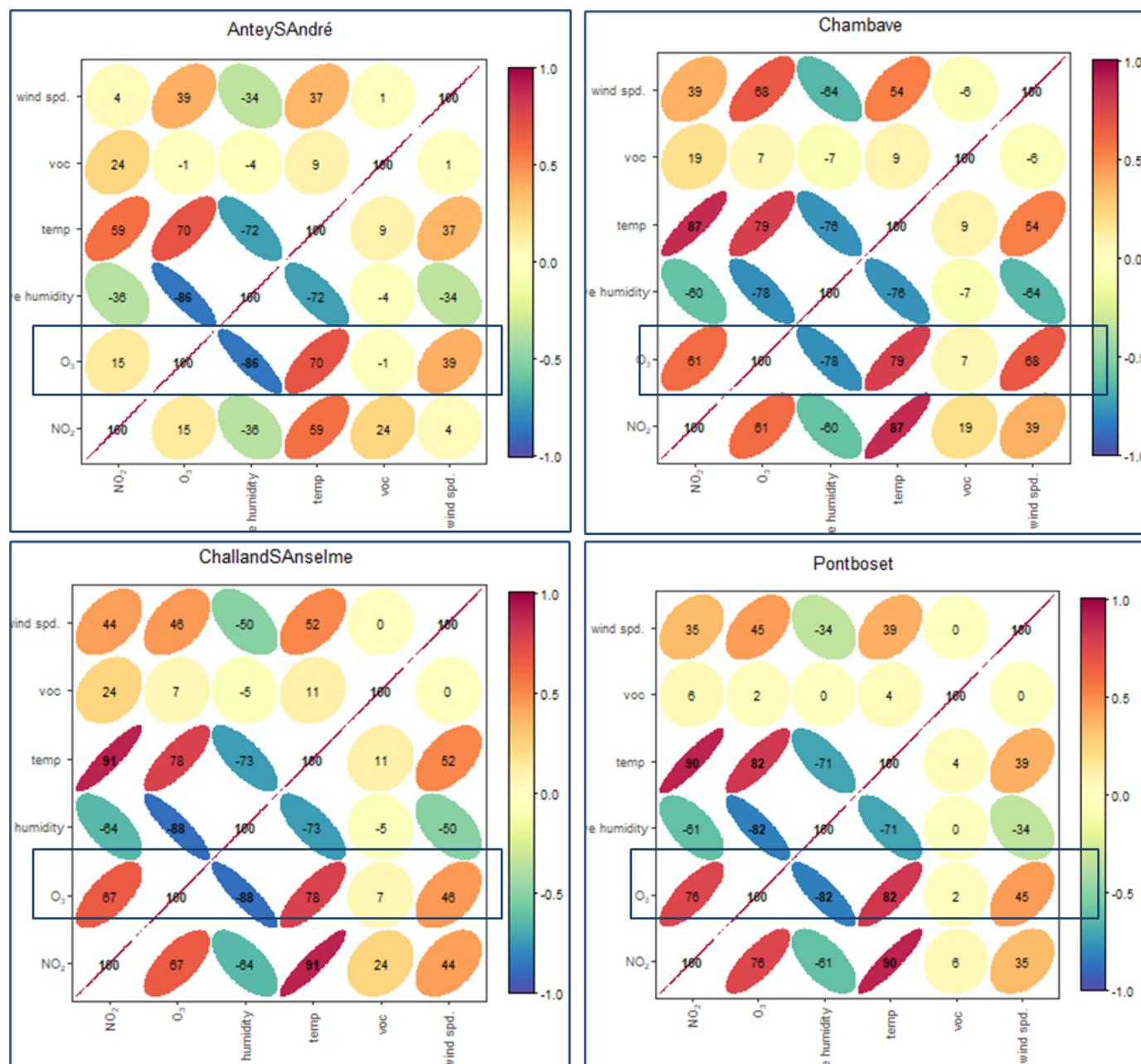
I valori di ozono misurati nell'estate 2025 dai tre sensori nelle valli laterali (Pontboset, Challand-Saint-Anselme, Antey-Saint-André) sono in buon accordo tra loro e non ci sono stati superamenti del valore obiettivo e della soglia di informazione. Il sensore installato a Chambave invece ha evidenziato livelli di ozono molto alti, che fanno pensare ad un qualche problema del sensore.

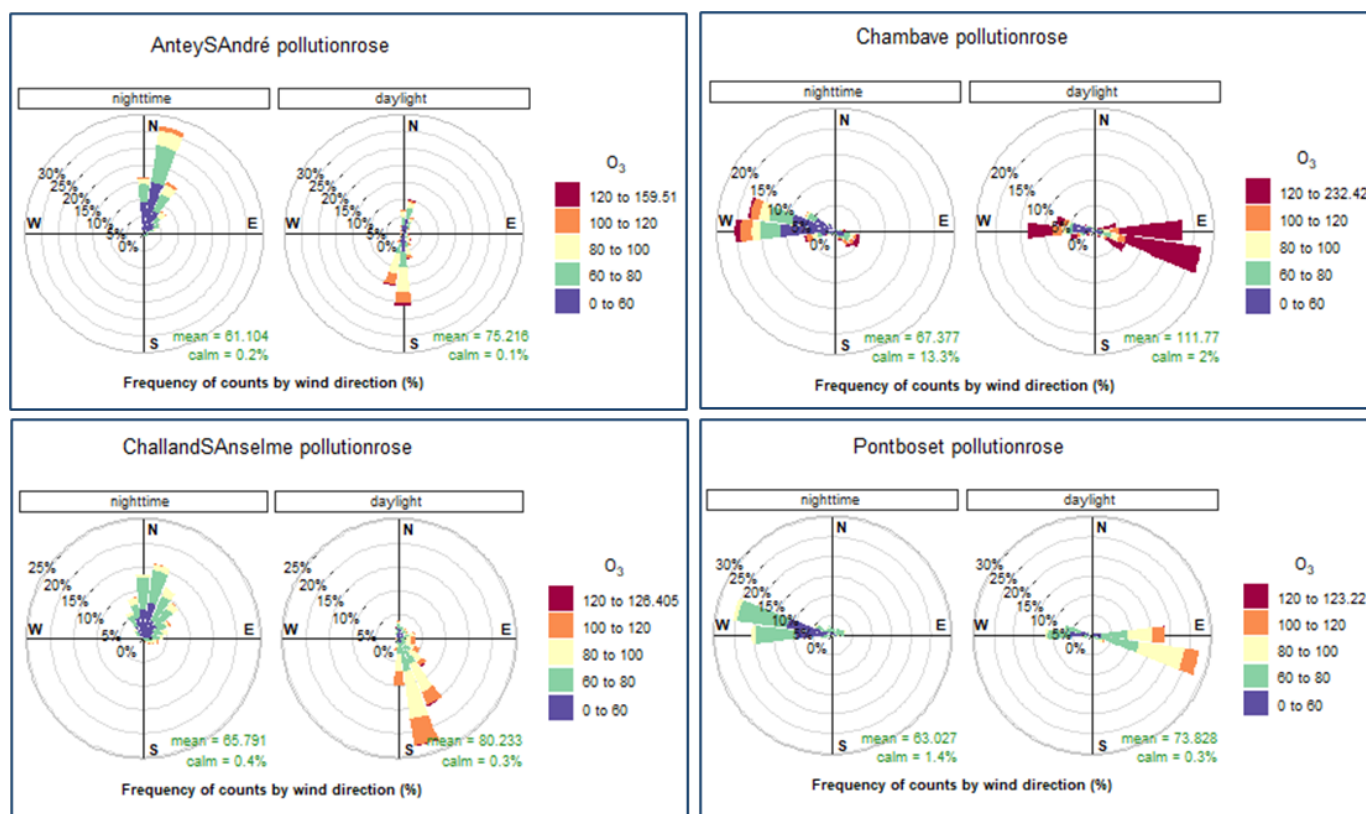
	Concentrazione media $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Giorni con massimo della media mobile 8 ore superiore a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Ore con concentrazione superiore a $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Pontboset	70	0	0
Challand-Saint-Anselme	75	1	0
Antey-Saint-André	70	0	0
Chambave	95	111	237
Donnas	76	35	4
Aosta	71	20	0
La Thuile	81	8	0
Courmayeur	70	0	0

In tutti i siti la correlazione è forte con temperatura (positiva) e umidità (negativa). Anche con la velocità del vento la correlazione è positiva, più forte nel sito di Chambave (in cui la brezza di valle è particolarmente intensa e frequente nei mesi estivi).

Per determinare l'influenza del vento nei siti della campagna in cui non sono disponibili misure di vento è stato utilizzato un modello meteorologico (SWIFT) per la ricostruzione del campo di vento. È stata fatta prima una simulazione su tutto il territorio regionale, con risoluzione di 1km, usando in ingresso i dati delle stazioni meteorologiche presenti sul territorio regionale, e poi una discesa di scala a 125m in domini di pochi km comprendenti i siti di misura.

Poiché tutti i siti si trovano in un contesto di valli alpine, il regime prevalente dei venti è quello della brezza valle/monte, con venti da valle nelle ore diurne e da monte nelle ore notturne, lungo l'asse vallivo. In questo regime l'intensità del vento è moderata nelle ore diurne e generalmente bassa nelle ore notturne. In tutti i siti di misura le concentrazioni maggiori di ozono si trovano in condizioni di vento proveniente da valle.





CAMPAGNE DI MISURA DI ATMO SUD

Le campagne di misura a cura di Atmo Sud hanno riguardato l'inquinante Black carbon. Attualmente è in corso il monitoraggio presso il super sito rurale dell'Osservatorio dell'Alta Provenza, iniziato nel giugno dello scorso anno, i cui dati sono in fase di elaborazione. Questa postazione appartiene alla rete nazionale ICOS-France e rappresenta la stazione regionale della Région Sud per lo studio delle concentrazioni dei gas a effetto serra (CO₂ – anidride carbonica e CH₄ - metano) e di CO (monossido di carbonio, tracciante dei processi di combustione). Dall'osservazione dei primi risultati risulta chiaro come le concentrazioni misurate presso il sito dell'Osservatorio dell'Alta Provenza siano molto più contenute rispetto alle altre postazioni della rete regionale (sono stati presi a riferimento i siti di Gap, Nizza e Marsiglia), sia a livello di BC che di PM₁₀, a conferma di come questo sito sia rappresentativo del valore di fondo per questa gamma di inquinanti. Nelle figure 1, 2 e 3 si mostra la distribuzione delle misure di PM₁₀ e BC attraverso la rappresentazione a box-plot.

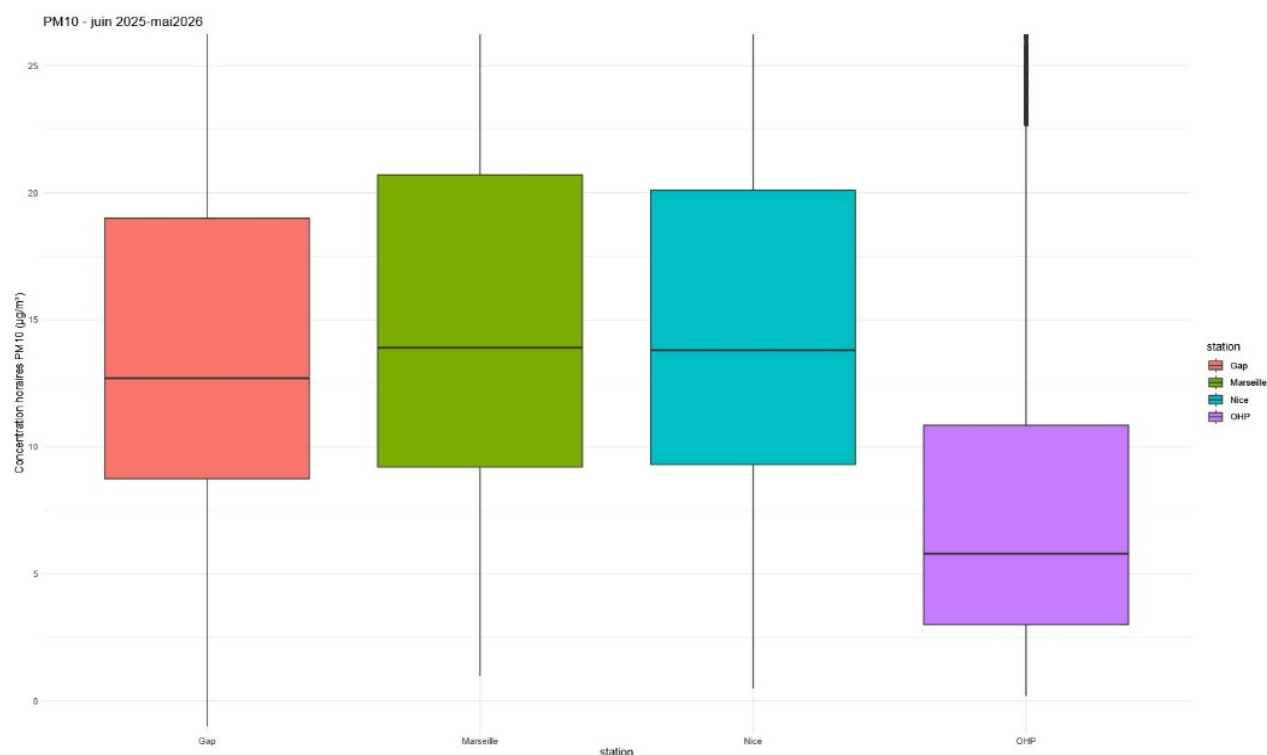


Figura 1 – Box Plot delle concentrazioni di PM_{10} per le postazioni di OHP, Gap, Nizza e Marsiglia nel periodo giugno 2025 – maggio 2026

