

La qualità dell'aria in Emilia-Romagna

EDIZIONE 2023



La qualità dell'aria in Emilia-Romagna

EDIZIONE 2023

Il presente Rapporto è stato elaborato da Arpae Emilia-Romagna e dalla Regione Emilia-Romagna

RESPONSABILE DI PROGETTO

Arpae Emilia-Romagna

Vanes Poluzzi

Responsabile del Centro Tematico Regionale Qualità dell'aria – Direzione Tecnica

GRUPPO DI COORDINAMENTO

Arpae Emilia-Romagna

Eriberto De' Munari

Direttore Tecnico

Adele Lo Monaco

Responsabile del Servizio Indirizzi tecnici e Reporting ambientale – Direzione Tecnica

Roberto Mallegni

Servizio Indirizzi tecnici e Reporting ambientale – Direzione Tecnica

Regione Emilia-Romagna

Katia Raffaelli

*Responsabile Area Qualità dell'aria e agenti fisici
Direzione Generale Cura del territorio e dell'ambiente*

Lucia Ramponi

*Area Qualità dell'aria e agenti fisici
Direzione Generale Cura del territorio e dell'ambiente*

REDAZIONE, PROGETTAZIONE INFOGRAFICHE E VISUAL DATA

Caterina Nucciotti

*Servizio Indirizzi tecnici e Reporting ambientale – Direzione Tecnica
Arpae Emilia-Romagna*

COORDINAMENTO EDITORIALE

Caterina Nucciotti

*Servizio Indirizzi tecnici e Reporting ambientale – Direzione Tecnica
Arpae Emilia-Romagna*

Claudio Maccone

*Centro Tematico Regionale Qualità dell'aria – Direzione Tecnica
Arpae Emilia-Romagna*

PROGETTO GRAFICO, IMPAGINAZIONE E INFOGRAFICHE

Design People - www.design-people.it

STAMPA

Finito di stampare nel mese di dicembre

2023 presso Pazzini Stampatore

Editore S.r.l. - Villa Verrucchio (RN)

FOTO

**Arpae, freepik.com, pixabay.com,
shutterstock.com, unsplash.com**

ISBN: 978-88-87854-55-8

Autori

ARPAE EMILIA-ROMAGNA

Chiara Agostini

*Direzione Tecnica – Centro Tematico Regionale
Qualità dell'aria*

Cinzia Alessandrini

*Struttura IdroMeteoClima – Servizio
Osservatorio Clima*

Roberta Amorati

Struttura IdroMeteoClima

Dimitri Bacco

*Direzione Tecnica – Centro Tematico Regionale
Qualità dell'aria*

Monica Carati

*Direzione Tecnica – Servizio Indirizzi tecnici
e Reporting ambientale*

Roberta De Nardo

*Direzione Tecnica – Servizio Osservatorio
Energia Rifiuti e Siti contaminati*

Silvia Ferrari

*Direzione Tecnica – Centro Tematico Regionale
Qualità dell'aria*

Simone Giannini

Struttura Tematica Ambiente Prevenzione Salute

Francesca Lussu

*Direzione Tecnica – Servizio Osservatorio Energia
Rifiuti e Siti contaminati*

Simona Maccaferri

*Direzione Tecnica – Centro Tematico Regionale
Qualità dell'aria*

Claudio Maccone

*Direzione Tecnica – Centro Tematico Regionale
Qualità dell'aria*

Roberto Mallegni

*Direzione Tecnica – Servizio Indirizzi tecnici
e Reporting ambientale*

Stefano Marchesi

Struttura Tematica Ambiente Prevenzione Salute

Caterina Nucciotti

*Direzione Tecnica – Servizio Indirizzi tecnici
e Reporting ambientale*

Leonardo Palumbo

*Direzione Tecnica – Servizio Osservatorio
Energia Rifiuti e Siti contaminati*

Federica Parmagnani

Struttura Tematica Ambiente Prevenzione Salute

Valentina Pavan

*Struttura IdroMeteoClima – Servizio
Osservatorio Clima*

Vanes Poluzzi

*Direzione Tecnica – Centro Tematico Regionale
Qualità dell'aria*

Andrea Ranzi

Struttura Tematica Ambiente Prevenzione Salute

Fabiana Scotto

*Direzione Tecnica – Centro Tematico Regionale
Qualità dell'aria*

Michele Stortini

Struttura IdroMeteoClima

Rodica Tomozeiu

*Struttura IdroMeteoClima – Servizio
Osservatorio Clima*

Luca Torreggiani

Area Prevenzione Ambientale Ovest

Arianna Trentini

*Direzione Tecnica – Centro Tematico Regionale
Qualità dell'aria*

Simonetta Tugnoli

*Direzione Tecnica – Servizio Osservatorio Energia
Rifiuti e Siti contaminati*

Monica Vaccari

Struttura Tematica Ambiente Prevenzione Salute

Paolo Veronesi

*Servizio Sistemi informativi e Innovazione
digitale*



REGIONE EMILIA-ROMAGNA

Cecilia Guaitoli

Direzione Generale Cura del territorio
e dell'ambiente – Area Qualità dell'aria e agenti fisici

Gianluca Iannuzzi

Direzione Generale Cura del territorio
e dell'ambiente – Area Qualità dell'aria e agenti fisici

Lucia Ramponi

Direzione Generale Cura del territorio
e dell'ambiente – Area Qualità dell'aria e agenti fisici

*Un ringraziamento particolare
va a tutti gli operatori di Arpae
che, a diverso titolo, hanno contribuito
alla realizzazione del presente report*

Indice

AUTORI	3	SINOSI	12
PRESENTAZIONE	9	APPROFONDIMENTO Inquadramento territoriale	16

1 | Ruolo della meteo-climatologia

PILLOLE "Le interazioni aria-clima"	19	I DATI CLIMATICI	28
INQUINAMENTO ATMOSFERICO E CAMBIAMENTO CLIMATICO	20	GIORNI CRITICI	29
LE INTERAZIONI ARIA-CLIMA	24	Giorni caldi (HD)	29
I cambiamenti climatici e la qualità dell'aria in Emilia-Romagna: il servizio AQCLI	24	Giorni consecutivi senza precipitazioni (CDD)	32
		Giorni con precipitazione (RD)	35
		Descrizione del vento	38

2 | Emissioni in atmosfera

PILLOLE "Dagli inquinanti ai gas serra"	41	Trend temporali dell'inventario delle emissioni di Ispra per COVnm, PM, NO _x , NH ₃ , SO ₂	49
EMISSIONI IN ATMOSFERA	42	Inventario delle emissioni di gas serra 2020	50
Inventario delle emissioni 2019	43	Analisi trend emissivo	57

3 | Zonizzazione, monitoraggio e valutazione

PILLOLE "Conoscere lo stato dell'aria"	59	LE CATENE MODELLISTICHE PER L'ANALISI E LA PREVISIONE	69
LA ZONIZZAZIONE DEL TERRITORIO REGIONALE	60	Le catene modellistiche per l'analisi e la previsione	69
LA RETE DI MONITORAGGIO	62	Il tool RIAT+	72
I laboratori mobili di Arpae	66	APPROFONDIMENTO Il progetto Maia della NASA	75
La "rete ricerca" di monitoraggio	68	APPROFONDIMENTO Le misure di qualità dell'aria con strumenti non convenzionali: smart sensors	76



4 | Inquinanti dell'aria

PILLOLE	
"Lo stato dell'aria"	81
STATO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA	82
APPROFONDIMENTO	
PM ₁₀ : un inquinante primario e secondario	83
I PRICIPALI INQUINANTI DELL'ARIA	84
Particolato atmosferico (PM ₁₀ , PM _{2,5})	84
Ozono (O ₃)	84
APPROFONDIMENTO	
Ozono: un inquinante secondario	85
Biossido di azoto (NO ₂)	86
Monossido di carbonio (CO)	86
Biossido di zolfo (SO ₂)	86
Benzene (C ₆ H ₆)	86
Metalli pesanti	87
Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) e Benzo(a)Pirene (B(a)P)	87
PARTICOLATO ATMOSFERICO	88
Particolato - la normativa di riferimento	88
PM ₁₀ - lo stato e i trend	89
PM _{2,5} - lo stato e i trend	94
Composizione chimica del PM _{2,5} e del PM ₁₀	97
Ripartizione fra le sorgenti (Source apportionment)	100
APPROFONDIMENTO	
La concentrazione numerica e la distribuzione dimensionale delle particelle in atmosfera	108
OZONO	112
Ozono - la normativa di riferimento	112
Ozono - lo stato e i trend	113
BIOSSIDO DI AZOTO	118
Biossido di azoto - la normativa di riferimento	118
Biossido di azoto - lo stato e i trend	119
L'origine geografica dell'inquinamento da biossido d'azoto	122
BENZO(A)PIRENE	123
Benzo(a)Pirene - la normativa di riferimento ...	123
Benzo(a)Pirene - lo stato e i trend	124
ALTRI INQUINANTI	125
Altri inquinanti - la normativa di riferimento ...	125
Altri inquinanti - lo stato e i trend	126
BLACK CARBON	131
AMMONIACA	136
APPROFONDIMENTO	
Effetti delle misure contro la pandemia da Covid19 sulla qualità dell'aria	139



5 | Esposizione e impatto sanitario sulla popolazione

PILLOLE	
"L'aria e l'uomo"	145
RELAZIONE TRA INQUINAMENTO ATMOSFERICO E SALUTE UMANA	146
LE VIE DI ESPOSIZIONE	150
IL RUOLO DELLA RISPOSTA INFIAMMATORIA E DELLO STRESS OSSIDATIVO	152
I NOSTRI STUDI	154
ESPOSIZIONE AL PARTICOLATO, OZONO E BIOSSIDO D'AZOTO	156
IMPATTI SULLA SALUTE	161



6 | Piano aria integrato regionale

CHE COSA STIAMO FACENDO?	166	Ambito urbano e aree di pianura	180
Il Piano Aria Integrato Regionale 2020 (PAIR 2020)	166	Trasporti e mobilità	183
Monitoraggio PAIR 2020	170	Energia e biomasse per il riscaldamento domestico	184
Misure straordinarie PAIR 2020	174	Attività produttive	185
LE STRATEGIE FUTURE	176	Agricoltura	187
Il nuovo Piano Aria Integrato Regionale (PAIR 2030)	176		



Appendice

LA NORMATIVA	190	I DATI	193
Normativa europea	190	I TREND	202
Normativa nazionale	190	BIBLIOGRAFIA	206
Normativa regionale	191		

Presentazione

L'inquinamento atmosferico è riconosciuto dalle massime autorità internazionali come uno dei problemi ambientali più rilevanti a livello globale. Le conoscenze scientifiche sulla qualità dell'aria che respiriamo e sulla loro correlazione con la salute umana sono aumentate nel tempo per cui è cresciuta contestualmente la consapevolezza della necessità di un'azione incisiva per limitare l'esposizione della popolazione agli inquinanti.

Ciò vale in particolare nel Bacino Padano, caratterizzato da condizioni geografiche, orografiche e meteo-climatiche che favoriscono il ristagno al suolo e l'accumulo delle polveri in alte concentrazioni, per lo più durante la stagione invernale. Proprio il Bacino Padano è oggetto della sentenza di condanna della Corte di giustizia dell'Unione europea del 10/11/2020 per il superamento del valore limite giornaliero di PM_{10} . È l'Europa infatti a fissare il contesto di riferimento, attraverso specifiche direttive e una pluralità di programmi: dal "Green deal europeo" al "Fit for 55", senza dimenticare - proprio in tema di inquinamento atmosferico - il piano d'azione "Azzerare l'inquinamento atmosferico, idrico e del suolo", che definisce una visione integrata per il 2050. È inoltre in corso il processo di revisione della Direttiva 2008/50/CE, che ha portato a una proposta legislativa sulla qualità dell'aria con l'aggiornamento dei valori limite dei diversi inquinanti, per armonizzarli a quelli recentemente individuati dalle linee guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità.