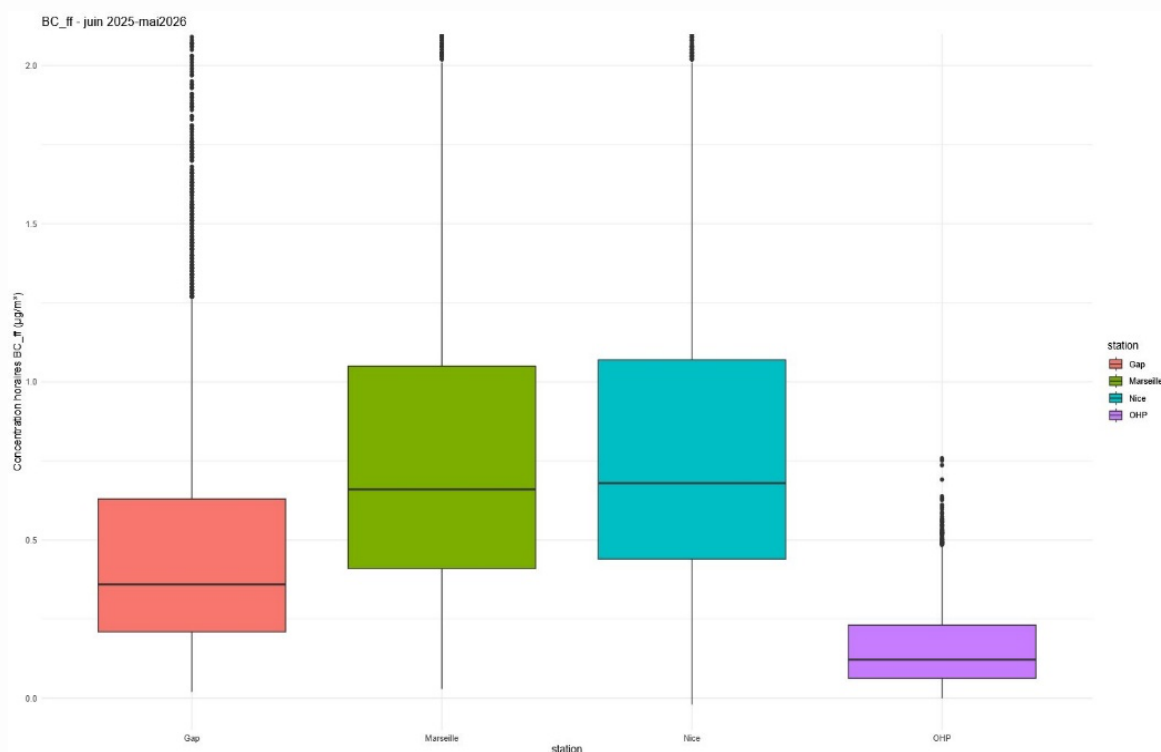


Figura 2 – Box Plot delle concentrazioni di BC (fossil fuel) per le postazioni di OHP, Gap, Nizza e Marsiglia nel periodo giugno 2025 – maggio 2026

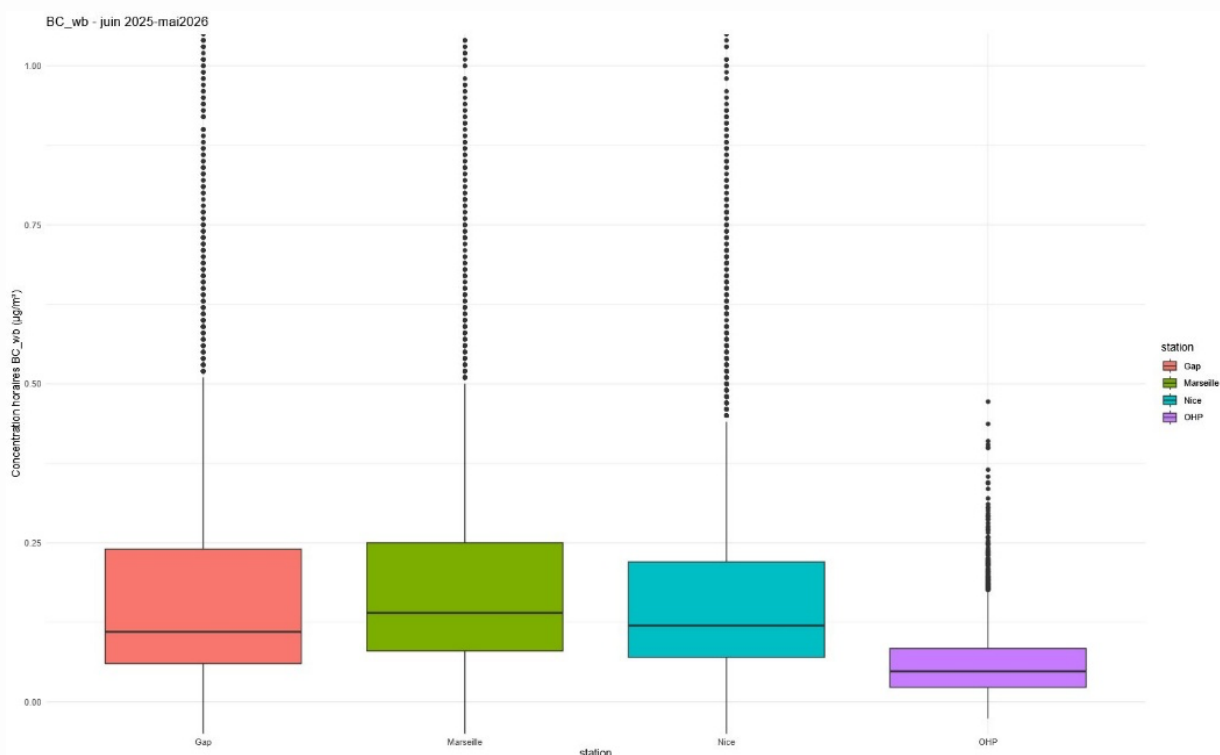


Figura 3 – Box Plot delle concentrazioni di BC (wood burning) per le postazioni di OHP, Gap, Nizza e Marsiglia nel periodo giugno 2025 – maggio 2026

Evoluzione delle emissioni

Le emissioni in atmosfera non sono un dato statico: evolvono con le tecnologie, i consumi e le abitudini quotidiane. In questa sezione presentiamo due approfondimenti condotti nell'ambito del progetto ALP'AERA che raccontano due facce di questa evoluzione. Il primo riguarda la speciazione dei composti organici volatili non metanici (COVNM) e il loro potenziale di formazione dell'ozono, con l'obiettivo di individuare le sorgenti sulle quali gli interventi di riduzione risultano più efficaci nel territorio ALCOTRA. Il secondo affronta la rapida diffusione dei sistemi di raffrescamento e climatizzazione: una risposta necessaria all'aumento delle temperature e alle ondate di calore, che porta però con sé emissioni dirette di gas fluorurati, una domanda energetica in forte crescita e un impatto termico sulle nostre città.

SPECIAZIONE DEI COMPOSTI ORGANICI VOLATILI E POTENZIALE DI FORMAZIONE DELL'OZONO

Nell'ambito del WP4.2.1 del progetto ALP'AERA abbiamo lavorato sui dati relativi ai Composti Organici Volatili Non Metanici (COVNM), concentrandoci in particolare sul loro legame con l'ozono. L'ozono è infatti un inquinante cosiddetto secondario, poiché si forma in atmosfera a partire da altri inquinanti, tra cui i COVNM.

L'ozono è un gas ossidante che rappresenta una duplice criticità. Dal punto di vista sanitario, è aggressivo per le mucose dell'apparato respiratorio; dal punto di vista economico, danneggia la vegetazione attaccando gli stomi fogliari, riducendo così la capacità delle piante di assorbire CO₂ e determinando una diminuzione delle rese agricole.

Nell'atmosfera sono presenti oltre 400 specie di Composti Organici Volatili Non Metanici (COVNM). Questi composti partecipano alla formazione degli aerosol organici secondari (AOS) e dell'ozono troposferico. Tuttavia, ciascuna specie chimica presenta una diversa reattività e, di conseguenza, un differente potenziale di formazione dell'ozono. Sulla base di studi sperimentali e modellistici è stata sviluppata una scala di classificazione che consente di valutarne il potenziale di formazione dell'ozono.

Nell'ambito di questo lavoro sono stati utilizzati tutti i dati di emissione messi a disposizione dai partner del progetto (Figura 1) per stimare il potenziale di formazione dell'ozono nell'area ALCOTRA (Figura 2).

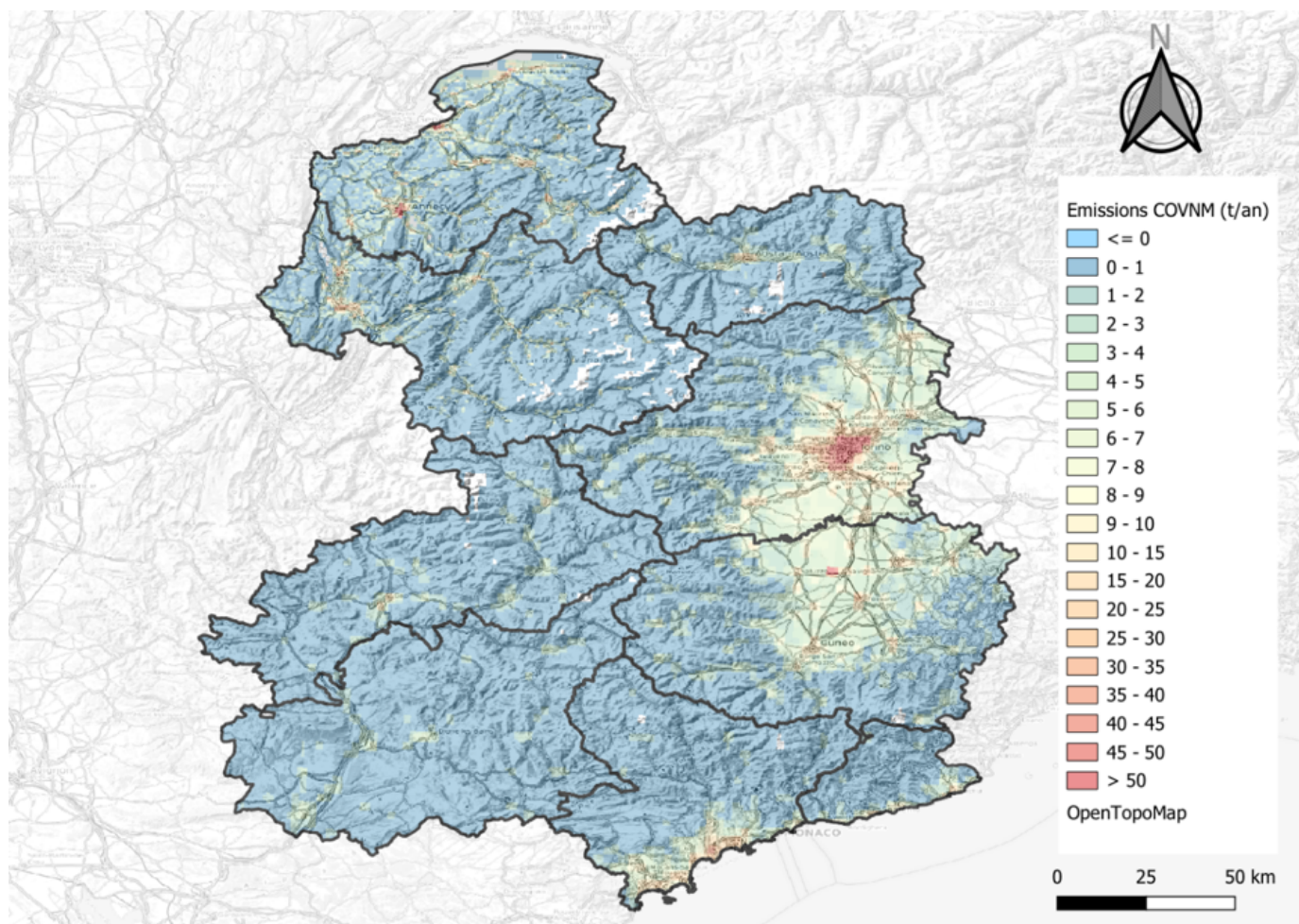


Figura 1 - Emissioni di COVNM nella regione ALCOTRA – anno 2019 (t/anno).

La Figura 2 evidenzia le aree geografiche con il maggiore potenziale di formazione dell'ozono, in particolare le valli alpine e l'area metropolitana di Torino. L'analisi dettagliata delle attività emissive consente inoltre di individuare i settori che contribuiscono maggiormente nella regione, permettendo così di indirizzare gli interventi di riduzione dei COVNM verso le sorgenti più efficaci. I principali contributi individuati da questo studio provengono dall'uso domestico di solventi e vernici, ma anche da alcune attività produttive, come ad esempio la panificazione.

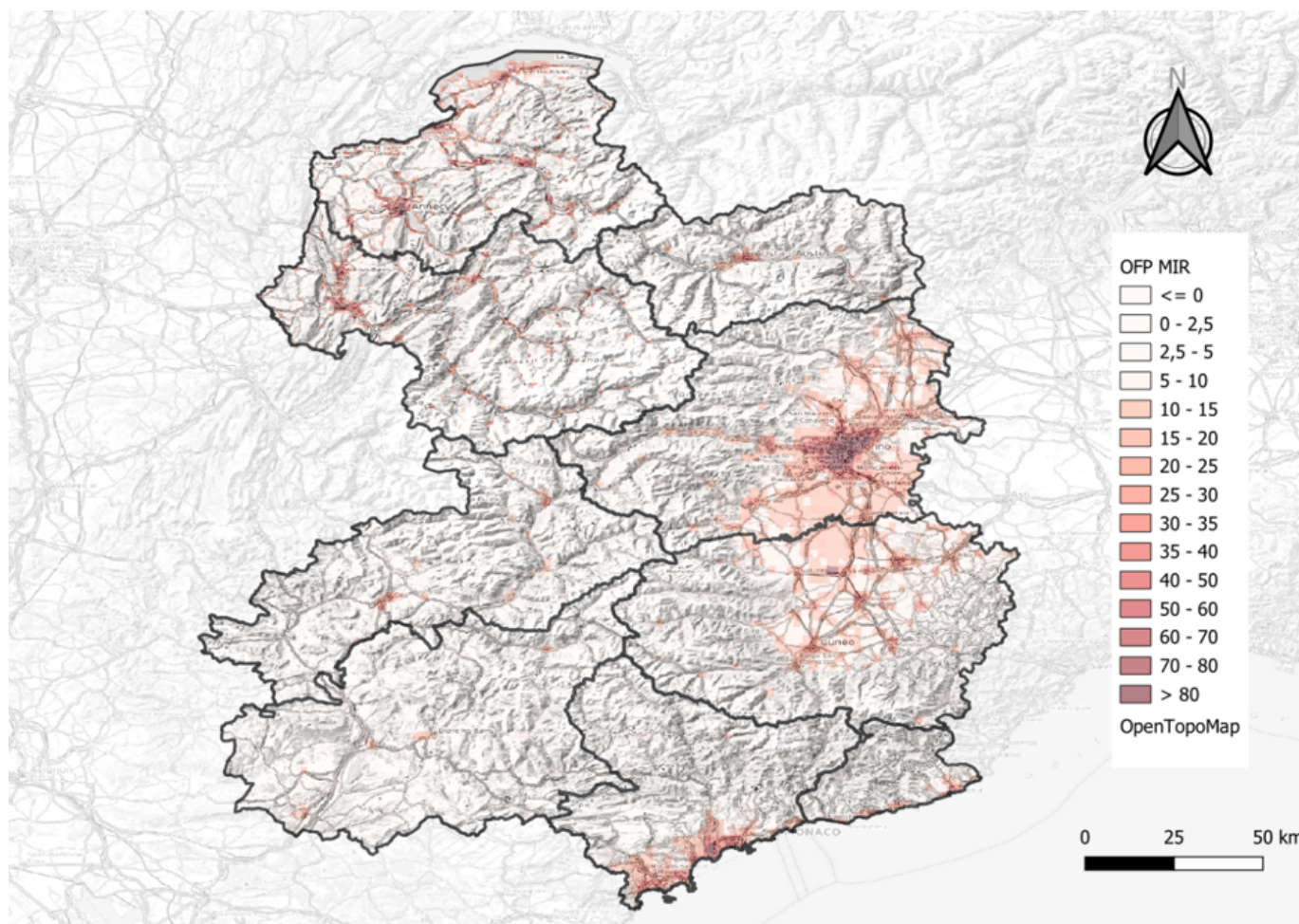


Figura 2 - Potenziale di formazione dell'ozono (indice MIR) nella regione ALCOTRA, ottenuto utilizzando i profili di speciazione e aggregazione sviluppati da ARPA Piemonte.

Il lavoro è stato inoltre confrontato con lo stato dell'arte delle principali tabelle di speciazione disponibili, utilizzate per descrivere la composizione delle specie chimiche dei COVNM nei diversi settori di attività.

Per maggiori dettagli e per consultare tutti i risultati dello studio, si rimanda al rapporto dedicato pubblicato sul sito web di progetto -> https://www.alpaera.eu/a/media/n/15/159725_Rapport_WP4-1-2_Speciation_Atmo_AURA_IT.pdf

SISTEMI DI RAFFRESCAMENTO E DI CLIMATIZZAZIONE

Il team del progetto ALP'AERA ha raccolto i più recenti studi sulle emissioni legate all'utilizzo della climatizzazione. Questi studi mettono in evidenza un paradosso sempre più attuale: la climatizzazione salva vite umane... ma aumenta la nostra impronta di carbonio.

■ Refrigeranti potenti e persistenti

I sistemi di climatizzazione funzionano grazie a **fluidi refrigeranti** (HCFC, CFC, HFC, ecc.) che consentono di trasferire il calore e raffreddare l'aria. Tuttavia, **quando un impianto è mal mantenuto, obsoleto o giunto a fine vita, tali fluidi possono disperdersi nell'atmosfera**, causando **emissioni dirette di gas fluorurati** con un **potenziale di riscaldamento globale** (GWP – Global Warming Potential) molto elevato, talvolta migliaia di volte superiore a quello della CO₂.

Se i CFC e gli HCFC sono stati vietati per proteggere lo strato di ozono, gli HFC sono ancora ampiamente utilizzati, sebbene il loro impiego abbia consentito di ridurre le emissioni espresse in CO₂ equivalente (Figura 1).

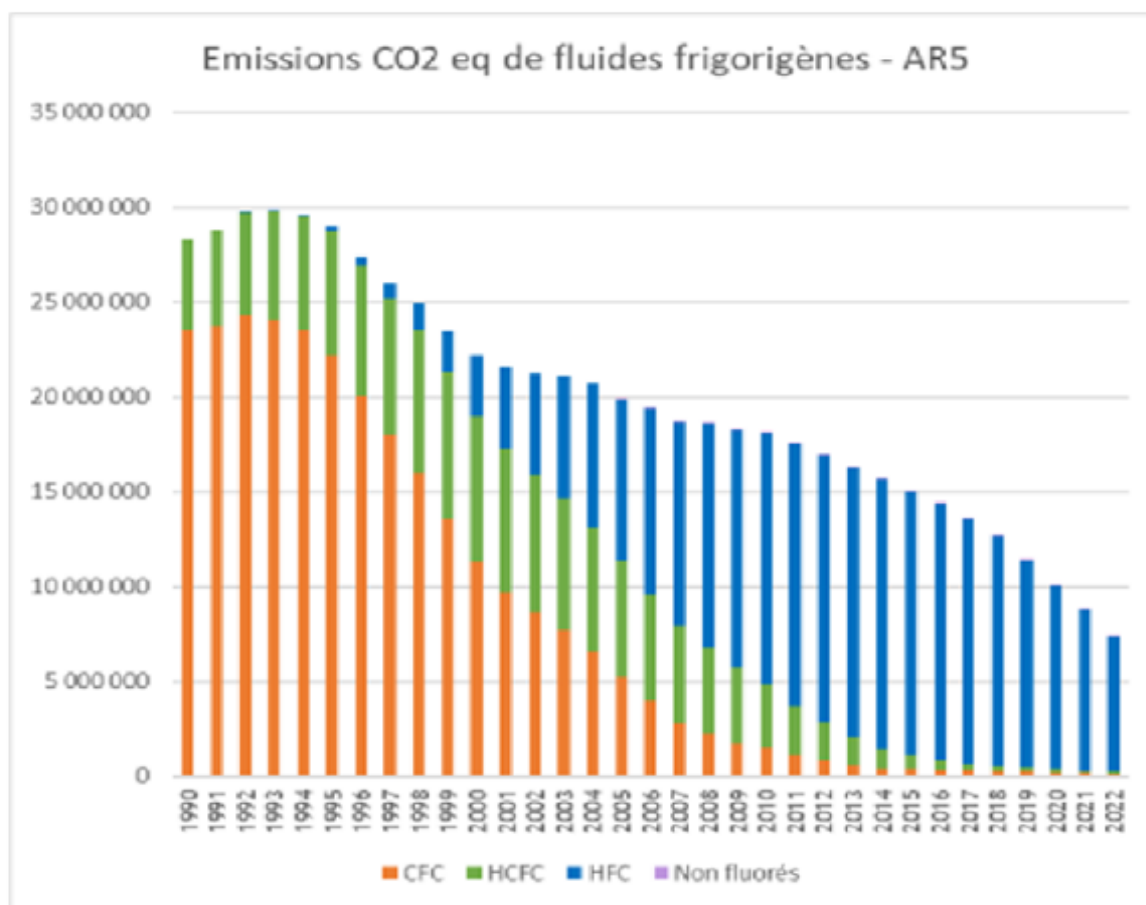


Figura 1 - Emissioni mondiali di CO₂ equivalente dei fluidi frigorigeni tra il 1990 e il 2022 (fonte: IPCC).

■ Azioni a livello mondiale ed europeo per ridurre le emissioni di HFC

Per affrontare questa sfida sono state adottate normative sia a livello internazionale sia europeo. **A livello internazionale**, l'Emendamento di Kigali al Protocollo di Montréal, entrato in vigore nel 2019, prevede una

riduzione progressiva degli idrofluorocarburi (HFC), **con l'obiettivo di diminuirne l'utilizzo dell'85% entro il 2045 in alcuni Paesi.**

L'Unione europea si è spinta oltre con il Regolamento (UE) 2024/573, che stabilisce l'eliminazione totale degli HFC entro il 2050. Il regolamento introduce, a partire **dal 2025**, quote rigorose, divieti progressivi per specifici settori e obblighi di recupero, etichettatura e tracciabilità. Le apparecchiature contenenti HFC, come alcuni climatizzatori e frigoriferi, saranno progressivamente vietate tra il 2026 e il 2035. Il sistema delle quote è inoltre accompagnato da un contributo economico calcolato per tonnellata di CO₂ equivalente. Questa normativa ambiziosa pone l'Unione europea all'avanguardia degli sforzi mondiali per la riduzione dei gas fluorurati (F-gas). L'obiettivo complessivo è ridurre le emissioni dell'80% entro il 2030 rispetto ai livelli del 2015.

Le normative F-Gas I, II e III consentono di ridurre progressivamente il potenziale di riscaldamento globale (GWP) dei gas impiegati. L'ultima versione, il Regolamento F-Gas III (UE 2024/573), applicabile dal 2024 al 2030, mira a vietare completamente gli HFC (con GWP ≥ 1) entro il 2030 nei settori della refrigerazione commerciale e industriale, della refrigerazione domestica, della climatizzazione e delle pompe di calore residenziali.

■ Una domanda energetica in forte crescita

La diffusione della climatizzazione è direttamente collegata all'aumento delle temperature e alla crescente frequenza delle ondate di calore.

In Francia, il **25% delle famiglie dispone già di un impianto di climatizzazione**, con punte del 47% nel Sud del Paese. Nel settore terziario, il 40% delle superfici è climatizzato. In Italia, la diffusione della climatizzazione nelle abitazioni è ancora più elevata, raggiungendo il **49% nel Nord del Paese**, ma con forti differenze regionali: dal 70% in Veneto a meno del 5% in Valle d'Aosta. Come in Francia, questa crescita è in atto dal 2014 ed è favorita soprattutto dalla diffusione dei sistemi reversibili, utilizzati sia per il riscaldamento sia per il raffrescamento. Nel settore terziario italiano, la climatizzazione rappresenta il **57% dei consumi elettrici degli edifici**.

Secondo l'ADEME, questa tendenza potrebbe portare a **più che raddoppiare il consumo di elettricità** destinato alla climatizzazione entro il 2050, anche considerando l'impiego di tecnologie più efficienti. Ciò rappresenta una sfida importante sia per le reti elettriche sia per le emissioni indirette, che dipendono dal mix energetico.

L'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) stima che la domanda mondiale di energia per i climatizzatori triplicherà entro il 2050 (Figura 2). In assenza di efficaci misure di mitigazione a livello internazionale, la diffusione della climatizzazione nei Paesi emergenti, in particolare in Asia e in Africa, potrebbe determinare un **nuovo aumento delle emissioni di CO₂** associate all'utilizzo dei sistemi di refrigerazione.

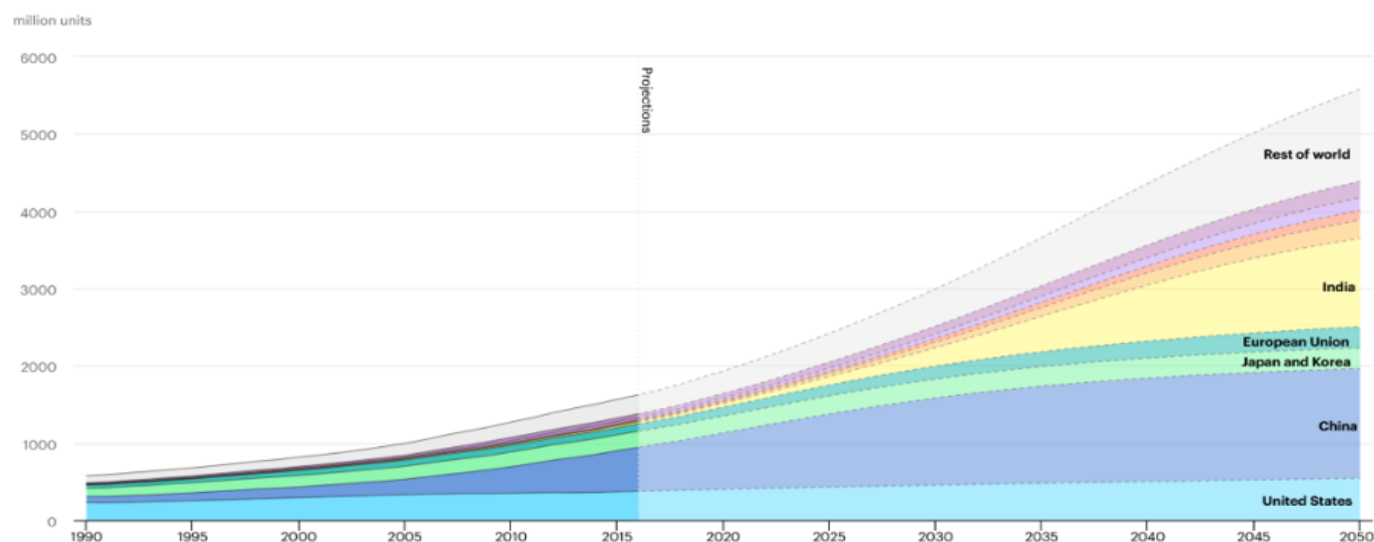


Figura 2 - Stock mondiale di apparecchi di climatizzazione tra il 1990 e il 2050 (fonte: IEA, 2018).