Negli ultimi vent'anni la Regione Emilia-Romagna, in stretta collaborazione con Arpa e il mondo scientifico, ha approfondito lo studio delle sorgenti emmissive e dei meccanismi di formazione e accumulo degli inquinanti, così come si è concentrata sullo sviluppo di strumenti di supporto per le previsioni a breve termine e la valutazione delle possibili azioni di miglioramento.

L'attività svolta ha finora permesso di raggiungere risultati importanti, in particolare per la riduzione delle concentrazioni di particolato e biossido di azoto, oltre che di altri inquinanti minori. Il percorso però non è compiuto, tanto resta da fare.

Dalle analisi condotte emerge chiaramente la necessità che gli interventi per migliorare la qualità dell'aria abbraccino in modo unitario e sistemico una pluralità di settori e di attività da cui dipendono le emissioni. Al tempo stesso, è fondamentale adottare un approccio di area vasta nel definire misure e azioni per dare un taglio all'inquinamento atmosferico: l'aria non ha confini, per cui è indispensabile costruire un'azione di squadra tra i diversi territori, unita a una forte integrazione fra i vari livelli di governo, da quello locale a quello nazionale, per garantire un'azione efficace capace di incidere simultaneamente sulle differenti fonti emmissive rilevanti.

Altro aspetto determinante, in un'ottica di co-benefici, è l'integrazione con le politiche per il contrasto al cambiamento climatico, dal momento che le azioni che contribuiscono a migliorare la qualità dell'aria coincidono spesso con quelle per la mitigazione climatica.





In questo quadro si iscrive l'impegno delle Regioni del Bacino Padano, sin dal 2005 impegnate nell'attivare misure coordinate per la qualità dell'aria attraverso la sottoscrizione di specifici accordi e la realizzazione del progetto *Life Prepair*, con misure a supporto dei piani di qualità dell'aria e la costruzione di un'infrastruttura comune di rilevazione e valutazione delle concentrazioni degli inquinanti e delle emissioni.

Nel corso del 2021, per rispondere alla sentenza di condanna UE, tutte le Regioni del Bacino Padano hanno introdotto misure straordinarie per la qualità dell'aria, con l'estensione delle limitazioni anti-smog a tutti i 207 Comuni della pianura emiliano-romagnola.

Attualmente è in corso l'iter verso il **nuovo Piano regionale integrato sulla qualità dell'aria (PAIR 2030)** che ha l'obiettivo di fare rientrare quanto prima l'Emilia-Romagna nei **valori limite** stabiliti dalla normativa vigente.

Sarà approvato nei prossimi mesi e il 2024 sarà l'anno in cui entrerà nel vivo la sua implementazione. Il Piano prevede innanzitutto di continuare sulla strada tracciata, dando seguito ad **alcune azioni già avviate**: si possono citare gli incentivi per sostituire gli impianti di riscaldamento a biomassa legnosa più inquinanti; lo spostamento delle merci da gomma a ferro e la promozione della mobilità dolce e ciclopedonale; l'attivazione di Move-in per offrire eque condizioni di mobilità ai cittadini al di fuori dei periodi emergenziali, applicando però limitazioni chilometriche alla circolazione dei veicoli più inquinanti. Aderendo al progetto, infatti, il titolare del mezzo non è più soggetto alle limitazioni invernali che ora coinvolgono tutti i Comuni della pianura, ma può percorrere un quantitativo massimo di chilometri all'anno, assegnato in base alla tipologia e alla classe ambientale del proprio veicolo. Inoltre, uno stile di guida più sostenibile in area urbana e in autostrada garantisce chilometri aggiuntivi a quelli assegnati.

Grazie alla nuova programmazione comunitaria si proseguirà nell'attuare le misure citate, per ridurre le emissioni di inquinanti primari e dei precursori di quelli secondari. Per la prima volta, infatti, sono a disposizione **risorse certe** per finanziare le azioni del nuovo Pair. Si tratta in primis di **155 milioni di euro regionali** a valere fino al 2030 a cui si aggiungono **circa 14 miliardi di altre risorse**, note al momento. Parliamo di incentivi agli interventi per la ciclopedonalità,



il trasporto merci sostenibile, l'efficienza energetica del riscaldamento domestico e l'ammodernamento del parco impianti domestici a biomassa e la riduzione delle emissioni di ammoniaca dal settore agricolo e zootecnico, senza contare gli altri fondi, derivanti dalla programmazione regionale dei trasporti e dell'energia, dal PR FESR 2021-2027, dalla programmazione di sviluppo rurale e dal PNRR, che potranno più o meno indirettamente partecipare alla riduzione delle emissioni inquinanti con interventi, ad esempio, sull'efficientamento energetico, sul rinnovo dei mezzi per il trasporto pubblico locale, con l'ammodernamento delle aziende agricole e con molto altro ancora

I fondi serviranno anche per accelerare processi innovativi, in grado di portare a un «disaccoppiamento» tra la crescita economica, che dev'essere sempre più sostenibile, e gli impatti sull'ambiente: riduzione delle emissioni, azione integrata sul trasporto di merci e persone (monossido e biossido di azoto), combustione di biomasse (PM₁₀) e agricoltura (ammoniaca).

Per questa ragione il PAIR 2030 concorre a pieno titolo agli obiettivi di transizione ecologica posti sia a livello nazionale che regionale, con il Patto per il Lavoro e per il Clima e con la Strategia regionale Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile.

Questo rapporto "La qualità dell'aria in Emilia-Romagna" – che segue l'ultimo del 2018 – costituisce dunque uno strumento particolarmente utile per rappresentare il quadro della situazione attuale, valutare i risultati raggiunti e gli elementi di criticità che ancora permangono. Tra questi, il superamento in alcune aree del valore limite giornaliero del particolato (PM₁₀), del valore obiettivo dell'ozono (O₃) e, in misura minore, del valore limite annuale del biossido di azoto (NO₂). Il rapporto, quindi, conferma il ruolo fondamentale della conoscenza come base di partenza per l'evoluzione degli strumenti di gestione della qualità dell'aria, perché dalla conoscenza passa la sfida per un'aria più pulita.

Irene Priolo

Vicepresidente - Assessore a Transizione ecologica, contrasto al cambiamento climatico, Ambiente, Difesa del suolo e della costa, Protezione civile della Regione Emilia-Romagna

Il principale obiettivo del nuovo report quinquennale sulla qualità dell'aria nella regione Emilia-Romagna è presentare i risultati ottenuti negli ultimi cinque anni dai **sistemi di monitoraggio ambientale, dalle previsioni e valutazioni della modellistica matematica, dalle stime delle emissioni in atmosfera, dallo studio dell'impatto sulla salute**. Il tutto è stato inquadrato nella cornice del quadro socio-economico attuale e del Piano Aria Integrato della Regione Emilia-Romagna (PAIR 2030), in corso di approvazione.

Il linguaggio scelto in questo report è di tipo tecnico-scientifico anche se non particolarmente specialistico, al fine di garantire una buona diffusione e fruibilità.

I dati presentati si riferiscono in generale all'ultimo quinquennio, dal 2018 al 2022, ma prendono in considerazione, in alcuni casi, anche periodi precedenti al fine di valutare le tendenze temporali.

Le informazioni presentate fanno riferimento alle rilevazioni della qualità dell'aria fornite dalle stazioni fisse della rete di monitoraggio regionale, ma anche all'inventario delle emissioni, alle valutazioni condotte con tecniche di modellizzazione, spazializzazione e di caratterizzazione meteorologica dell'area, oltre che ai risultati di progetti di approfondimento, delle attività di ricerca, sviluppo e innovazione.

Gli inquinanti atmosferici regolamentati dalla normativa e qui discussi sono: il materiale particolato (PM_{10} e $PM_{2,5}$), l'ozono, gli ossidi di azoto, il benzo(a)pirene, il biossido di zolfo, il monossido di carbonio, il benzene, i metalli (Pb, Cd, As, Ni). Oltre a questi sono stati considerati anche altri inquinanti non convenzionali quali: le particelle di aerosol (con dimensioni che vanno da pochi nanometri fino a qualche centinaio di nanometri), il black carbon, l'ammoniaca, la composizione chimica del materiale particolato. Alcuni di questi sono, a tutt'oggi, oggetto di studio: non sono infatti ancora completamente chiare le dinamiche, le interazioni chimiche e più in generale il loro comportamento in atmosfera.

Sulla base di questi dati e sui risultati provenienti da progetti innovativi che sono stati condotti a diverse scale, vengono descritti:

- i metodi su come ripartire le origini delle emissioni, considerando sia le fonti, sia la distribuzione nello spazio;
- i meccanismi di formazione degli inquinanti secondari (che si formano cioè in atmosfera partendo dagli inquinanti primari emessi tal quali dalle specifiche fonti);
- i processi di trasporto e dispersione degli inquinanti, influenzati dalle caratteristiche climatiche ed orografiche della Pianura Padana.

In sintesi, la chiave di lettura del report si può ricondurre al sistema **DPSIR** (Determinanti, Pressioni, Stato, Impatto, Risposta). Partendo dalla comprensione delle condizioni che generano una situazione (**Determinanti**), inserite nel quadro territoriale di riferimento, vengono valutate le **Pressioni** - cioè i flussi di massa emessi -, lo **Stato** cioè

le concentrazioni degli inquinanti generati a causa delle Pressioni, e l'Impatto provocato sulla salute umana, per poi approdare infine alle azioni di Risposta messe in campo dalla governance per migliorare la condizione ambientale mediante la pianificazione regionale.

A inizio report, a seguito di una breve descrizione del quadro territoriale, **viene dato uno spazio importante a una valutazione degli aspetti che legano l'inquinamento atmosferico al clima e alla meteorologia**: sono anche proposti indici e indicatori che potranno essere utilizzati in futuro per descrivere l'andamento di alcuni parametri di qualità dell'aria. Ne è un esempio l'attività che deriva dal progetto Clara, che propone i possibili cambiamenti delle concentrazioni di PM_{10} e Ozono in funzione di quello che potrà essere il clima dei prossimi anni. L'interazione tra climatologia e inquinamento della bassa atmosfera è probabilmente uno degli argomenti più importanti con cui si dovrà fare i conti nei prossimi anni, viste le grandi sinergie tra i composti che contaminano l'aria e il loro impatto sul clima terrestre, e viceversa.

Si vedano al proposito gli elevati valori di *radiative forcing* - il fattore che influenza positivamente o negativamente il bilancio dell'energia in entrata e in uscita dalla Terra - che hanno alcuni inquinanti quali l'aerosol o il metano, e gli impatti che hanno gli stessi sulla salute umana o sulla produzione di altri inquinanti a loro volta coinvolti nell'impatto sanitario.

Proseguendo, **sono descritti gli inventari delle emissioni sia dei gas serra, sia degli inquinanti della qualità dell'aria**. Tali informazioni, disaggregate per macrosettore, mostrano la provenienza dei composti emessi direttamente dalle diverse sorgenti. Risulta evidente il contributo del settore trasporti per quanto riguarda il biossido di azoto, inquinante che ha certamente un impatto sulla qualità dell'aria e sulla salute, così come è chiara la sua influenza nella formazione di particolato secondario. È rilevante anche il contributo dell'ammoniaca, che deriva per oltre il 97% dalle attività in agricoltura o dagli allevamenti e che, pur non essendo esplicitamente normata, ha anch'essa un effetto evidente sulla formazione di particolato secondario, che si genera in atmosfera.

Per quanto riguarda il materiale particolato direttamente emesso, risulta invece dominante il contributo legato alla combustione non industriale, riconducibile principalmente all'utilizzo di legna e suoi derivati. Sono poi palesi i flussi di massa del principale gas serra, il biossido di carbonio, che deriva dai settori dedicati alla produzione e al consumo di energia, così come il metano e i composti organici volatili: questi ultimi, oltre ad avere un impatto importante sul clima, hanno anche una grande influenza nelle reazioni che portano alla formazione dell'ozono e dello smog fotochimico del periodo estivo.

Dall'analisi dei trend temporali delle concentrazioni degli inquinanti atmosferici normati emerge poi un quadro molto interessante e si osserva una situazione diversificata: se si analizza infatti il periodo di tempo che va dal 2013 al 2022 emerge un quadro in cui sia il **biossido di azoto** sia le due frazioni di materiale particolato PM_{10} e $PM_{2,5}$ mostrano una **lieve diminuzione**. Nel caso del biossido di azoto i valori continuano a diminuire fino a portarsi, nel 2022, a rispettare completamente i valori di riferimento normativo in tutte le stazioni di misura della rete regionale. Discorso a parte viene fatto per il periodo di **lockdown del 2020**, quando le concentrazioni sono cambiate molto, soprattutto per il biossido di azoto. L'analisi di questo periodo risulta molto interessante: sebbene infatti si siano osservate sensibili

”

L'inizio del report considera: i legami fra inquinamento atmosferico, clima e meteorologia

”

Le informazioni presenti in questo report derivano da:

- *rilevazioni dalle stazioni fisse*
- *inventario delle emissioni*
- *modelli matematici*
- *progetti di ricerca*

”

Si prosegue con: l'inventario delle emissioni dei gas serra e degli inquinanti atmosferici

”

Vengono poi mostrati: i trend temporali degli inquinanti atmosferici

diminuzioni di **NO₂** - dovute alle importanti riduzioni di flussi di traffico veicolare - le variazioni delle concentrazioni di PM sono risultate invece molto scarse a causa, probabilmente, del maggior uso di riscaldamento domestico a base di legna e derivati, visto l'obbligo di restare chiusi tra le mura domestiche. Questi andamenti sono stati ben supportati anche dall'analisi del **black carbon**, un altro costituente del PM, soprattutto quello delle particelle con dimensioni sub-micrometriche. Proseguendo nell'**analisi dei trend**, ben poco netti sono i segnali relativi all'**ozono troposferico**, che si trova cioè in prossimità della superficie terrestre, per il quale i valori sembrano essere legati, seppure in modo non lineare, agli andamenti delle stagioni estive.

Per fare una sintesi estrema le concentrazioni degli inquinanti dimostrano come, in questo quinquennio, le **criticità** nella regione Emilia-Romagna siano legate solo ai **superamenti del limite giornaliero** di **PM₁₀** e all'**ozono**. Segnali molto incoraggianti si osservano per il biossido di azoto che, come detto, nel 2022 non ha mostrato nessun superamento in nessuna stazione di misura e, sebbene tali indagini necessitino di ulteriori verifiche nei prossimi anni, l'analisi dei trend sembra evidenziare un calo. Tutti gli altri composti, **PM_{2,5}**, **SO₂**, **CO**, **Benzene**, **IPA**, **Metalli (Cd, Ni, As, Pb)** non manifestano invece criticità evidenti e risultano, ormai da diversi anni, **tutti al di sotto dei limiti richiesti dalla normativa**.

Ulteriori inquinanti, in aggiunta a quelli regolamentati dalla normativa, vengono discussi all'interno del report. L'ammoniaca, ad esempio, è una dei **precursori** (in fase gas) che porta alla produzione di particelle solide secondarie e quindi a nuove masse di PM, attraverso le reazioni di salificazione con ioni nitrato, solfato e bisolfato. I valori di ammoniaca che provengono dalle stazioni di misura poste in regione, precisamente a San Pietro Capofiume (Bo) e nell'area a nord di Parma (qui lo strumento è posizionato su un laboratorio mobile che si sposta periodicamente su vari siti delle vicinanze), mostrano valori sensibilmente diversi, arrivando a presentare concentrazioni di circa la metà a San Pietro Capofiume rispetto alle medie osservate nell'area a nord di Parma. Ciò dimostra come vi sia un maggior flusso di massa di ammoniaca emesso nell'area della pianura occidentale della regione Emilia-Romagna: questo andamento converge sia con gli studi delle densità emissive sia con l'analisi dei flussi di massa emessi nelle varie zone della regione.

La **distribuzione dimensionale dell'aerosol sub-micrometrico** (definizione con la quale si intende rappresentare le concentrazioni del numero delle singole particelle con dimensioni da pochi nanometri a valori sub-micrometrici presenti nella massa d'aria) riveste un importante elemento: su esso sarà necessario concentrare forze per lo sviluppo di conoscenza a causa del loro potenziale impatto sulla salute e sul clima. Per queste particelle, che hanno una dimensione di alcuni ordini di grandezza in meno di **PM₁₀** o **PM_{2,5}**, risulta importante studiare la concentrazione in numero, più che la concentrazione in massa. Il numero infatti esprime un indicatore che può dare conto della superficie realmente disponibile per gli scambi che avvengono nelle vie aeree respiratorie o nelle reazioni di nucleazione, condensazione (cioè nei cambiamenti di fase) e quindi sul clima. I composti precursori che portano a tali fenomeni di cambiamento di fase sono ancora oggetto di studi, e rivestono una delle grandi attività di ricerca.

”

*Sono poi studiati:
ulteriori inquinanti non
regolamentati dalla normativa*

Di grandissimo interesse sono anche i dati provenienti dallo studio della composizione chimica della massa di **PM_{2,5} e **PM₁₀****, numeri che costituiscono la base per la realizzazione degli studi denominati di **“source apportionment”**, che permettono cioè l'individuazione delle sorgenti di emissione di inquinanti in atmosfera, mediante metodi statistici quali la Positive Matrix Factorization (**PMF**). Da tali indagini, unite a quanto emerge da altre analisi con modelli fotochimici mediante Brute Force Method, si può dedurre l'origine dell'inquinamento da materiale particolato: i fattori che sembrano contribuire in modo rilevante alle concentrazioni di **PM₁₀** sono certamente la combustione della legna e la combustione di carburanti fossili del traffico veicolare, così come le attività in agricoltura.

Le indagini sugli inquinanti atmosferici hanno fornito la possibilità di effettuare la valutazione dell'impatto sanitario. Nel report sono quindi state analizzate le percentuali di popolazione esposta ai valori osservati di **PM_{2,5}**, **PM₁₀**, **NO₂** e Ozono negli anni. Sono inoltre stati calcolati gli impatti sulla salute in termini di decessi attribuibili all'esposizione a lungo termine a **PM_{2,5}**, **PM₁₀** e **NO₂** su tutta la regione con anche un focus sulle nove città capoluogo.

Da ultimo vengono illustrati gli aspetti legati alla pianificazione regionale, relativamente sia a quel che è stato il Piano Aria Integrato Regionale 2020 sia ai principali ambiti di intervento di quello che è il Piano Aria 2030, in via di approvazione, le cui informazioni tecnico-scientifiche di base sono proprio i dati restituiti in questo volume.

Infine, dall'analisi delle tendenze in atto, dallo studio della letteratura scientifica e dai confronti avuti nei congressi che si sono succeduti in questi ultimi anni, è possibile prevedere quali saranno gli sviluppi e le evoluzioni dei sistemi di controllo della contaminazione dell'atmosfera.

Tre aspetti avranno sempre una maggiore importanza, in particolare:

1. I dati di misurazione provenienti dalle **indagini satellitari**, che avranno sempre una maggior precisione e una più alta capacità di distinguere i singoli composti;
2. I dati provenienti da **“smart sensors”** (strumenti semplificati per il monitoraggio della qualità dell'aria), che diventeranno progressivamente sempre più accurati e quindi utilizzabili in molti più punti spazialmente e temporalmente distribuiti;
3. La **modellistica evoluta** che, incrementando la capacità di risoluzione delle equazioni della chimica e della fisica, (integrandosi anche con sistemi basati su intelligenza artificiale e machine-learning, oltreché con sistemi che avranno la possibilità di collezionare grandi quantità di informazioni da tutte le fonti) genererà le condizioni per lo sviluppo dei **“digital twins”**, ossia la possibilità di riprodurre virtualmente i processi che accadono in atmosfera.

L'integrazione di questi sistemi innovativi con quelli più convenzionali aumenterà notevolmente la capacità di comprendere i meccanismi, le fenomenologie e i processi che avvengono in atmosfera; permetterà inoltre di calcolare gli impatti degli inquinanti in modo sempre più analitico e di migliorare progressivamente i contributi tecnico-scientifici di supporto al governo della qualità dell'aria.

”

*Nel report sono anche presentati:
studi che analizzano la
composizione chimica del Materiale
Particolato (PM)*

”

*Impatto sanitario:
lo studio è stato possibile
grazie alle indagini sugli
inquinanti atmosferici*

”

*Sviluppi:
- immagini satellitari
- smart sensors
- modellistica evoluta*



APPROFONDIMENTO Inquadramento territoriale

La Regione Emilia-Romagna occupa la porzione sud-orientale della Pianura Padana ed è delimitata dal fiume Po a nord, dal Mare Adriatico a est e dalla catena Appenninica a sud. La fascia pianeggiante ha un'altitudine ovunque inferiore ai 100 m, con vaste aree al livello del mare nel settore orientale; le zone montuose sono caratterizzate da numerose piccole valli, che presentano generalmente un andamento parallelo tra loro e perpendicolare alla catena Appenninica.

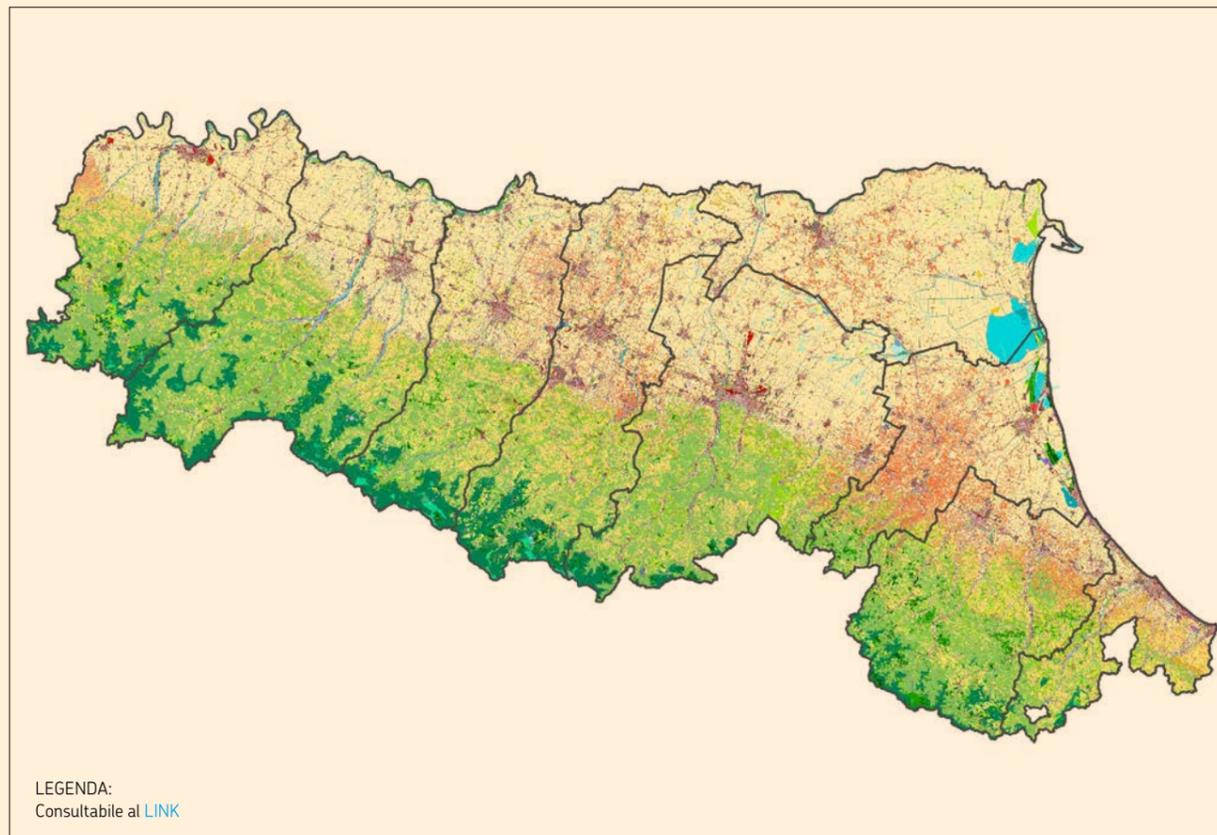
L'Emilia-Romagna è inserita nel Bacino Padano Adriatico, di cui occupa la porzione sud-orientale, caratterizzata dal territorio del bacino idrografico del fiume Po. **Il Bacino Padano è caratterizzato da una fascia pianeggiante, la cui altezza sul livello del mare varia dal valore di 0 metri nei pressi di Ravenna, ai 500 metri nei pressi di Torino.** Il Bacino Padano è separato dall'Europa centrale dalla grande catena montuosa delle Alpi, la quale segna il suo bordo lungo il versante ovest, nord e nord-est, è bagnato dal mar Mediterraneo (specificatamente il mare Adriatico) lungo l'angolo sud-orientale ed è chiuso a sud dalla catena appenninica, il cui tratto settentrionale presenta una elevazione media di circa 1000 metri. In generale, quindi, **chiuso dalle montagne su tre lati**, il Bacino Padano

rappresenta, dal punto di vista della qualità dell'aria, una sorta di **recipiente nel quale le emissioni di inquinanti si distribuiscono, ma faticano a disperdersi.** Tali caratteristiche orografiche determinano infatti condizioni meteorologiche sfavorevoli alla dispersione.