■ Un effetto collaterale sulle nostre città

Oltre alle emissioni di gas a effetto serra, la climatizzazione produce un impatto termico diretto sull'ambiente urbano. Espellendo calore verso l'esterno, i climatizzatori contribuiscono ad accentuare il fenomeno dell'**isola di calore urbana**, soprattutto durante i periodi di caldo estremo. Alcune simulazioni hanno dimostrato che, se nel 2003 il **50% delle abitazioni parigine** fosse stato climatizzato, in alcuni quartieri la temperatura esterna avrebbe potuto aumentare fino a **2 °C**. Ciò rappresenta una sfida significativa per l'adattamento delle città, che devono ripensare le proprie strategie di raffrescamento integrando soluzioni passive e collettive.

Le soluzioni esistono: lo sviluppo di refrigeranti naturali o di nuova generazione (HFO), la diffusione dei sistemi di raffrescamento passivo, il miglioramento dell'isolamento degli edifici, ma anche un cambiamento nei comportamenti individuali (temperatura impostata, durata di utilizzo, ecc.). Una strategia integrata, che combini innovazione, regolamentazione, efficienza energetica e governance internazionale, è fondamentale per superare questo paradosso: **Raffreddare le città = riscaldare il pianeta.**

Per ulteriori approfondimenti, è possibile consultare il rapporto completo:

https://www.alpaera.eu/a/media/n/14/159727_ALP-AERA_prodotto_biblio_climatizzazione_IT.pdf

La valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici sulla qualità dell'aria

Tra gli obiettivi principali del progetto ALP'AERA c'è la comprensione di come i cambiamenti climatici influenzeranno la qualità dell'aria nella regione ALCOTRA. Analizzare questi scenari futuri permette non solo di valutare la sensibilità del territorio, ma anche di individuare le azioni più efficaci per proteggere e migliorare la qualità dell'aria nei prossimi anni.

Nella newsletter precedente abbiamo presentato l'impostazione metodologica adottata dal progetto ALP'AERA per la valutazione della qualità dell'aria futura sul territorio ALCOTRA e introdotto il sistema modellistico utilizzato nel WP5 per effettuare le analisi di scenario: una catena integrata di modelli numerici che, partendo dagli scenari climatici globali/regionali, produce simulazioni della qualità dell'aria ad alta risoluzione spaziale su tutto il territorio transfrontaliero.

Il cuore del sistema, implementato da ARPA Piemonte, è un modello numerico tridimensionale di chimica e trasporto (Chemistry Transport Model, CTM) che riproduce in modo realistico il comportamento degli inquinanti, simulando i processi chimico-fisici che avvengono in atmosfera, ovvero l'emissione, il trasporto, la dispersione, la trasformazione chimica e la deposizione. Il sistema modellistico è articolato su due domini di calcolo annidati (Figura 1): un dominio europeo a risoluzione di circa 12 km che copre tutta l'Europa centro-occidentale, e un dominio ALCOTRA a risoluzione di circa 3 km che rappresenta con maggiore dettaglio il territorio transfrontaliero.

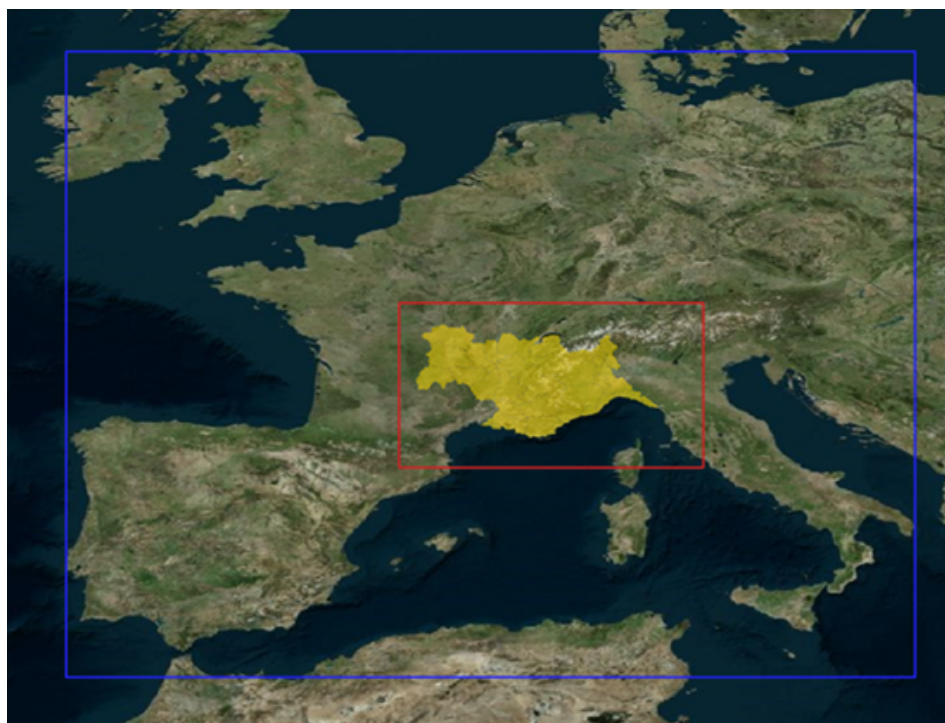


Figura 1 - Domini di simulazione per le analisi di scenario.

Il dominio più grande fornisce le condizioni al contorno a quello più fine, garantendo la coerenza tra la scala continentale e quella locale. Il modello di chimica e trasporto richiede tre grandi categorie di dati di ingresso:

- i campi meteorologici che guidano le dinamiche atmosferiche, che nel nostro caso sono i dati degli scenari prodotti da CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici¹) con l'ausilio del loro modello climatico regionale,
- le emissioni, su ogni dominio di calcolo, di tutte le specie inquinanti trattate dal modello CTM,
- i dati di condizioni al contorno, ovvero i valori di concentrazione degli inquinanti ai bordi esterni del dominio di calcolo europeo.

Tre sono gli orizzonti temporali simulati, ciascuno della durata di dieci anni: uno storico di riferimento incentrato sul 2015 (anni 2010-2019), uno futuro a medio termine incentrato sul 2050 (anni 2045-2054) e uno futuro a lungo termine incentrato sul 2070 (anni 2065-2074). Entrambi gli scenari futuri sono guidati dallo scenario climatico SSP3-7.0. La produzione di simulazioni decennali continue — non singoli anni campione, bensì un decennio ininterrotto per ciascuno scenario — è importante per separare il segnale del cambiamento climatico dalla variabilità naturale del clima, che può mascherare tendenze pluriennali se si osservano solo annate isolate.

Produrre simulazioni di questo tipo richiede ingenti risorse computazionali: le simulazioni sono state eseguite su un cluster parallelo ad alte prestazioni del CINECA² — uno dei principali centri di supercalcolo italiani. Anche così, ogni anno simulato richiede settimane di calcolo e i dati prodotti si misurano in decine di terabyte. Le simulazioni relative al periodo storico e quelle relative al futuro a medio termine sono state completate, mentre sono attualmente in corso e in fase di completamento le simulazioni relative al futuro a lungo termine.

GLI SCENARI CLIMATICI AL 2050 E AL 2070 SUL TERRITORIO ALCOTRA

Lo scenario climatico utilizzato per le analisi di scenario del progetto ALP'AERA appartiene alla famiglia dei cosiddetti Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)³, definiti nel Sesto Rapporto di Valutazione sui cambiamenti climatici (Sixth Assessment Report on climate change, AR6) di IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). In particolare, è stato adottato lo scenario SSP3-7.0, che descrive un futuro caratterizzato da crescente rivalità tra regioni e da un aumento delle disuguaglianze sociali e prevede una forzante radiativa pari a 7 W/m² entro il 2100, collocandosi nella fascia medio-alta tra quelli individuati dall'IPCC. Nell'ambito del progetto le simulazioni climatiche relative a questo scenario, ai due domini e agli orizzonti temporali considerati (periodo storico di riferimento, futuro a medio termine e futuro a lungo termine) sono state elaborate dal CMCC, utilizzando il modello climatico COSMO-CLM, sviluppato nell'ambito del Consorzio europeo COSMO⁴.

¹ <https://www.cmcc.it/>

² <https://www.cineca.it/it>

³ <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

⁴ <https://www.clm-community.eu/>

Per valutare l'evoluzione delle condizioni atmosferiche nel tempo, sono stati analizzati specifici indicatori climatici, che permettono di descrivere in modo chiaro, sintetico ed efficace i principali rischi legati al clima, anche su aree geografiche estese. L'analisi si è focalizzata sullo studio dell'indice dei giorni di gelo (frost days), dell'indice delle notti tropicali (tropical nights) e sul calcolo dei percentili della temperatura media, minima e massima. Secondo la definizione dell'OMM (Organizzazione Meteorologica Mondiale), l'indice dei giorni di gelo (FD) corrisponde al numero totale di giorni, in un dato periodo di riferimento, in cui la temperatura minima giornaliera scende al di sotto degli 0°C. Al contrario, l'indice delle notti tropicali (TR) è definito come il numero totale di giorni durante i quali la temperatura minima giornaliera supera i 20°C. I percentili permettono di descrivere non solo le condizioni medie, ma anche gli eventi più intensi: valori elevati, come il 95° o 99° percentile, sono infatti associati a fenomeni estremi, come ondate di calore o precipitazioni intense. Gli indicatori sono stati calcolati sia per il periodo storico sia per gli scenari futuri, consentendo di quantificare in modo chiaro l'intensità dei cambiamenti attesi e la possibile evoluzione degli eventi estremi nei diversi orizzonti temporali, attraverso il calcolo delle anomalie rispetto al periodo di riferimento.

In Figura 2 è rappresentata la mappa dell'anomalia del **50° percentile della temperatura media** sul dominio ALCOTRA per i 2 orizzonti futuri e mostra come un aumento di 1-2 °C sulla temperatura media sia atteso su tutte le regioni all'orizzonte 2050, più marcato all'orizzonte 2070.

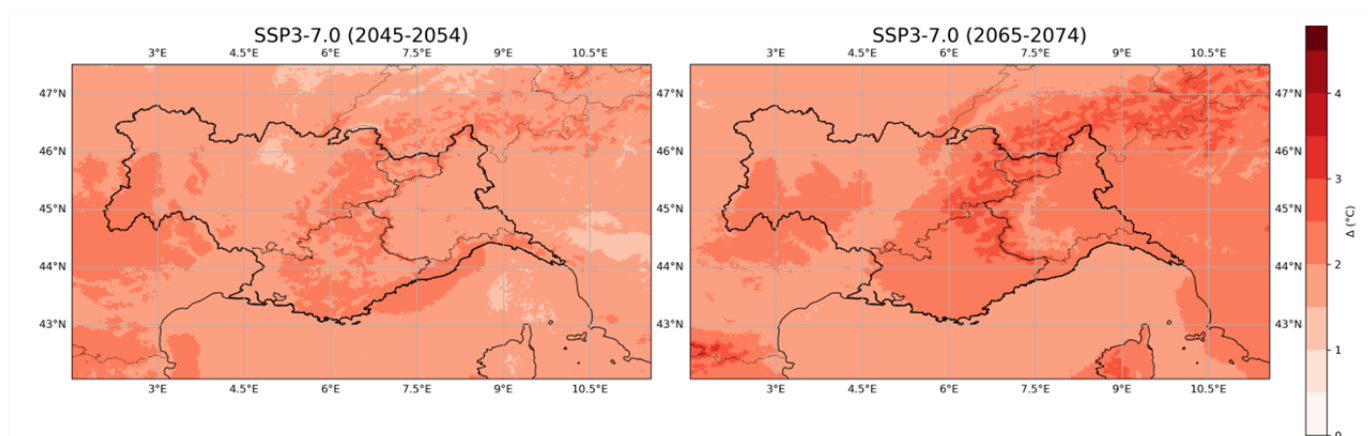


Figura 2 - Anomalia del 50°percentile della temperatura media per i 2 orizzonti futuri sul dominio ALCOTRA.

La Figura 3 mostra la mappa dell'anomalia del **99° percentile della temperatura massima** sul dominio ALCOTRA per i 2 orizzonti temporali considerati. I risultati evidenziano una progressiva intensificazione degli estremi di temperatura: nel periodo 2045–2054 gli incrementi rispetto al periodo di riferimento sono compresi tra 2 e 4 °C, mentre nel periodo 2065–2074 le anomalie superano diffusamente i 5 °C, con i valori più elevati concentrati nelle aree settentrionali del dominio. Questo quadro indica un aumento atteso sia della frequenza sia dell'intensità delle ondate di calore nel corso del secolo, con un'accentuazione del rischio associato agli eventi di caldo estremo.