Le regioni che compongono il Bacino Padano sono fortemente antropizzate, con gli oltre 23 milioni di abitanti (dei quali circa 4,5 milioni residenti in Emilia-Romagna), corrispondenti a circa il 40% del totale della popolazione italiana. La grande maggioranza della popolazione si concentra nelle aree di pianura, dove la densità abitativa, di oltre 1500 ab/km², che sale a oltre 3600 per l'area di Milano, risulta essere tra le più alte d'Europa. La percentuale di consumo di suolo (quantificazione della perdita di suolo a seguito dell'occupazione di superficie agricola, naturale o seminaturale) nel 2019 ha superato anche il 12% in Lombardia. Lungo le principali vie di comunicazione, città e insediamenti produttivi si susseguono senza soluzione di continuità, mentre il resto del territorio è quasi completamente occupato da agricoltura e allevamento intensivi. La Pianura Padana contribuisce in maniera significativa alla produzione di ricchezza del Paese (oltre il 50% del PIL nazionale); il suo tessuto produttivo



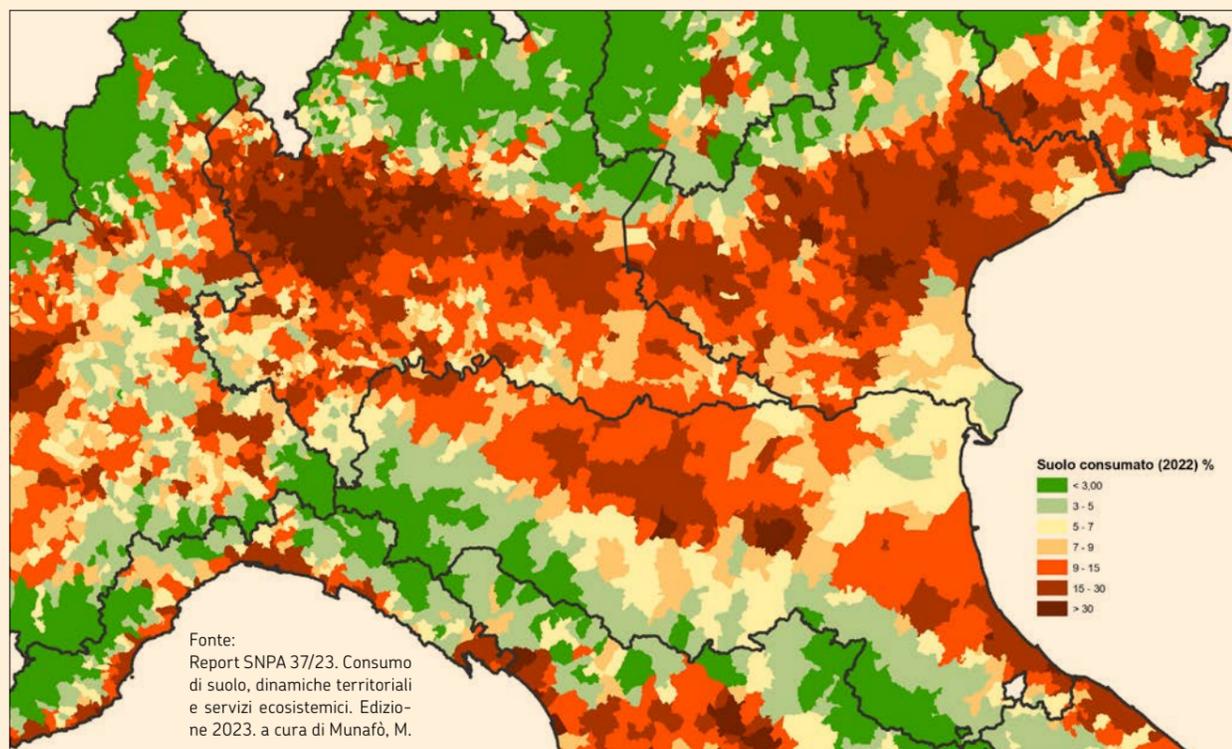
Usa del suolo in Emilia-Romagna, anno 2020



Fonte: Geoportale Regione Emilia-Romagna, aggiornamento anno 2020



Consumo del suolo nella Pianura Padana, anno 2022



è molto variegato e tende a essere basato su piccole e medie imprese distribuite sul territorio.

Questo quadro socio-economico e l'intensità delle attività antropiche che insistono nell'area comportano un'elevata concentrazione di fonti di emissioni di inquinanti. L'urbanizzazione diffusa e il particolare modello di sviluppo economico determinano una grande necessità di mobilità, che si riflette nelle emissioni inquinanti dovute al traffico veicolare e agli impianti di riscaldamento. I processi industriali, pur essendo sottoposti a rigide normative ambientali, comportano l'emissione in atmosfera di una grande varietà di composti chimici. Anche l'agricoltura e l'allevamento contribuiscono all'inquinamento atmosferico attraverso l'emissione di rilevanti quantità di ammoniaca e metano, che sono rispettivamente un precursore degli inquinanti secondari e un potente gas serra.

L'Emilia-Romagna è profondamente inserita in questo contesto sociale e produttivo. La grande maggioranza della popolazione si concentra nelle aree di pianura, dove la densità abitativa (201.9 ab/km², al 2019) risulta essere tra le più alte d'Europa, raggiungendo i valori massimi nelle zone urbane con oltre 2.700 ab/km² a Bologna e Cattolica (RN), e valori minimi nelle aree appenniniche (meno di 10 ab/km²). La percentuale di consumo del suolo è pari a circa il 9%. La regione è un elemento centrale del sistema di mobilità nazionale, sia per quel che riguarda la rete autostradale, sia per il trasporto

ferroviario; il nodo di Bologna, in particolare, è di primaria importanza, in quanto rappresenta un passaggio quasi obbligato per merci e passeggeri in viaggio tra il nord e il sud dell'Italia. Da qui si dipartono a raggiera le autostrade A1 Milano-Napoli, la A13 Bologna-Padova e la A14 Bologna-Taranto; gli altri tronchi che interessano la regione sono la A15 della Cisa, la A21 Torino-Brescia e la A22 del Brennero. L'Emilia-Romagna assume quindi un ruolo di cerniera fra il nord e il sud della nazione e per tale ragione risulta interessata da un intenso traffico in transito: questo produce una quota rilevante delle emissioni di inquinanti, che in gran parte sfugge alle possibilità di gestione delle autorità locali. Le industrie regionali sono prevalentemente di piccole e medie dimensioni, spesso raggruppate in distretti produttivi, caratterizzati da un'elevata specializzazione: esempi di questa particolare organizzazione produttiva sono la produzione di ceramiche da arredamento e materiali da costruzione intorno a Modena, l'industria alimentare a Parma, la chimica di base a Ferrara e Ravenna, l'industria energetica a Piacenza e Ravenna. La parte pianeggiante dell'Emilia-Romagna presenta suoli estremamente fertili, che sono ampiamente sfruttati per l'agricoltura intensiva. L'allevamento è praticato su scala e con processi industriali e si concentra nei poli di Modena e Reggio, per il settore suinicolo, e di Forlì-Cesena, per quello avicolo.

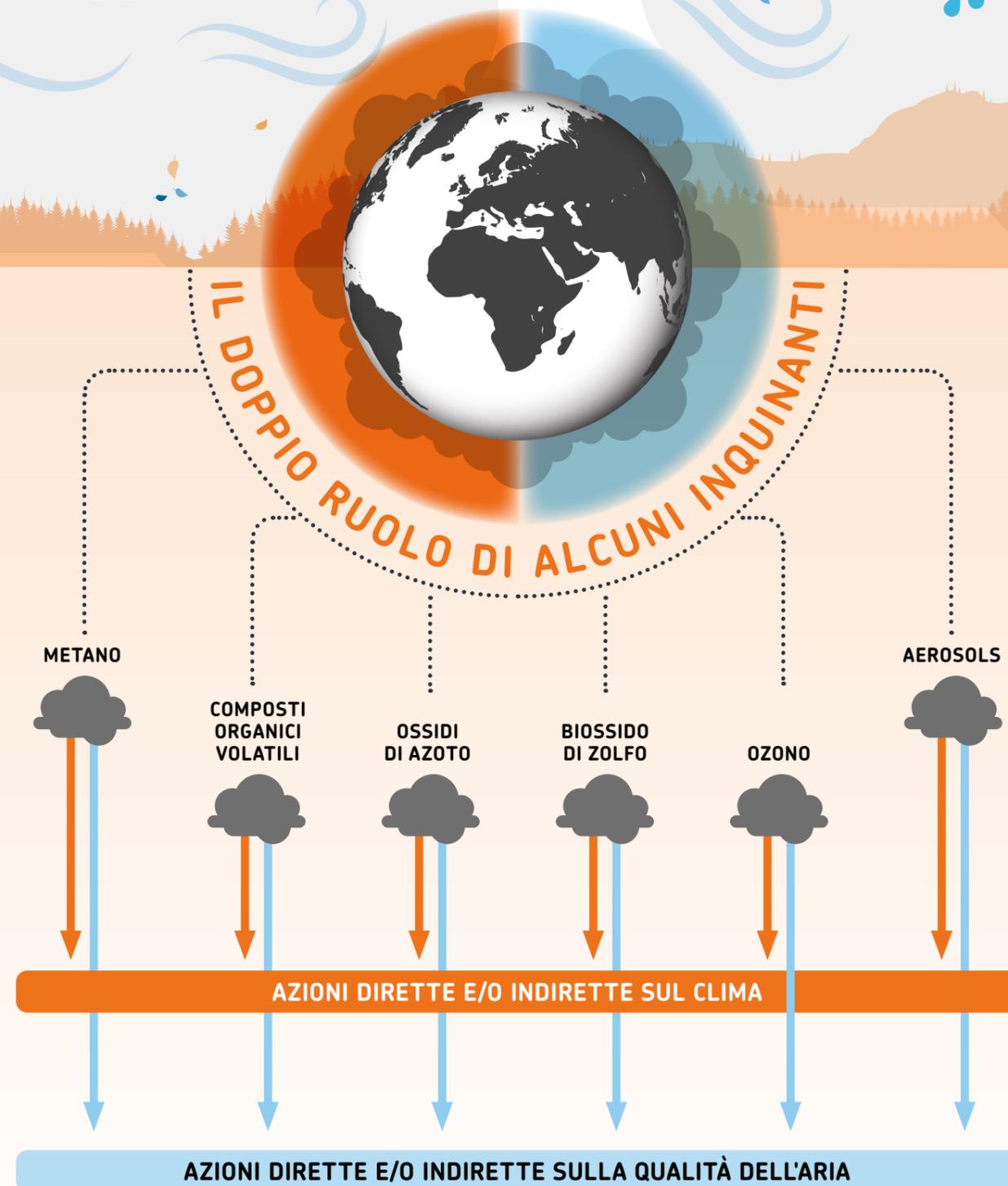
1

Ruolo della meteo-climatologia



Pillole | “Le interazioni aria-clima”

CONDIZIONI METEOCLIMATOLOGICHE possono mitigare o aggravare gli effetti degli inquinanti emessi



Inquinamento atmosferico e cambiamento climatico

Nello studio dell'inquinamento dell'atmosfera e dei parametri climatici - e di come questi stanno cambiando nel tempo - è necessario considerare che tra le due tematiche vi sono molte interazioni, numerose influenze reciproche. Sebbene l'argomento fosse già noto ben prima, nel 2009 l'agenzia per l'ambiente svedese lo ha reso ancor più esplicito chiedendosi se i due temi non fossero che facce della stessa medaglia. Risposte alla domanda sono arrivate - e continuano ad arrivare - attraverso i cospicui quantitativi di articoli scientifici in cui i due aspetti sono studiati in modo congiunto e dai vari punti di vista. **I risultati dei lavori pubblicati evidenziano come i principali inquinanti della bassa troposfera influenzino anche il clima, e come il clima possa condizionare i meccanismi che portano a un cambiamento continuo della composizione dell'atmosfera - attraverso le reazioni e le dinamiche che in questa avvengono.** L'interazione aria-clima è, a oggi, una delle più importanti questioni ambientali sia dal punto di vista della comunità scientifica, sia per le sue implicazioni nelle politiche di gestione, tale da essere spesso oggetto di dibattiti e di ampio coinvolgimento di cittadini, scienziati e amministratori dei territori.

Che quindi gli inquinanti dell'atmosfera e i cambiamenti del clima debbano essere considerati in modo congiunto è ormai condiviso e, sebbene i gas serra come il metano o l'anidride carbonica non siano esplicitamente considerati nella valutazione della qualità dell'aria - e non sono oggetto di limiti normativi - è opportuno osservare che, **frequentemente, molte sorgenti hanno la peculiarità di emettere sia composti di questo tipo, che impattano cioè direttamente sul clima, sia composti che provocano inquinamento dell'aria.** È il caso dell'utilizzo dei combustibili fossili nella produzione di energia per i diversi scopi, dove le emissioni di inquinanti dell'aria come il materiale particolato, gli ossidi di azoto e di zolfo o i composti organici di varia natura si associano a emissioni di gas climalteranti. È necessario però considerare che le definizioni "inquinanti climalteranti" e "inquinanti dell'aria", sono ormai retaggio di un lessico ben poco aggiornato, e spesso le due si sovrappongono, diventando in alcuni casi sinonimi. In diverse emissioni di tipo antropogenico si possono infatti trovare composti o elementi che hanno effetti sia sui parametri del clima sia sull'inquinamento dell'aria, di seguito se ne riportano alcuni esempi:

- **il metano e l'insieme dei composti organici volatili**, i quali sono considerabili, oltre che gas serra, precursori dell'ozono troposferico a causa delle reazioni catalizzate dalla radiazione solare in cui sono coinvolti assieme all'ossigeno atmosferico;
- **gli ossidi di azoto**, che hanno effetti diretti sulla salute e sono oggetto di limiti normativi per la qualità dell'aria, e che concorrono anche nelle reazioni che portano alla produzione di ozono troposferico e di materiale particolato;
- **il black carbon o carbonio elementale**, importante componente del particolato atmosferico, che è considerato sia per il suo impatto sulla salute sia per il suo effetto riscaldante dell'atmosfera;



Gli inquinanti emessi nella bassa troposfera: influenzano il clima, che a sua volta condiziona i meccanismi delle dinamiche delle reazioni che avvengono



Molte sorgenti: emettono composti che possono impattare sia sul clima sia sulla qualità dell'aria

- **il biossido di zolfo**, che ha un impatto sulla salute ed è quindi inserito nelle specie da monitorare dall'attuale normativa della qualità dell'aria, e che concorre anche come possibile precursore del materiale particolato;
- **l'ozono**, composto secondario - non quindi emesso direttamente - che si forma solo in atmosfera attraverso una serie di reazioni che coinvolgono gli ossidi di azoto e i composti organici volatili, che ha un impatto sia sulla salute, ed è per questo oggetto di richieste normative per la qualità dell'aria, sia sul clima con un effetto riscaldante.

Oltre i composti di cui sopra un discorso dettagliato deve essere fatto per il **materiale particolato** (PM_x), che costituisce le fasi solide e liquide dell'aerosol atmosferico. Può essere di **origine primaria**, cioè emesso direttamente:

- da combustioni di gasolio, carbone, legna e/o suoi derivati, dall'usura di freni, pneumatici, dall'erosione del manto stradale, da emissioni di alcuni cicli produttivi nell'industria, da alcune attività in agricoltura, dai suoli, dagli oceani e dalle erosioni vulcaniche;

o di **origine secondaria** per formazione e/o trasformazione chimico-fisica in atmosfera:

- a causa delle reazioni in cui sono coinvolti composti a base di azoto ossidato e/o ridotto, zolfo ossidato, composti del carbonio in diverse forme, e anioni e cationi di origine antropica e/o naturale. In presenza di tali tipologie di composti e di determinati valori di temperatura, pressione, umidità relativa e radiazione solare, si possono generare le condizioni affinché alcune reazioni - in cui avvengono sia la formazione di nuovi composti sia le transizioni di fase - mostrino variazioni di energia libera negative, procedendo quindi verso la formazione di nuovo materiale particolato. A questi processi si devono inoltre aggiungere le trasformazioni di fase, da gas a liquida e/o solida attraverso i fenomeni di nucleazione e/o condensazione. Infine, anche i meccanismi riguardanti la clusterizzazione e la coalescenza sono processi da tenere in considerazione, in quanto possono portare alla formazione di nuovo particolato con dimensioni diverse da quello pre-esistente.

Considerato quindi l'insieme dei composti di cui può essere costituito l'aerosol atmosferico, il suo impatto, sulla qualità dell'aria e/o sul clima, sarà differenziato in funzione della sua dimensione e composizione chimica. Così, per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico, essendo la **concentrazione in massa del particolato ben correlata ad alcune patologie e alla mortalità per diverse cause**, questa viene richiesta come parametro da monitorare dall'attuale normativa per la qualità dell'aria, sebbene i suoi componenti sembrano avere pesi diversi su tali impatti. L'epidemiologia mostra infatti segnali che vanno nella direzione di considerare, oltre le concentrazioni in massa, anche le concentrazioni numeriche delle diverse frazioni dimensionali, così come la loro composizione chimica, **suggerendo quindi approcci multi-inquinanti**. Proposte che trovano forti analogie per i parametri climatici dove, anche per questi, sono ormai noti ed evidenti i diversi impatti che le varie specie presenti nell'aerosol atmosferico possono determinare.

Un **parametro importante per una valutazione sull'effetto del clima di ogni componente atmosferico** sia in fase gas sia nelle fasi liquida e solida, è il **"Radiative Forcing"** (RF), una misura del bilancio



Il Radiative Forcing: parametro che valuta l'effetto di ogni componente atmosferico sul clima

in entrata e in uscita del contenuto energetico nel sistema Atmosfera-Terra. Espresso in Wm^{-2} è un indicatore che, semplificando i concetti che ci sono alla base, mostra quanto un determinato componente può aumentare o diminuire il meccanismo dei cambiamenti climatici: un RF complessivo positivo porta a un riscaldamento mentre un RF negativo porta a un raffreddamento.

Con questo approccio è possibile valutare quindi il contributo derivante dai singoli composti al riscaldamento terrestre: come si evidenzia dalla **figura 1**, tratta da IPCC e riferita al 2011 rispetto al 1750, la CO_2 ha il peso certamente maggiore, seguita dal metano, idrocarburi alogenati e protossido di azoto, mentre la barra d'incertezza relativa al comportamento degli aerosol è ancora molto elevata a causa della incompleta conoscenza del loro comportamento. Ulteriori ricerche in questo senso saranno quindi necessarie per poter disegnare strategie d'intervento sempre più mirate alla protezione dell'atmosfera nel suo complesso, considerando congiuntamente gli aspetti dei cambiamenti climatici e della qualità dell'aria al fine di essere estremamente efficienti, anche in considerazione delle rilevanti risorse economiche che sarà indispensabile mettere a disposizione.

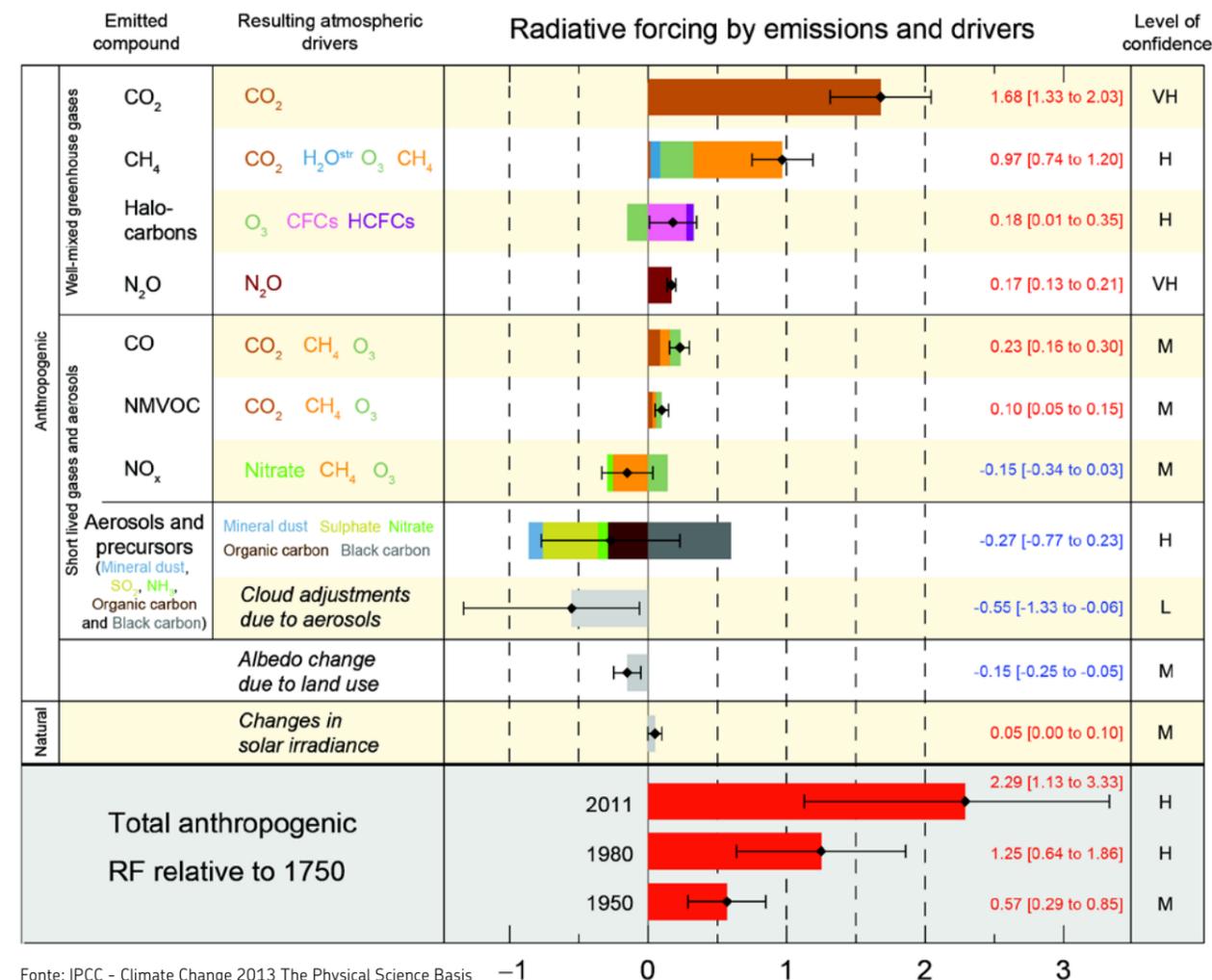
In sintesi quindi, questi pochi esempi, benché non esaustivi della tipologia di inquinanti che hanno le caratteristiche di influenzare sia i parametri climatici sia l'inquinamento atmosferico, così come le pubblicazioni scientifiche degli ultimi anni, dimostrano inequivocabilmente **l'importanza di disegnare azioni e strategie di intervento che tengano conto di tutte le caratteristiche dei composti emessi in atmosfera**, con un'ottica diretta alle valutazioni delle interazioni aria-clima.