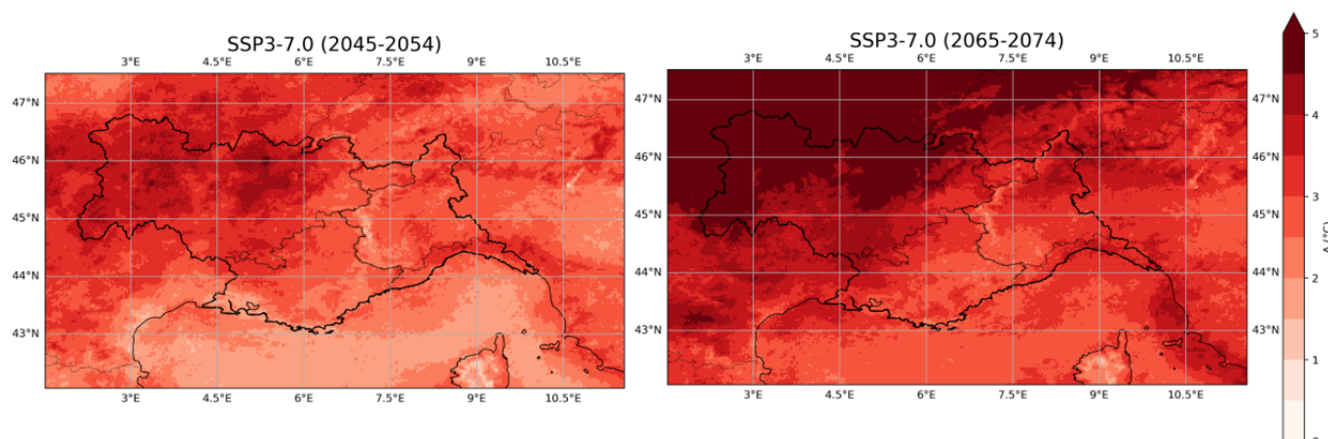


Figura 3 - Anomalia del 99°percentile della temperatura massima per i 2 orizzonti futuri sul dominio ALCOTRA.

Anche gli estremi freddi mostrano uno spostamento verso condizioni più miti. La Figura 4 mostra la distribuzione spaziale dell'anomalia del **1° percentile della temperatura minima** sul dominio ALCOTRA per i 2 orizzonti temporali considerati. Si osserva un aumento diffuso delle temperature minime sull'intera area di studio, con un riscaldamento progressivo dal periodo di metà secolo a quello di fine secolo, che interessa in maniera più marcata i rilievi, dove le anomalie superano i 5 °C. Questo quadro indica una progressiva riduzione della frequenza e dell'intensità degli episodi di freddo estremo e, in particolare, delle notti più fredde.

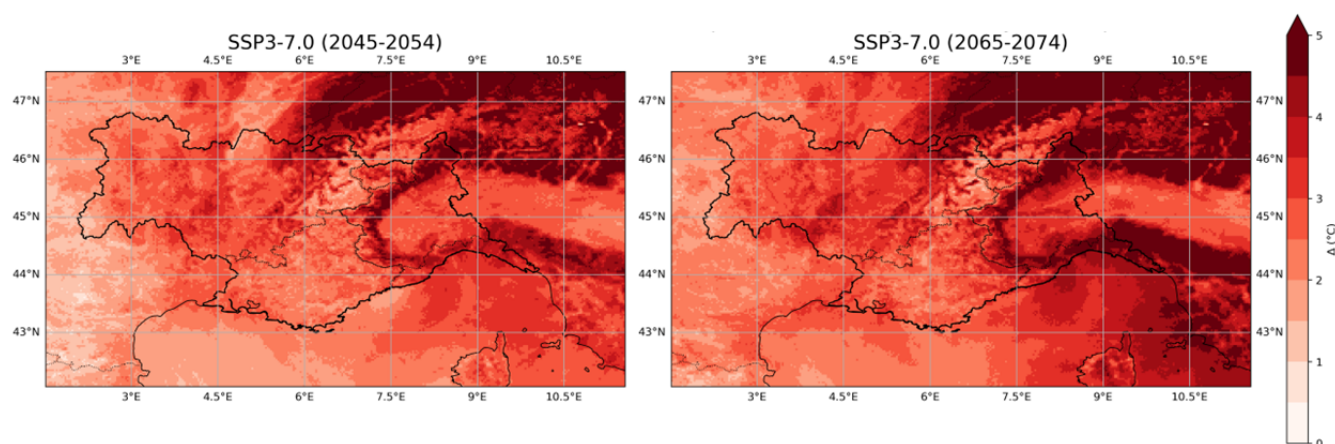


Figura 4 - Anomalia del 1°percentile della temperatura minima per i 2 orizzonti futuri sul dominio ALCOTRA.

La Figura 5 riassume la distribuzione spaziale delle anomalie del 99° percentile della temperatura massima (a) e del 1° percentile della temperatura minima (b) nelle diverse regioni del dominio ALCOTRA. In entrambe le variabili si osserva uno spostamento delle distribuzioni verso valori più elevati nel periodo 2065–2074 rispetto al 2045–2054, confermando un'intensificazione del riscaldamento nel corso del secolo. Per gli estremi di temperatura massima, la regione AURA presenta le anomalie mediane più elevate e la maggiore variabilità, con valori che localmente superano i 6 °C, mentre PACA, Liguria, Piemonte e Valle d'Aosta mostrano incrementi

più contenuti, generalmente compresi tra 3 e 4 °C. Anche per gli estremi di temperatura minima tutte le regioni evidenziano un aumento delle anomalie nel secondo orizzonte temporale; gli incrementi risultano particolarmente marcati in Liguria e AURA, mentre Piemonte e Valle d'Aosta mostrano una maggiore dispersione dei valori, indicativa di una più accentuata eterogeneità spaziale. Nel complesso, i boxplot confermano che il riscaldamento interessa sia gli estremi caldi sia quelli freddi, con una progressiva intensificazione nello scenario futuro e differenze regionali riconducibili alle caratteristiche orografiche e climatiche del territorio.

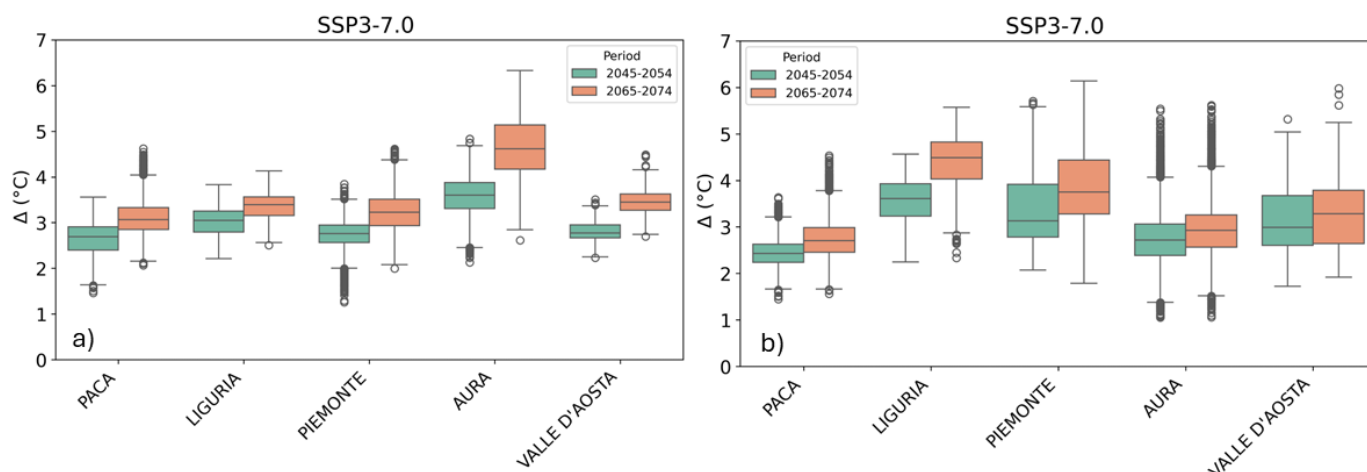


Figura 5 - Boxplot⁵ dell'anomalia del 99°percentile della temperatura massima (a) e del 1° percentile della temperatura minima (b) per i 2 orizzonti futuri sulle regioni del dominio ALCOTRA.

La Figura 6 mostra la mappa dell'anomalia dei **giorni di gelo (FD)** sul dominio ALCOTRA per i due orizzonti temporali futuri. Si osserva una diminuzione del numero di giorni con temperatura minima inferiore a 0 °C, che risulta più marcata nel periodo 2065–2074 rispetto al 2045–2054. Le riduzioni più consistenti interessano le aree montuose alpine, con attesi 40/60 giorni di gelo in meno all'anno, mentre nelle zone costiere e di pianura le variazioni risultano generalmente più contenute. Questo andamento è coerente con l'aumento delle temperature minime evidenziato nelle analisi precedenti e indica una progressiva contrazione della frequenza degli episodi di gelo, con possibili ripercussioni sul regime nivale, sugli ecosistemi montani e sulle attività agricole.

⁵ Il boxplot è un grafico che rappresenta la distribuzione di un insieme di dati attraverso cinque statistiche riassuntive: minimo, primo quartile (Q1), mediana, terzo quartile (Q3) e massimo. La "scatola" centrale copre l'intervallo interquartile (IQR = Q3 – Q1), con una linea interna che indica la mediana. I "baffi" si estendono fino ai valori estremi non anomali, mentre i punti oltre i baffi (tipicamente oltre $1,5 \times \text{IQR}$) vengono visualizzati come outlier.

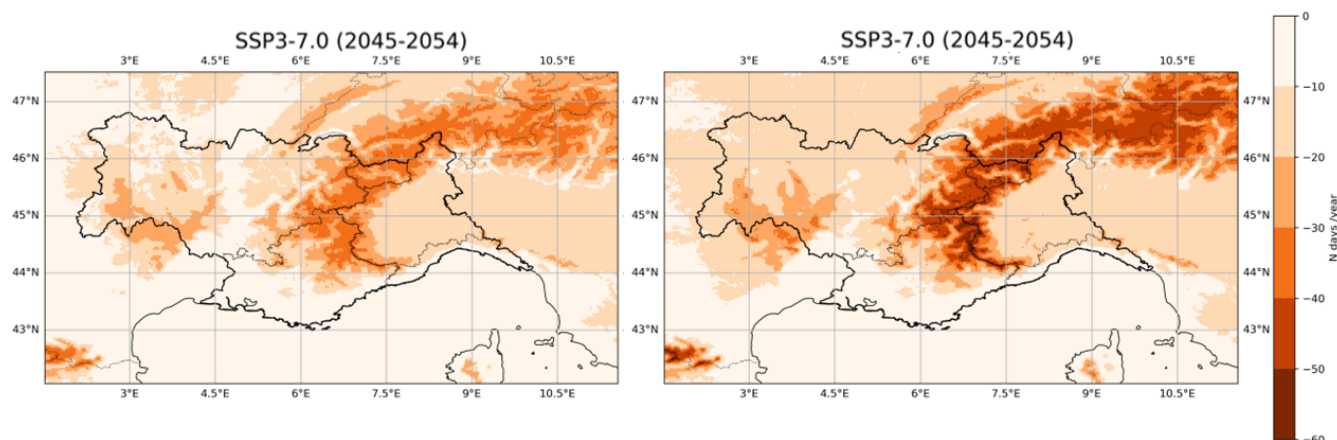


Figura 6 - Anomalia dei giorni di gelo (FD) per i 2 orizzonti futuri sul dominio ALCOTRA.

La Figura 7 mostra la distribuzione spaziale dell'anomalia delle **notti tropicali (TR)** sul dominio ALCOTRA per i due orizzonti temporali futuri nello scenario SSP3-7.0. Nel complesso si evidenzia un marcato aumento del numero di notti con temperatura minima superiore a 20 °C, con un segnale già evidente nel periodo 2045–2054 e un'intensificazione più pronunciata nel periodo 2065–2074. L'incremento risulta particolarmente accentuato nelle aree di pianura e lungo le fasce costiere, in particolare sul settore ligure e nella Pianura Padana, dove le anomalie raggiungono valori di 40-50 notti all'anno. Anche le aree collinari e parte dei fondivalle alpini mostrano un aumento significativo, mentre le zone montuose mantengono valori relativamente più contenuti, pur evidenziando un segnale positivo nel secondo orizzonte temporale. Nel complesso, la distribuzione spaziale conferma una progressiva espansione e intensificazione delle notti tropicali nel corso del secolo, coerente con il riscaldamento delle temperature minime già evidenziato nelle analisi dei percentili e degli estremi freddi, con possibili impatti rilevanti sul disagio bioclimatico estivo e sulla frequenza degli eventi di calore notturno.

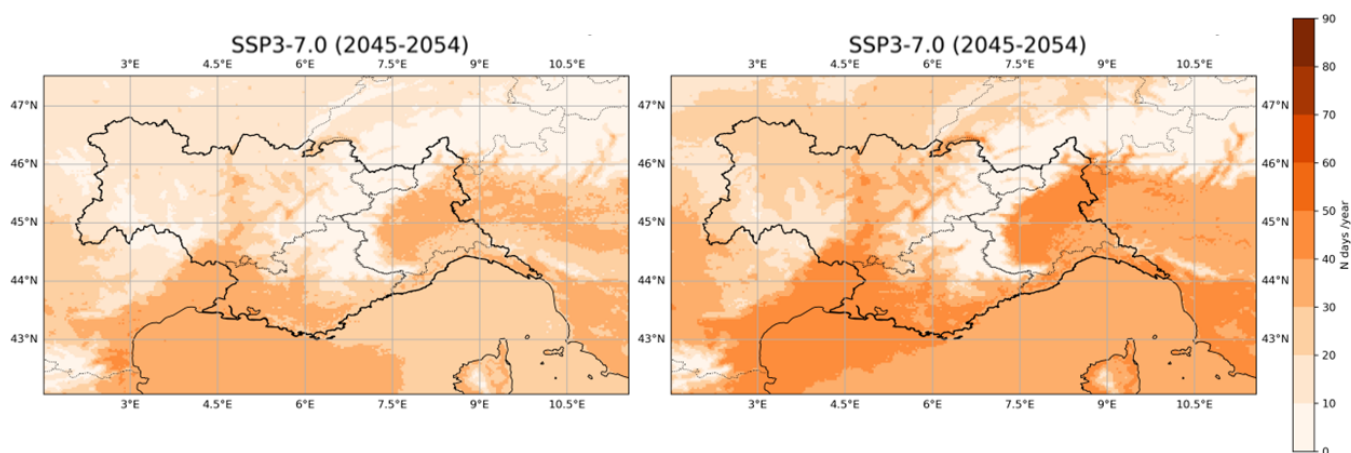


Figura 7 - Anomalia delle notti tropicali (TR) per i 2 orizzonti futuri sul dominio ALCOTRA.

LE SIMULAZIONI DI QUALITÀ DELL'ARIA DEL PERIODO STORICO DI RIFERIMENTO 2010-2019

Le simulazioni del periodo di riferimento sono state effettuate utilizzando i seguenti dati di ingresso al modello di qualità dell'aria:

- le simulazioni climatiche relative al periodo storico, ovvero condotte sempre con il modello climatico regionale di CMCC, ma sul periodo passato osservato 2010-2019 utilizzando come forzante ai bordi del dominio le condizioni atmosferiche derivate da una rianalisi globale;
- l'inventario delle emissioni armonizzato sul territorio ALCOTRA prodotto come risultato dell'azione WP4.1, con anno di riferimento 2019 e, sul dominio europeo, l'inventario messo a disposizione dal Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS⁶) per gli anni 2010-2019,
- i campi di concentrazione dei principali inquinanti atmosferici distribuiti, a livello mensile, dal modello climatico globale MRI-ESM2.0⁷ per il periodo 2010-2019.

Le simulazioni del periodo storico hanno una duplice valenza. Innanzitutto, costruiscono il periodo di riferimento rispetto al quale analizzare le variazioni della qualità dell'aria futura nel territorio ALCOTRA. Inoltre, tramite il confronto tra i risultati delle simulazioni del periodo storico e i dati di qualità dell'aria effettivamente misurati dalle reti di monitoraggio dal 2010 al 2019⁸ è possibile validare il sistema modellistico e le sue configurazioni, evidenziandone caratteristiche ricorrenti e limiti, utili per interpretare correttamente anche i risultati sugli scenari futuri:

- per il biossido di azoto (NO₂), si osserva una tendenza alla sottostima rispetto alle osservazioni; le prestazioni migliorano passando dal dominio europeo al dominio ALCOTRA, grazie alla maggiore risoluzione che permette di rappresentare meglio i pattern spaziali del territorio transfrontaliero;
- per il particolato (PM₁₀ e PM_{2.5}), la sottostima è più pronunciata e sistematica, su entrambi i domini di simulazione, in particolare nel trimestre invernale (dicembre, gennaio, febbraio)
- per l'ozono si osserva una tendenza generale alla sottostima, meno importante sul dominio ALCOTRA.

I risultati ottenuti sono coerenti con quanto riscontrato in letteratura per sistemi modellistici analoghi applicati a scale spaziali e temporali comparabili, anche in considerazione della tipologia di dati meteorologici e di condizioni al contorno (simulazioni storiche di un modello climatico) in ingresso al sistema.

⁶ <https://atmosphere.copernicus.eu/>

⁷ MRI-ESM2.0 Earth System Model, doi:10.22033/ESGF/CMIP6.6842

⁸ I dati osservati provengono dal database EEA (European Environment Agency) e coprono l'intero periodo 2010-2019, con una rete che include, per la sola area ALCOTRA, oltre 130 stazioni per il biossido di azoto, circa 96 per il PM₁₀, 41 per il PM_{2.5} e 58 stazioni di fondo per l'ozono, distribuite tra Piemonte, Liguria, Valle d'Aosta, Auvergne-Rhône-Alpes e Provence-Alpes-Côte d'Azur

LE SIMULAZIONI DI QUALITÀ DELL'ARIA NEL FUTURO A MEDIO TERMINE 2045-2054

Una volta costruita la base di riferimento storica e verificata l'affidabilità del sistema, è stato possibile simulare lo scenario futuro al 2050, per il decennio dal 2045 al 2054. Le simulazioni del futuro a medio termine sono state effettuate utilizzando come dati di ingresso al modello di qualità dell'aria:

- le simulazioni climatiche nello scenario SSP3-7.0 prodotte con il modello climatico regionale di CMCC utilizzando come forzante ai bordi del dominio europeo i dati del modello climatico globale sempre nello scenario SSP3-7.0;
- la proiezione al 2050 degli inventari delle emissioni utilizzati per il periodo storico di riferimento. Le emissioni sono state proiettate sulla base delle tendenze evolutive ottenute dal modello GAINS-Europa⁹ nello scenario evolutivo CLE (Current Legislation) ECLIPSE v6, ovvero lo scenario "a legislazione corrente" che descrive il trend atteso delle emissioni europee di inquinanti atmosferici in presenza delle politiche già pianificate, senza ulteriori misure aggiuntive;
- i campi di concentrazione dei principali inquinanti atmosferici distribuiti, a livello mensile, dal modello climatico globale MRI-ESM2.0¹⁰ nello scenario SSP3-7.0, coerenti con lo scenario climatico prodotto dal CMCC (MRI-ESM2.0 è infatti il modello che fornisce le concentrazioni di aerosol e di inquinanti atmosferici al modello globale utilizzato da CMCC)

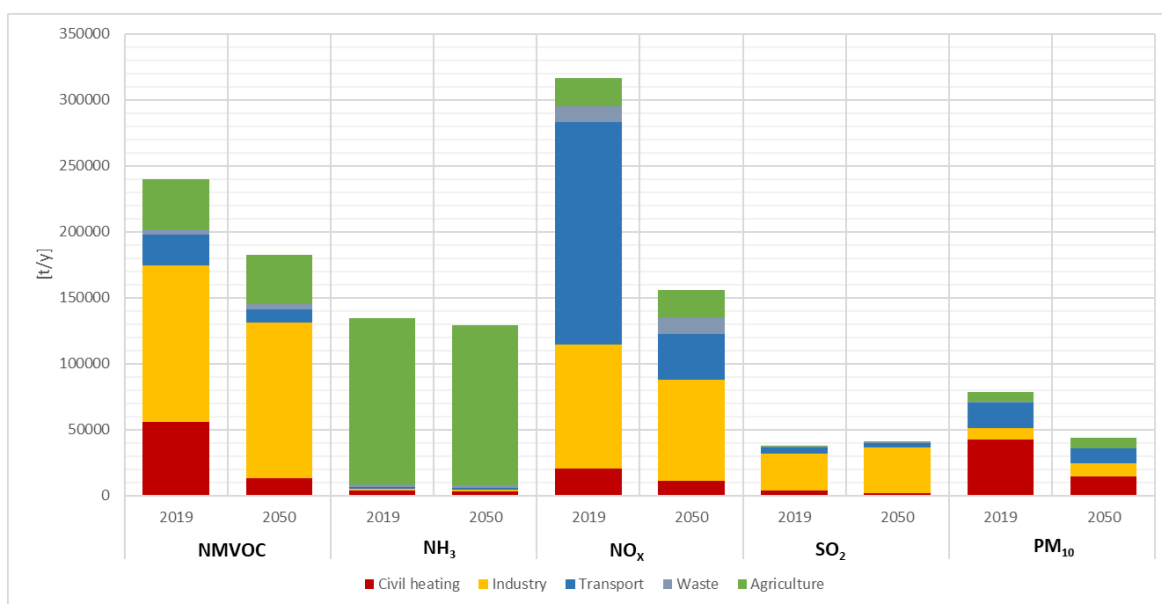


Figura 8 - Totali emissivi sul dominio ALCOTRA dei principali inquinanti atmosferici suddivisi per macrosettore nello scenario di riferimento al 2019 e nella proiezione al 2050.

⁹ Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS)-Model, <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-gains/>

¹⁰ MRI-ESM2.0 Earth System Model, doi:10.22033/ESGF/CMIP6.6842

Le simulazioni di qualità dell'aria al 2050 combinano la forzante climatica SSP3-7.0 con le proiezioni emissive GAINS Europa CLE. Da un punto di vista qualitativo, i due scenari risultano allineati, in particolar modo se si fa riferimento al continente europeo. SSP3-7.0 corrisponde alla narrativa “Regional Rivalry”, caratterizzata da debole cooperazione internazionale, sviluppo socioeconomico diseguale e limitata ambizione nelle politiche ambientali. Lo scenario GAINS CLE assume la piena applicazione della legislazione vigente in materia di qualità dell'aria, senza l'introduzione di nuove politiche, rappresentando quindi una baseline conservativa delle riduzioni emissive. Tuttavia, tale coerenza non si estende completamente al livello strutturale. SSP3-7.0 deriva da modelli integrati globali (IAM), che rappresentano in modo coerente sviluppo socioeconomico, sistemi energetici, uso del suolo ed emissioni. Al contrario, GAINS CLE è uno scenario emissivo regionale, basato su politiche europee ufficiali e su ipotesi tecnologiche settoriali dettagliate. Nonostante tali limitazioni, questa combinazione rappresenta un compromesso pragmatico tra coerenza climatica globale e dettaglio emissivo regionale. Essa consente infatti di utilizzare proiezioni climatiche avanzate insieme a inventari emissivi altamente risolti e rilevanti dal punto di vista delle politiche. Per il biossido di azoto e il particolato, le cui concentrazioni nel dominio ALCOTRA sono determinate principalmente dalle sorgenti locali, regionali e continentali, la combinazione SSP3-7.0/GAINS CLE è rappresentativa di un futuro con clima più caldo e politiche europee di qualità dell'aria invariate rispetto al presente. Per l'ozono invece bisogna tener conto che nelle simulazioni al 2050 potrebbe esserci una sovrastima del contributo di ozono esterno al dominio europeo di calcolo. L'ozono infatti ha tempi di vita atmosferica lunghi e una forte componente di trasporto a lunga distanza: parte delle sue concentrazioni nel dominio ALCOTRA proviene dall'esterno, attraverso le condizioni al contorno del modello. Queste condizioni al contorno riflettono il contesto emissivo globale di SSP3-7.0, in cui il background globale di ozono è più alto di quanto sarebbe in uno scenario climatico coerente con politiche europee.

I risultati delle simulazioni 2045-2054 sono stati analizzati rispetto al periodo di riferimento 2010-2019 confrontando le distribuzioni statistiche delle concentrazioni giornaliere simulate sull'intero decennio, utilizzando una serie di indicatori percentilari. L'uso dei percentili permette di caratterizzare la distribuzione delle concentrazioni in modo più completo rispetto alla sola media annua. Quest'ultima descrive il livello medio delle concentrazioni, ma non fornisce informazioni sulla variabilità e sugli episodi di picco, rilevanti sia per la valutazione degli effetti sulla salute sia per il confronto con i valori limite normativi. Il 50° percentile (mediana) rappresenta la concentrazione giornaliera tipica; il 75°, 90° e 95° percentile descrivono le situazioni progressivamente più elevate. Una volta disponibili i percentili sono state calcolate le anomalie degli stessi, ovvero le differenze percentuali tra i percentili relativi al futuro a medio termine e i percentili del periodo di riferimento. Il calcolo è avvenuto sia per ogni cella del dominio di calcolo, in modo da ottenere la distribuzione spaziale delle differenze sul territorio ALCOTRA, sia sui dati estratti in corrispondenza dei punti delle stazioni di monitoraggio¹¹, in modo da ottenere una proiezione al 2050 delle serie di misura osservate secondo i risultati delle simulazioni da confrontare con le soglie normative vigenti. Il quadro normativo di riferimento adottato è quello della nuova Direttiva europea sulla qualità dell'aria 2024/2881, entrata in vigore a livello europeo nel dicembre 2024 e che introduce limiti più stringenti, a partire dall'anno 2030, rispetto alla normativa precedente attualmente ancora in vigore nella legislazione degli Stati Membri (il recepimento nazionale della Direttiva deve avvenire entro fine 2026).

¹¹ Su tutto il dominio ALCOTRA: 131 stazioni per NO₂, 96 per PM₁₀, 41 per PM_{2.5}, 58 per l'ozono

LA QUALITÀ DELL'ARIA NEL FUTURO A MEDIO TERMINE 2045-2054 SUL TERRITORIO ALCOTRA

Per il biossido di azoto, i trend di riduzione emissiva previsti dallo scenario GAINS CLE mostrati in Figura 8 si traducono in un chiaro segnale di riduzione consistente delle concentrazioni medie giornaliere in tutto il dominio ALCOTRA. Le riduzioni investono tutti i percentili della distribuzione, sono maggiori nelle aree urbane e lungo le arterie di traffico principali, più contenute nelle zone montane dove sono apprezzabili soltanto per i percentili più alti e nel periodo invernale (dicembre, gennaio, febbraio).