Anche il presente report sulla Qualità dell'aria in Emilia-Romagna va nella direzione di integrare le tematiche dell'inquinamento atmosferico con quelle legate alla meteo-climatologia con la proposta di possibili nuovi indicatori da utilizzarsi per l'analisi delle loro interazioni.



Per valutare le interazioni aria-clima: è importante disegnare strategie di intervento che tengano conto delle diverse caratteristiche dei composti emessi in atmosfera

FIGURA 1
Radiative Forcing (RF) del 2011 rispetto l'anno 1750 ($W m^{-2}$)



Fonte: IPCC - Climate Change 2013 The Physical Science Basis

Le interazioni aria-clima

I cambiamenti climatici e la qualità dell'aria in Emilia-Romagna: il servizio AQCLI

Data la rilevanza crescente del tema cambiamenti climatici e la necessità di estendere le analisi del suo impatto a tutte le programmazioni regionali, sono stati analizzati i risultati preliminari di uno studio pilota sull'influenza dello scenario climatico futuro sul raggiungimento degli obiettivi di qualità dell'aria.

Nell'ambito del progetto Horizon 2020 CLARA (Climate forecast enabled knowledge services) Arpae ha realizzato il **servizio climatico** relativo alla qualità dell'aria **AQCLI** (Air Quality in future CLimate) **che ha lo scopo di fornire una stima dell'impatto di scenari di clima futuro sulla qualità dell'aria nell'ipotesi che non venga modificato lo scenario emissivo.**

L'area di riferimento è centrata sull'agglomerato urbano di Bologna per un'estensione di 150 km² e comprende i capoluoghi di provincia di Modena, Ferrara, Reggio-Emilia e Parma, rappresentativi delle condizioni urbane.

Il servizio si sviluppa a partire da un dataset di variabili meteorologiche orarie a 1 km di risoluzione in uno scenario di clima presente e futuro, disponibile nell'ambito del progetto CLARA e realizzato precedentemente nell'ambito del progetto Urban-SIS. Durante il progetto Urban-SIS è stato sviluppato un servizio di fornitura di variabili climatologiche essenziali ad alta risoluzione spaziale e temporale per tre aree urbane europee, tra cui Bologna. Il modello dinamico di downscaling usato in Urban-SIS è stato concepito per contribuire alla progettazione urbana a lungo termine e non si propone come previsione meteorologica per la gestione di emergenze giorno per giorno.

Il progetto ha realizzato il *downscaling* di un modello climatico a scala continentale per due periodi di 5 anni rappresentativi del clima presente (1980-2010) e futuro (2030-2065), utilizzati per stimare cambiamenti futuri a scala urbana. Gli anni di riferimento sono stati selezionati per comprendere le possibili combinazioni di anni secchi/umidi, caldi/freddi o "normali": Normale (N), Caldo Secco (CS), Caldo Umido (CU), Freddo Secco (FS), Freddo Umido (FU). Per la selezione degli anni di riferimento ciascun anno all'interno dei due periodi di 30-35 anni di clima presente e futuro è confrontato con gli altri, utilizzando indicatori di eventi estremi. Per la temperatura ciò può comprendere giorni con temperature estreme o ondate di calore di lunga durata, per la precipitazione possono essere considerati eventi di lunga (o corta durata) insieme ai quantitativi caduti. La spiegazione di come è stato prodotto il dataset e di come sono stati selezionati gli anni rappresentativi è presentata nel report di progetto e nell'articolo "Towards climate services for European cities: Lessons learnt from the Copernicus project Urban SIS", Gidhagen et al., Urban Climate, 2020.



AQCLI: sistema che stima gli impatti del clima futuro sulla qualità dell'aria in assenza di modifiche dello scenario emissivo

Il dataset ottenuto dal progetto Urban-SIS comprende tutte le variabili meteorologiche necessarie per la stima dei giorni meteorologicamente critici per l'accumulo e la formazione degli inquinanti, stima applicata per la valutazione annuale di qualità dell'aria in Emilia-Romagna.

Lo studio sviluppato nell'ambito del servizio AQCLI si propone di **valutare la variazione del numero di giorni favorevoli alla formazione di ozono e all'accumulo di PM₁₀ nello scenario di clima futuro rispetto allo scenario presente.** Le analisi sono condotte a livello di comune e sono tanto più rappresentative quanto più grande è il territorio considerato. In **figura 2 e 3** viene riportato per il comune di Bologna l'andamento per gli anni di riferimento del numero di giorni favorevoli all'accumulo di PM₁₀ e alla formazione di ozono, dove tutti i valori all'interno di un comune sono espressi come distribuzione in forma di boxplot.



AQCLI: permette di valutare la variazione del numero di giorni favorevoli alla formazione di ozono e all'accumulo di PM₁₀ in uno scenario futuro

FIGURA 2 Variazione del numero di giorni all'anno favorevoli all'accumulo di PM₁₀ negli scenari "Presente" e "Futuro" per il comune di Bologna

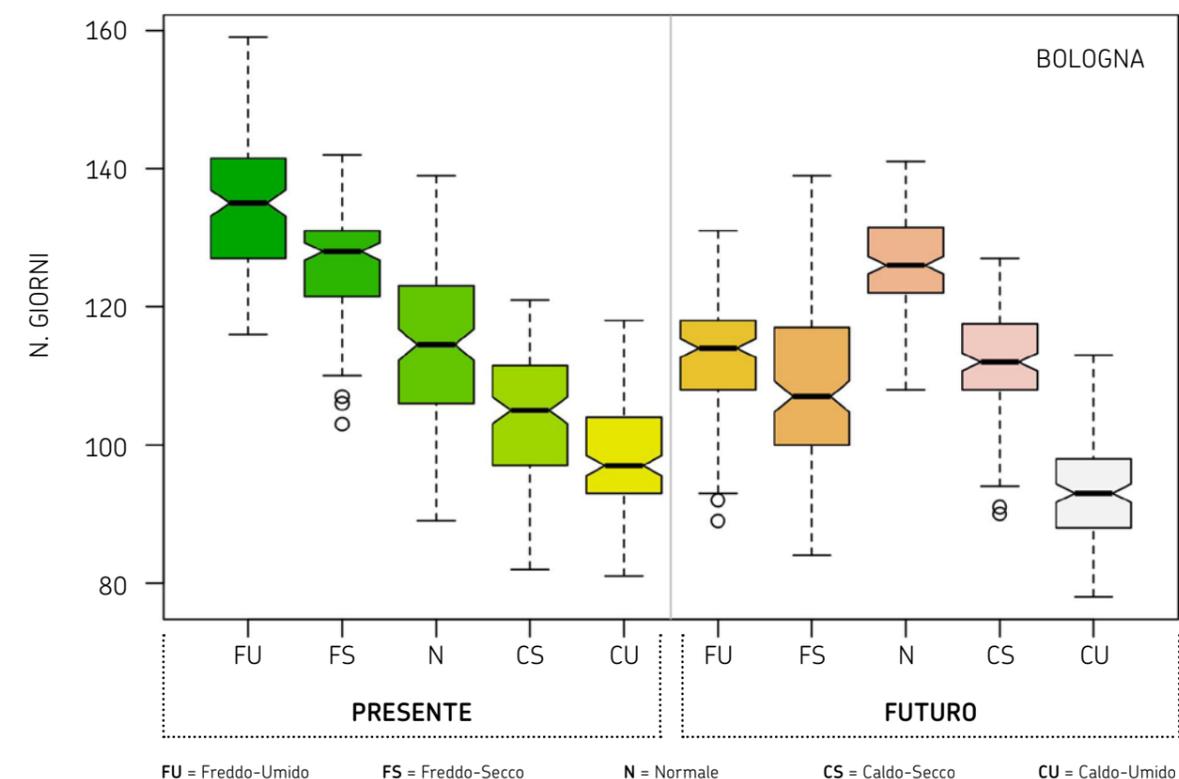


FIGURA 3
Variazione del numero di giorni all'anno favorevoli alla formazione di ozono negli scenari "Presente" e "Futuro" per il comune di Bologna

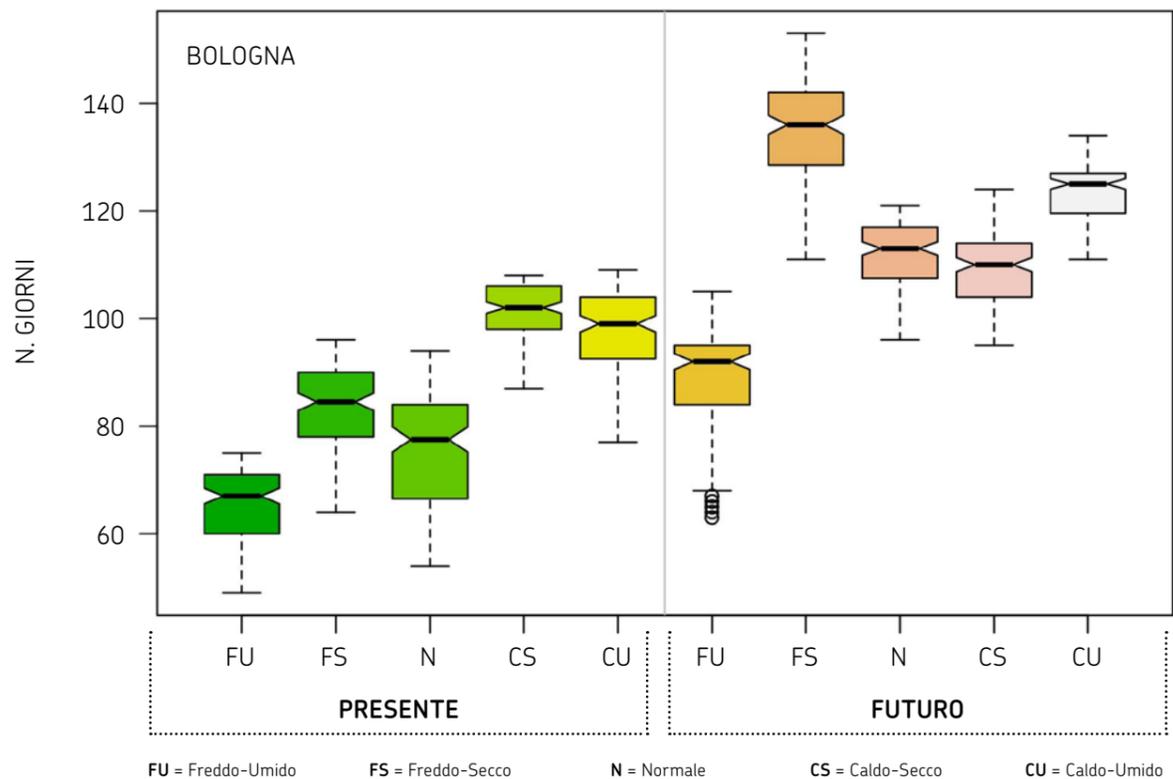


TABELLA 1
Differenza percentuale fra le mediane della distribuzione dei giorni favorevoli all'accumulo di inquinanti in anni dello stesso tipo

ANNO TIPO PRESENTE E FUTURO	OZONO		PM ₁₀	
	BOLOGNA	MODENA	BOLOGNA	MODENA
FREDDO UMIDO	+37	+50	-16	-22
FREDDO SECCO	+30	+43	-12	-7
NORMALE	+46	+56	+10	+0
CALDO SECCO	+33	+30	+2	+3
CALDO UMIDO	+26	+26	-4	-12

Allo scopo di valutare la variazione del numero di giorni favorevoli all'accumulo di PM₁₀ e alla formazione di ozono, e quindi di possibili superamenti delle soglie dei valori limiti, è stata condotta un'analisi di dettaglio sui comuni di Modena e Bologna.

La mediana della distribuzione dei giorni favorevoli viene assunta come valore di riferimento negli anni considerati, accoppiati per tipo (ad es. Caldo Secco), uno dello scenario presente e uno dello scenario futuro. Dopo avere verificato che le distribuzioni siano significativamente diverse (Wilcoxon test), viene calcolata la differenza percentuale fra le mediane. I risultati sono riportati in **tabella 1**. Dove la variazione è positiva si ha un aumento del numero di giorni di possibile superamento dei valori limite.