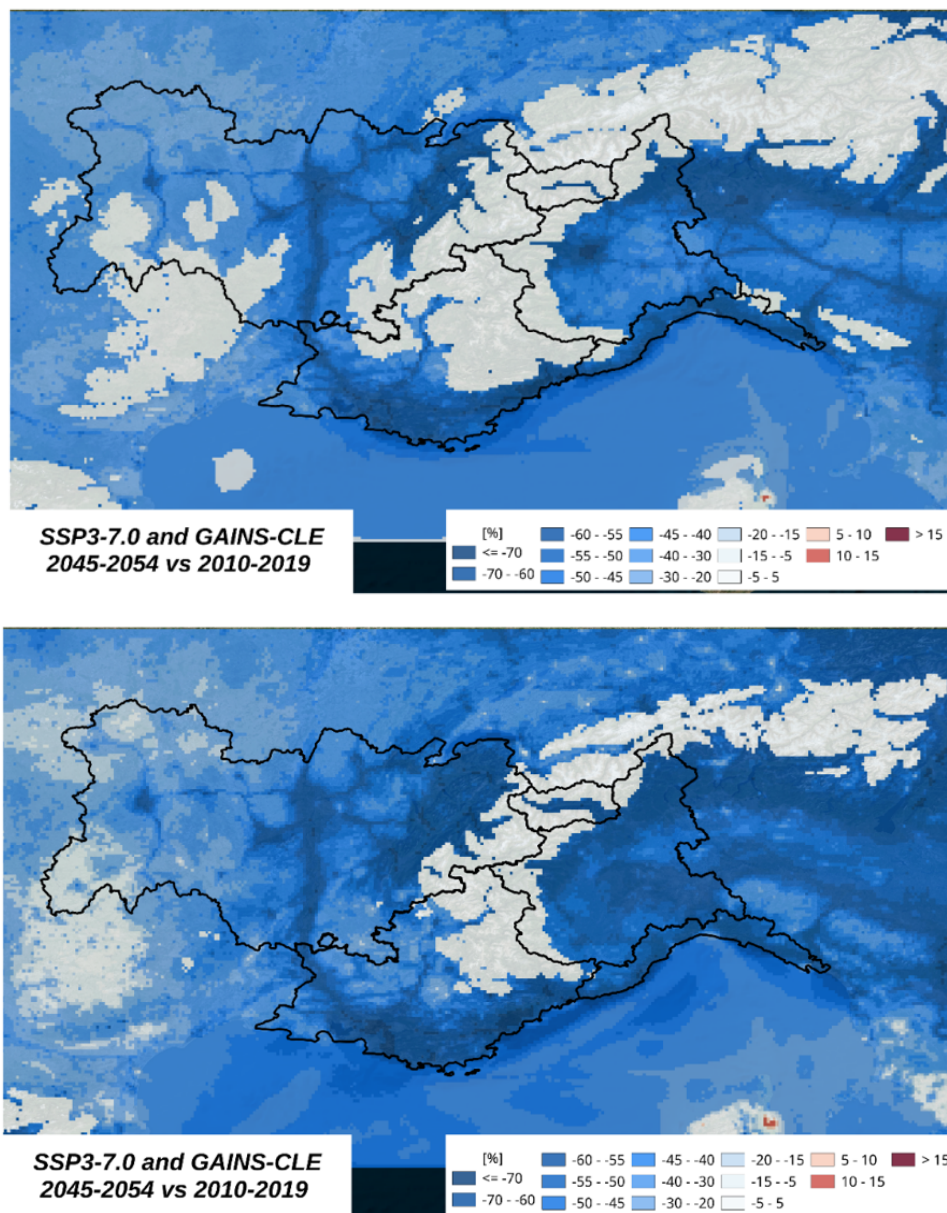


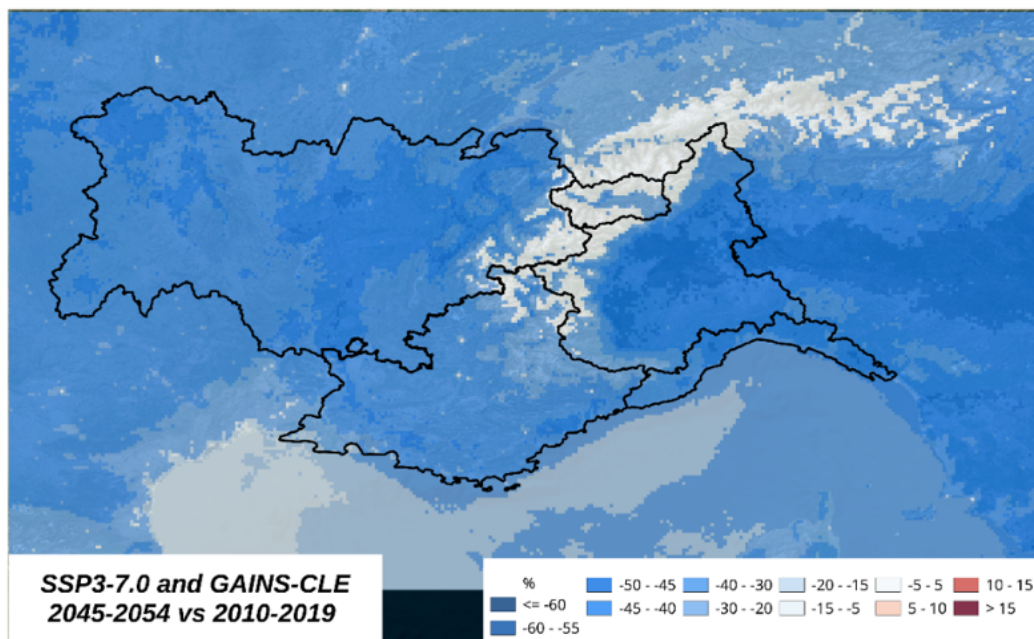
Figura 9 - Biossido di azoto, mappa dell'anomalia del 50° percentile (in alto) e del 90° percentile (in basso) delle medie giornaliere al 2050 rispetto allo scenario di riferimento 2010-2019. Variazioni negative (in scala di blu) indicano concentrazioni al 2050 minori rispetto al periodo di riferimento, viceversa per variazioni positive (in scala di rosso)

L'analisi delle proiezioni nel futuro a medio termine dei dati misurati di biossido di azoto, tuttavia, evidenzia la possibilità che permangano dei giorni con media giornaliera superiore al valore di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, soglia introdotta dalla Direttiva 2024/2881 come nuovo valore limite giornaliero che non deve essere superato per più di 18 giorni per anno civile. In un numero limitato di stazioni urbane il 95° percentile della media giornaliera – corrispondente ai circa 180 giorni con concentrazioni più elevate del decennio - rimane superiore a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Il semplice rispetto della legislazione ambientale già pianificata a livello europeo potrebbe quindi non essere sufficiente a garantire la piena conformità normativa nei contesti più critici al 2050.

Per il particolato — sia nella frazione PM_{10} che in quella più fine $\text{PM}_{2.5}$ - le simulazioni al 2050 mostrano riduzioni generalizzate in tutto il dominio ALCOTRA, apprezzabili nelle zone montane solo per i percentili più alti della distribuzione media giornaliera (75°, 90°, 95°). Le riduzioni sono evidenti in tutte le stagioni, ma risultano più marcate in inverno e in autunno (da settembre a febbraio).

Tuttavia, la proiezione dei dati misurati dalle stazioni di monitoraggio nel periodo 2045-2054 rivela che, anche di fronte a queste riduzioni sostanziali persiste un rischio residuo di superamento dei nuovi limiti giornalieri introdotti dalla Direttiva 2024/2881, in particolar modo per il $\text{PM}_{2.5}$ e, seppure in misura minore, anche per il PM_{10} . Per il PM_{10} , il limite giornaliero è fissato a $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$: il 95° percentile – quindi circa 180 giorni nel decennio - rimane sopra questa soglia in alcune stazioni del Piemonte, mentre per il $\text{PM}_{2.5}$, il limite giornaliero di $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ risulta potenzialmente superato in modo più diffuso: il 90° e il 95° percentile eccedono questa soglia in molte stazioni del Piemonte, e il problema si estende ad alcune stazioni della Liguria e della regione PACA. Questo suggerisce che le misure già pianificate dalla legislazione vigente potrebbero non essere sufficienti a garantire il rispetto dei nuovi standard per il particolato fine in una porzione non trascurabile del territorio transfrontaliero.

50th percentile anomaly of the daily mean PM10



90th percentile anomaly of the daily mean PM10

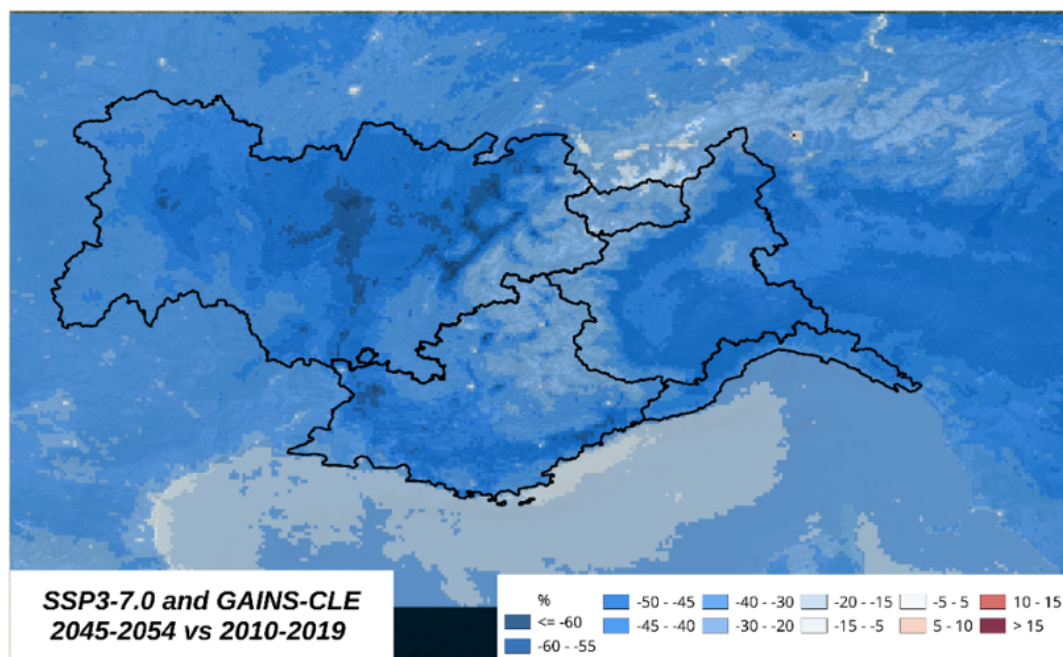


Figura 10 - Particolato PM₁₀, mappa dell'anomalia del 50° percentile (in alto) e del 90° percentile (in basso) delle medie giornaliere al 2050 rispetto allo scenario di riferimento 2010-2019. Variazioni negative (in scala di blu) indicano concentrazioni al 2050 minori rispetto al periodo di riferimento, viceversa per variazioni positive (in scala di rosso)

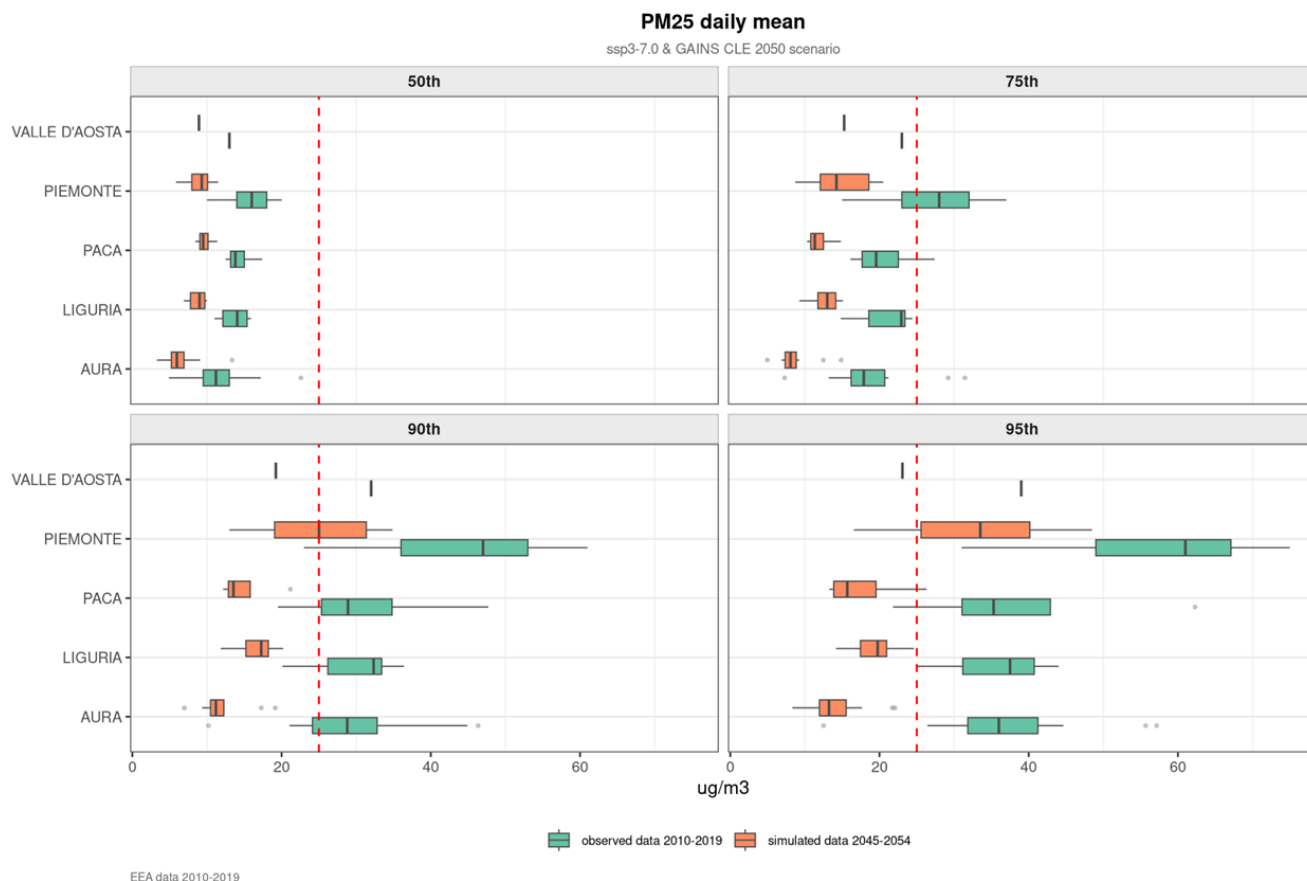


Figura 11 - Particolato PM_{2.5} medie giornaliere, boxplot¹² che mostrano il confronto tra i percentili dei dati misurati nel territorio ALCOTRA nel periodo di riferimento 2010-2019 (verde) e tra i percentili delle serie di misura proiettate nello scenario al 2050 (arancione).

L'ozono è l'inquinante che riserva i risultati più complessi da interpretare. L'analisi mostra per il futuro a medio termine un comportamento non univoco: le concentrazioni mediane (50° percentile) tendono ad aumentare, in particolare nelle aree urbane e soprattutto nei mesi autunnali e invernali, mentre i percentili più elevati mostrano una lieve tendenza alla riduzione, con l'eccezione delle zone montane dove l'aumento persiste in tutte le stagioni, estate compresa. Per interpretare questi risultati occorre tenere a mente che l'ozono troposferico è un inquinante secondario, che non viene emesso direttamente dalle sorgenti ma si forma in atmosfera attraverso reazioni fotochimiche che coinvolgono ossidi di azoto (NO_x) e composti organici volatili. La chimica della formazione di ozono è tale per cui nelle aree fortemente urbanizzate una diminuzione della concentrazione degli ossidi di azoto - attesa al 2050 come visto in precedenza – può favorire un aumento delle

¹² Il boxplot è un grafico che rappresenta la distribuzione di un insieme di dati attraverso cinque statistiche riassuntive: minimo, primo quartile (Q1), mediana, terzo quartile (Q3) e massimo. La "scatola" centrale copre l'intervallo interquartile (IQR = Q3 – Q1), con una linea interna che indica la mediana. I "baffi" si estendono fino ai valori estremi non anomali, mentre i punti oltre i baffi (tipicamente oltre 1,5 × IQR) vengono visualizzati come outlier.

concentrazioni di ozono, mentre il contrario accade nelle aree rurali. Inoltre, l'ozono ha tempi di vita atmosferica lunghi e una forte componente di trasporto a lunga distanza: parte delle sue concentrazioni nel dominio ALCOTRA proviene dall'esterno, attraverso le condizioni al contorno del modello.

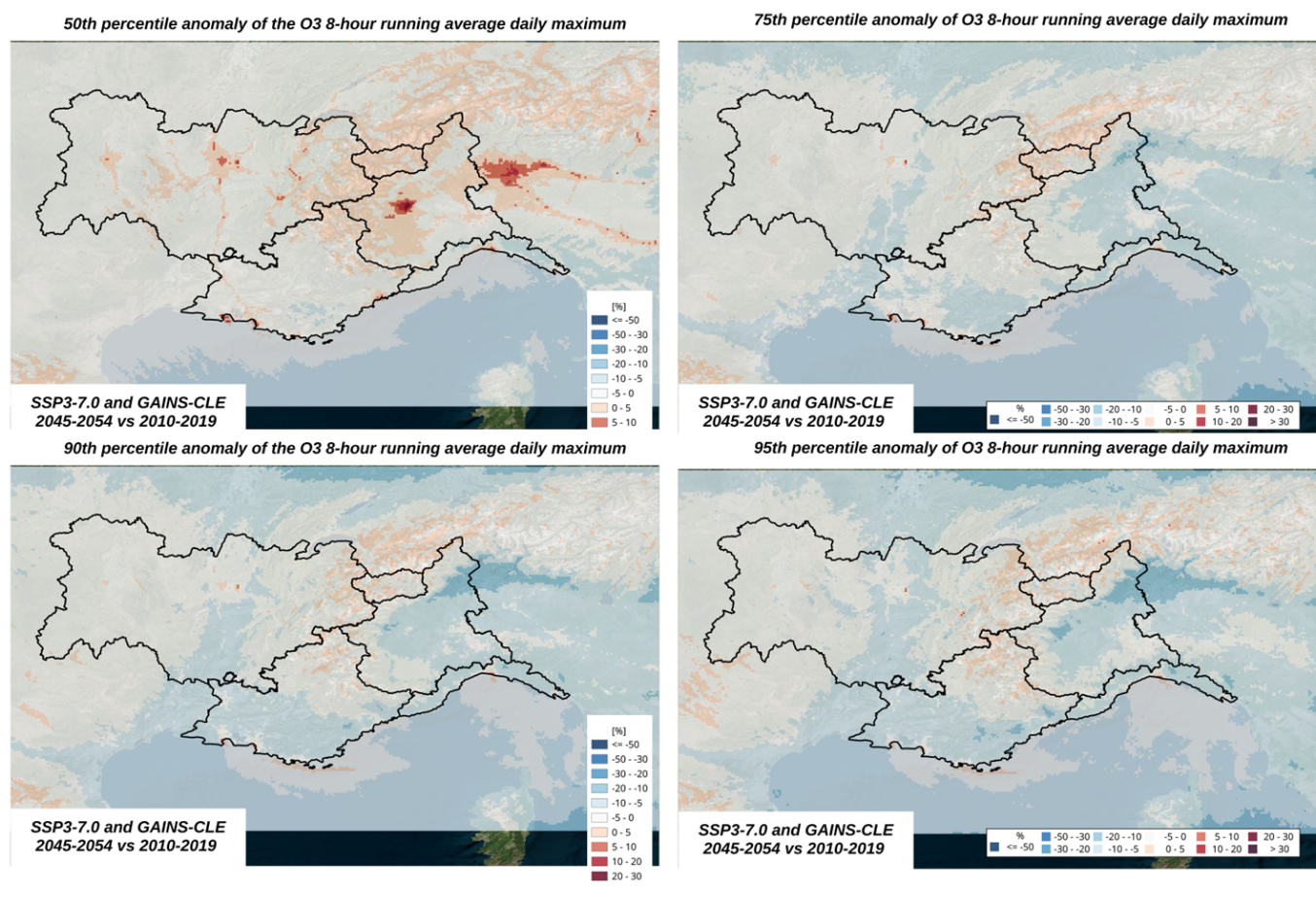


Figura 12 - Ozono, mappa dell'anomalia del 50° (in alto a sinistra), 75° (in alto a destra), 90° (in basso a sinistra), 95° percentile (in basso a destra) del massimo giornaliero della media mobile su otto ore al 2050 rispetto allo scenario di riferimento 2010-2019. Variazioni negative (in scala di blu) indicano concentrazioni al 2050 minori rispetto al periodo di riferimento, viceversa per variazioni positive (in scala di rosso)

Dal punto di vista normativo, la situazione relativa all'ozono è quella che desta maggiore preoccupazione. L'analisi mostra che il 90° e il 95° percentile del massimo giornaliero della media mobile su 8 ore — l'indicatore utilizzato dalla normativa per la protezione della salute umana — risultano superiori al valore di $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in tutte le stazioni di fondo considerate. Questo significa che il valore obiettivo a lungo termine introdotto dalla Direttiva 2024/2881 viene superato in modo diffuso su tutto il territorio, indipendentemente dalla localizzazione geografica. Una situazione che il solo controllo delle emissioni locali non è in grado di risolvere, poiché, come ricordato sopra, l'ozono è fortemente influenzato dal trasporto a lunga distanza e dalle concentrazioni su scala globale.

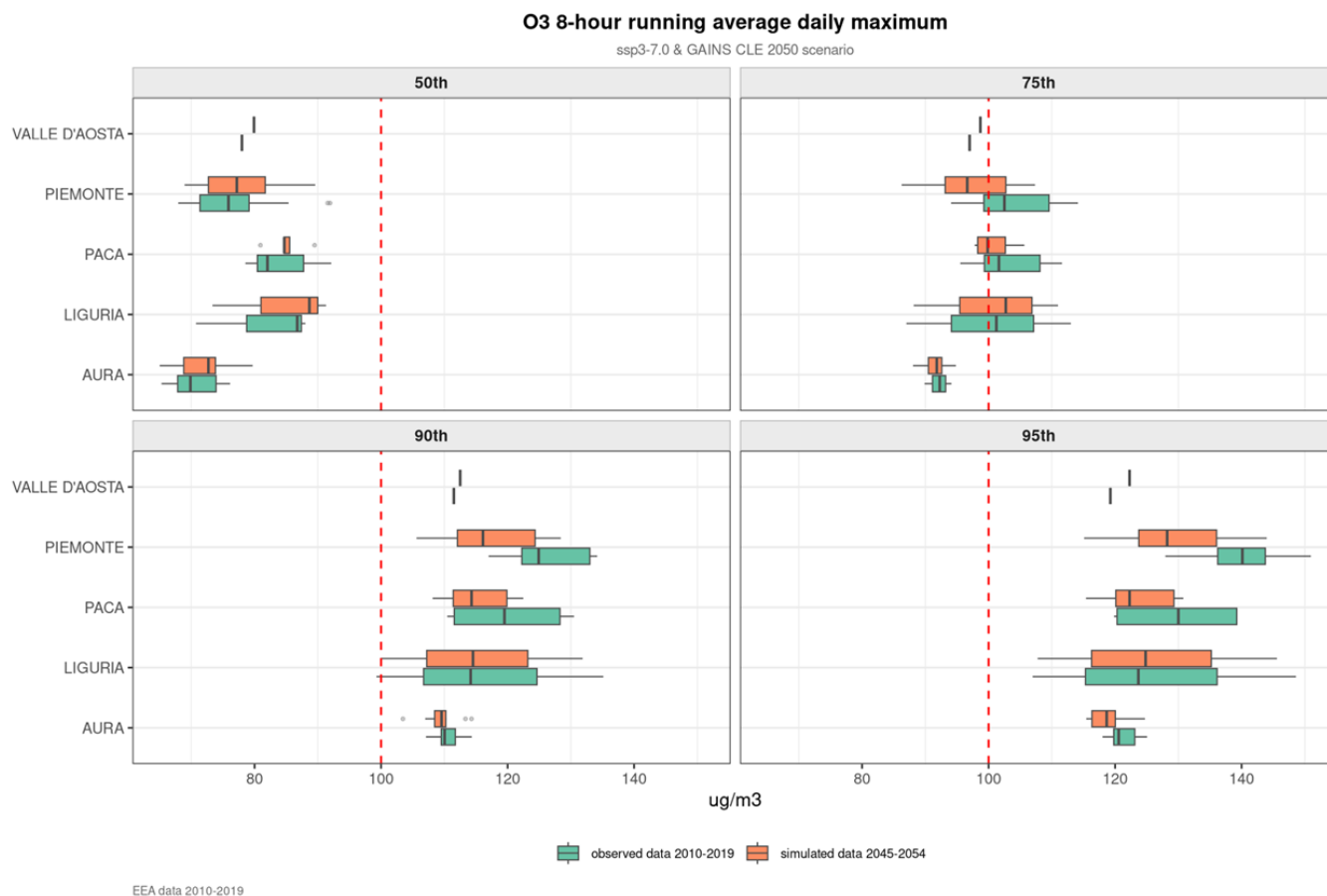


Figura 13 - Ozono, massimo giornaliero della media mobile su otto ore, boxplot¹³ che mostrano il confronto tra i percentili dei dati misurati nel territorio ALCOTRA nel periodo di riferimento 2010-2019 (verde) e tra i percentili delle serie di misura proiettate nello scenario al 2050 (arancione).

¹³ Il boxplot è un grafico che rappresenta la distribuzione di un insieme di dati attraverso cinque statistiche riassuntive: minimo, primo quartile (Q1), mediana, terzo quartile (Q3) e massimo. La "scatola" centrale copre l'intervallo interquartile (IQR = Q3 – Q1), con una linea interna che indica la mediana. I "baffi" si estendono fino ai valori estremi non anomali, mentre i punti oltre i baffi (tipicamente oltre $1,5 \times \text{IQR}$) vengono visualizzati come outlier.

Seguiteci per saperne di più!

Interreg



Cofinancé par
l'Union Européenne
Cofinanziato
dall'Unione Europea

France – Italia ALCOTRA



Sito web di progetto

www.alpaera.eu

Sito web Alcotra

<https://www.interreg-alcotra.eu/it/alpaera-sostegno-alla-governance-dellaria-e-del-clima-nelle-aree-alpine-alcotra>

I nostri profili social

https://www.instagram.com/alpaera_alcotra/

<https://www.linkedin.com/showcase/alp-aera/>

<https://www.facebook.com/share/1BZEf7bHKR/?mibextid=wwXlfr>

www.youtube.com/@AlpAera

Per maggiori informazioni contattare:

ARPA Valle d'Aosta – Vallée d'Aoste

alpaera@arpa.vda.it