L'analisi condotta nell'ambito del progetto CLARA durante la realizzazione del servizio AQCLI mostra che non è possibile affermare con certezza che la meteorologia in un clima futuro favorirà il raggiungimento degli obiettivi di qualità dell'aria. Per quanto concerne l'ozono, la cui concentrazione, in riferimento a questa analisi, è strettamente correlata alla temperatura, le condizioni di clima futuro sembrano non essere favorevoli al raggiungimento degli obiettivi.

Per il PM₁₀ si evidenzia una variabilità percentuale minore rispetto alla variabilità dell'ozono e di segno non ben definito.



È stato condotto uno studio a Modena e Bologna: per valutare come cambiano i giorni favorevoli all'accumulo di PM₁₀ e alla formazione di Ozono

I dati climatici

Nel presente rapporto, come negli altri rapporti e bollettini climatici di Arpae-Simc (disponibili on-line sul sito web di Arpae), la variabilità del clima è descritta con mappe e grafici di indici climatici.

Nella letteratura scientifica è specificato che il confronto diretto fra valori climatici di periodi diversi è possibile unicamente tramite archivi che utilizzino una rete osservativa coerente, di buona qualità e il più possibile simile a se stessa nel tempo per tutto il periodo coperto, anche a scapito del dettaglio spaziale. **In Emilia-Romagna, gran parte della rete di monitoraggio meteorologico è stata installata a fine anni '80, sono quindi disponibili più dati climatici giornalieri per il trentennio 1991-2020, rispetto al periodo più lungo, dal 1961 a oggi.**

In questo rapporto i grafici presentano l'andamento temporale degli indici climatici annuali per il periodo 1961-2022 e sono calcolati tramite il dataset climatico regionale (<https://dati.arpae.it/dataset/erg5-eracito>) che copre l'intero periodo, ma con un basso dettaglio spaziale, mentre le mappe degli indici climatici degli ultimi anni sono prodotte utilizzando il dataset climatico del periodo 1991-2022 (<https://dati.arpae.it/dataset/erg5-eracito-91>), più dettagliato grazie al maggiore numero di serie disponibili sul periodo.



La variabilità del clima viene descritta tramite indici climatici



Giorni Critici

Giorni caldi (HD)

L'indicatore *Giorni caldi*, definito come il numero totale annuo di giorni con temperatura massima maggiore di 30 °C, è stato calcolato sull'Emilia-Romagna utilizzando i dati giornalieri di temperatura massima. Sul lungo periodo (1961-2022), la serie dell'indice regionale in *figura 4* mostra una tendenza all'aumento statisticamente significativa.

Nel periodo 2018-2022, l'indice regionale ha registrato un massimo nel 2022 con un valore di circa 61 giorni, che è risultato il terzo dal 1961, dopo il 2003 e il 2012. Come si può notare in *figura 9*, nel 2022 si sono osservati fino a 103 giorni caldi nelle aree di pianura, tra 30 e 65 giorni nelle aree di collina, intorno a 10 giorni nell'Appennino centrale e fino a 60 giorni nell'Appennino bolognese.

Configurazioni simili ma con valori leggermente più bassi, soprattutto nella collina e sul crinale, si riscontrano anche per gli anni 2018, 2019 e 2021, mentre il 2020, pur mantenendo una distribuzione simile agli anni precedenti, ha registrato un valore più basso dell'indice regionale con valori minori soprattutto in pianura (*figura 5-8*).



2003, 2012 e 2022 sono gli anni con il maggior numero di giorni caldi a livello regionale

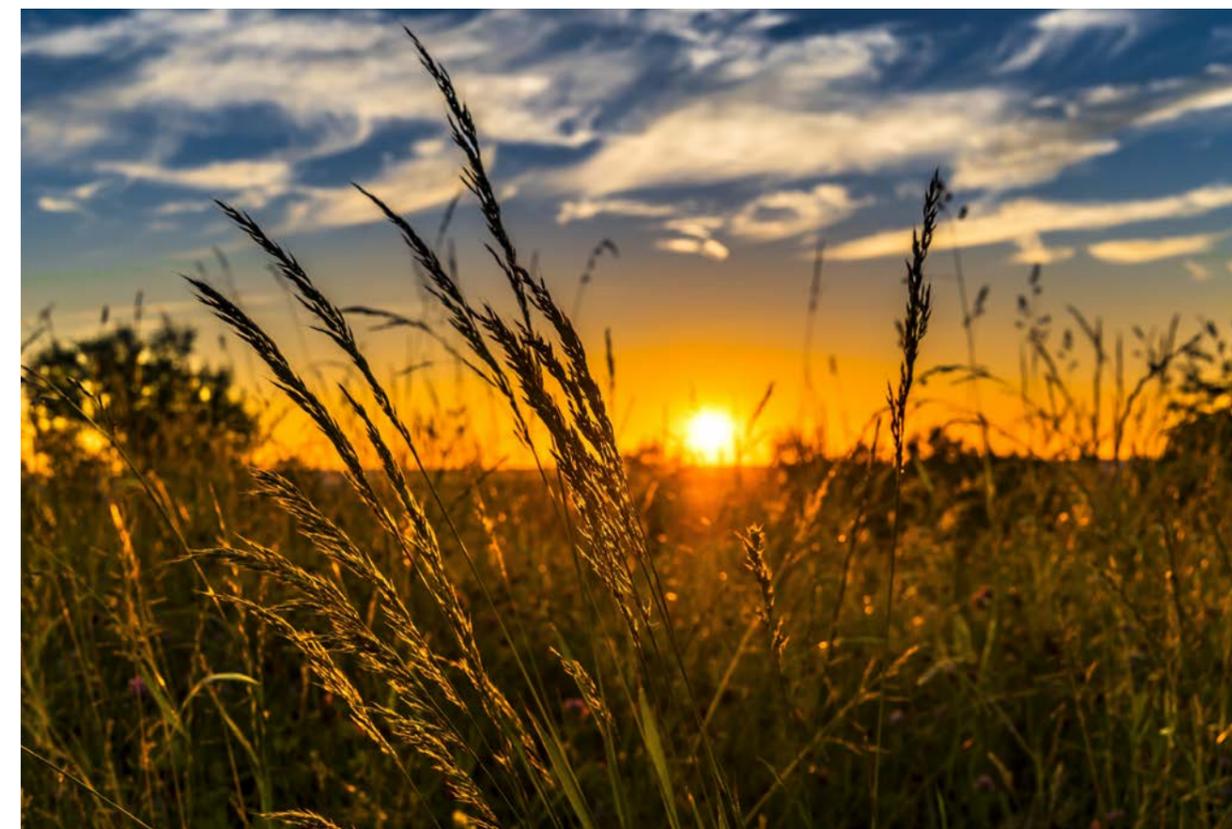
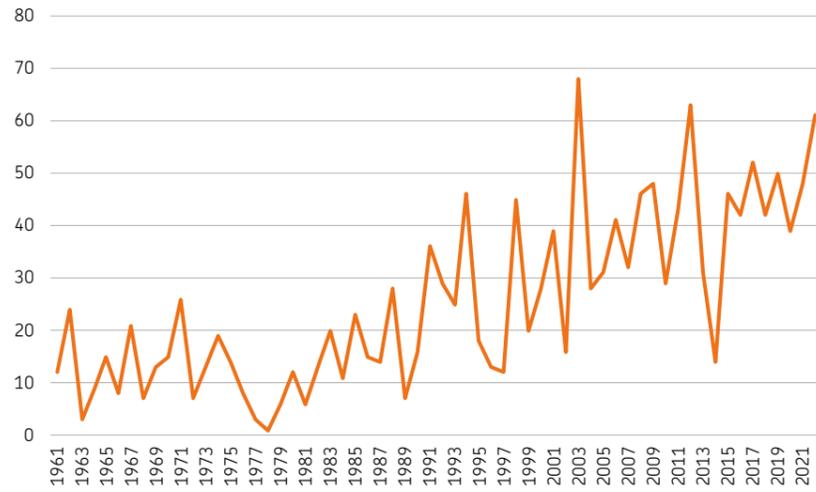
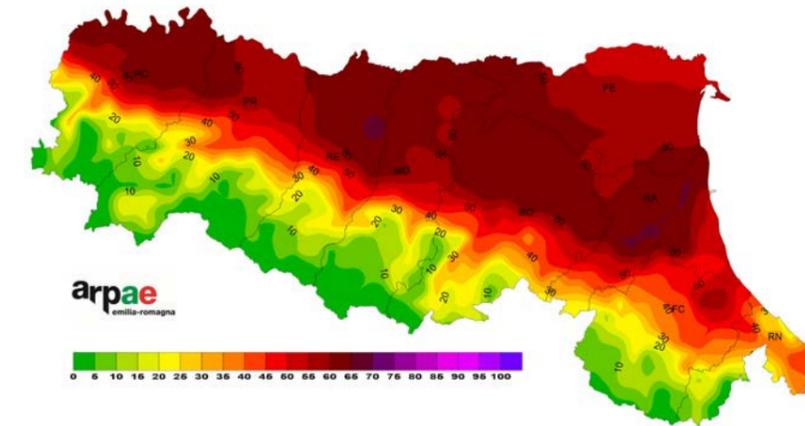


FIGURA 4
Andamento temporale dell'indice regionale del numero di giorni caldi (1961-2022)



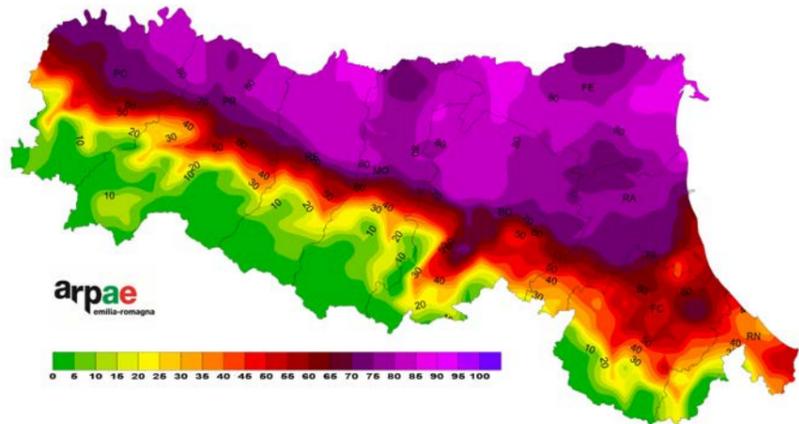
”
Giorni caldi:
1961 - 2022

FIGURA 7
Distribuzione spaziale del numero di giorni caldi (2020)



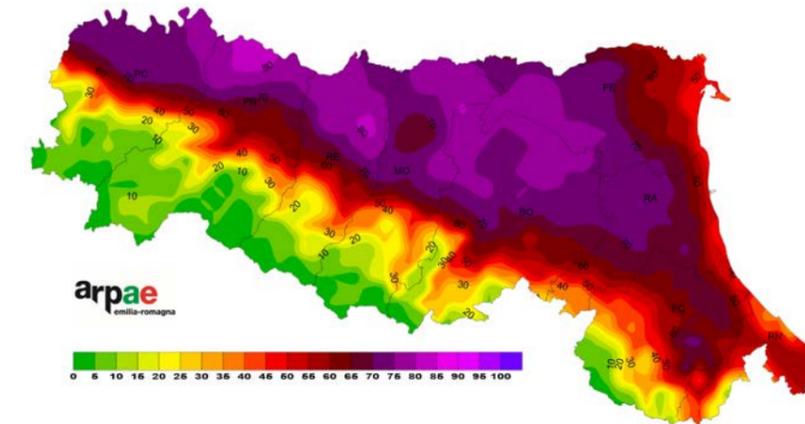
”
Giorni caldi:
2020

FIGURA 5
Distribuzione spaziale del numero di giorni caldi (2018)



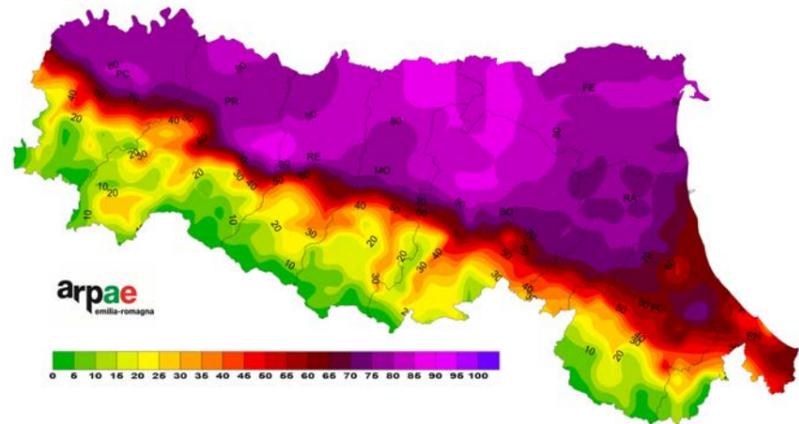
”
Giorni caldi:
2018

FIGURA 8
Distribuzione spaziale del numero di giorni caldi (2021)



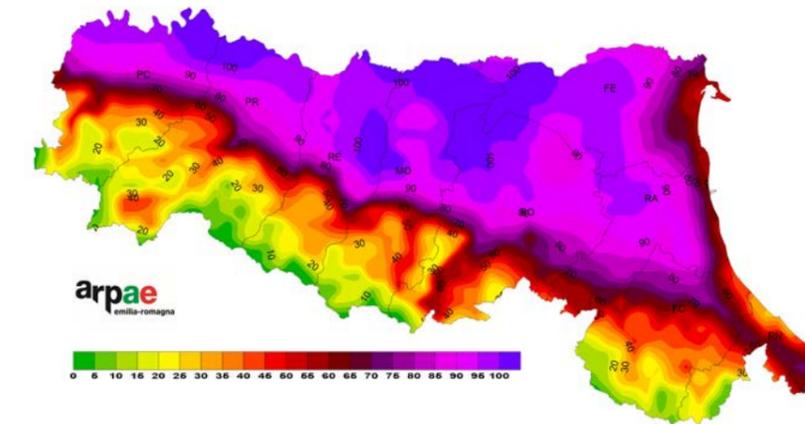
”
Giorni caldi:
2021

FIGURA 6
Distribuzione spaziale del numero di giorni caldi (2019)



”
Giorni caldi:
2019

FIGURA 9
Distribuzione spaziale del numero di giorni caldi (2022)



”
Giorni caldi:
2022

Giorni consecutivi senza precipitazioni (CDD)

L'indicatore *Giorni consecutivi senza precipitazioni*, definito come il numero massimo di giorni consecutivi senza precipitazione (ovvero con precipitazione inferiore a 1,0 mm), è stato calcolato sull'Emilia-Romagna utilizzando i dati giornalieri di precipitazione. Il periodo preso in considerazione include ogni anno i mesi da ottobre fino a marzo dell'anno successivo, sulla finestra temporale dal 1961 al 2022.

Sul lungo periodo (1961-2022), la serie dell'indicatore regionale non mostra tendenze significative dal punto di vista statistico, come si può vedere in *figura 10*, ma è presente una spiccata variabilità di lungo periodo, e l'indice raggiunge valori massimi tra il 1989 e il 1993.

Durante gli ultimi 5 anni, il valore massimo dell'indicatore è stato registrato nell'inverno 2021-2022, con **35-40 giorni consecutivi su gran parte della pianura e della collina, circa 20 giorni sull'Appennino piacentino e punte di 45 giorni consecutivi nella parte occidentale**. Una configurazione simile si è verificata anche nella stagione 2018-2019, mentre nel 2019-2020 e 2020-2021 si sono osservati i valori più bassi dell'indice regionale degli ultimi anni, associati a 20 e 30 giorni consecutivi senza pioggia in pianura e collina e circa 15 giorni sul crinale appenninico (*figure 11-14*).



Negli ultimi 5 anni il valore massimo di giorni consecutivi senza precipitazione è stato registrato nella stagione 2021-2022 con:

- 35-40 gg in pianura e collina
- 20 gg sull'Appennino piacentino
- 45 gg nella parte occidentale

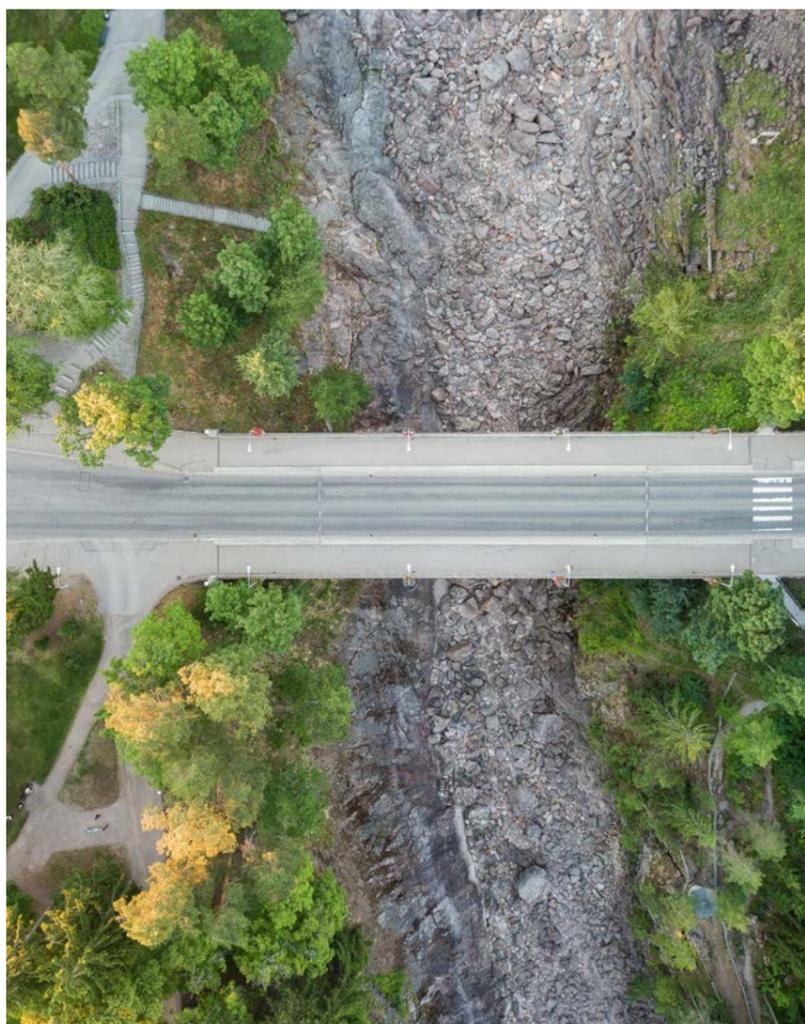
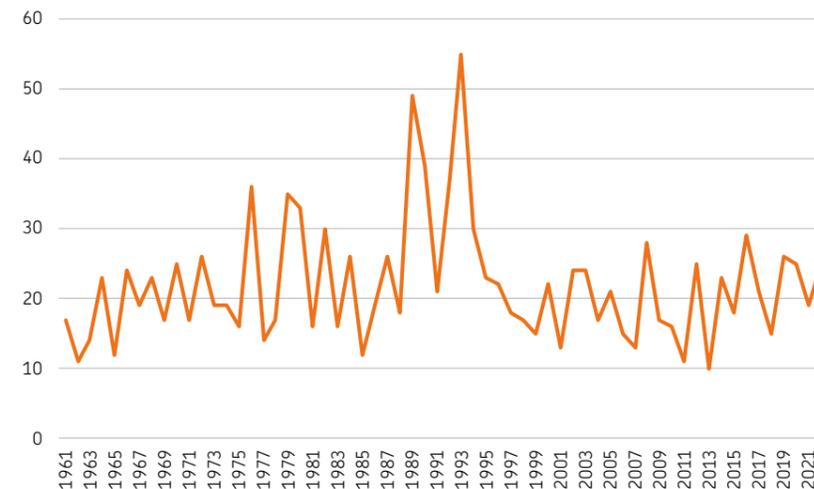
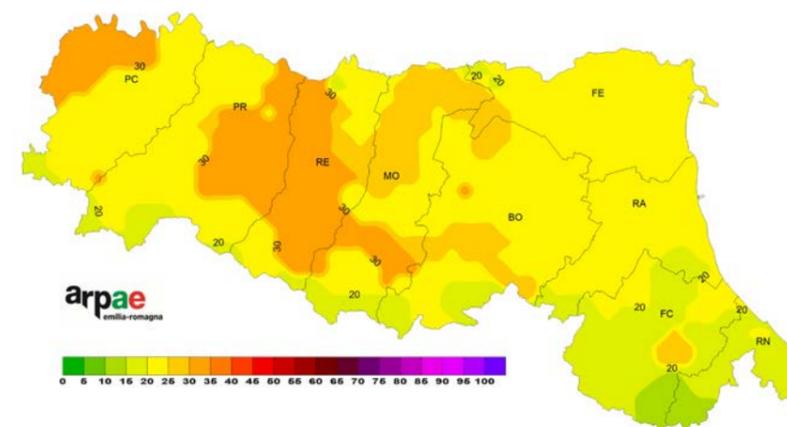


FIGURA 10 Andamento temporale dell'indice regionale invernale di giorni consecutivi senza pioggia (1961-2022)



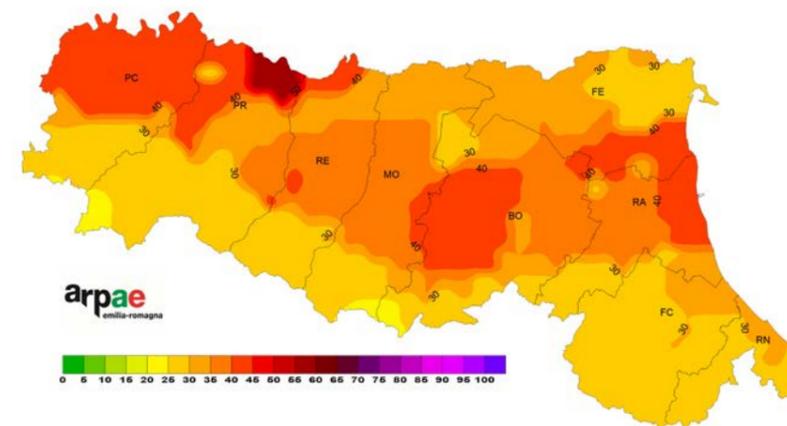
Giorni consecutivi senza precipitazioni: 1961 - 2022

FIGURA 11 Distribuzione spaziale del numero massimo di giorni consecutivi senza precipitazioni (ottobre 2017-marzo 2018)



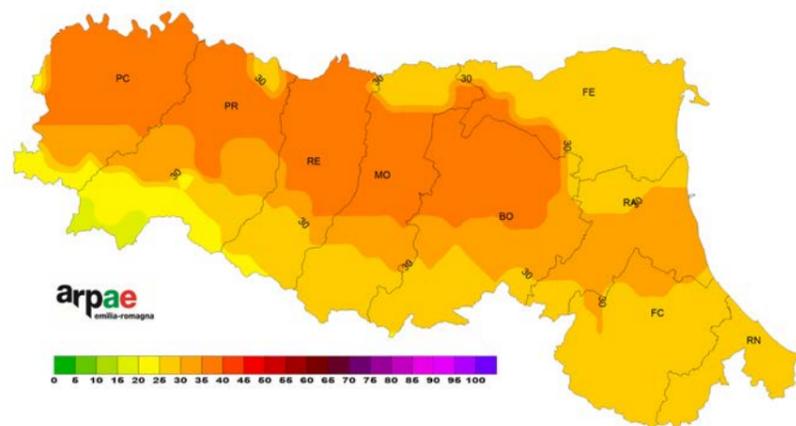
Giorni consecutivi senza precipitazioni: 1 ottobre 2017 - 31 marzo 2018

FIGURA 12 Distribuzione spaziale del numero massimo di giorni consecutivi senza precipitazioni (ottobre 2018-marzo 2019)



Giorni consecutivi senza precipitazioni: 1 ottobre 2018 - 31 marzo 2019

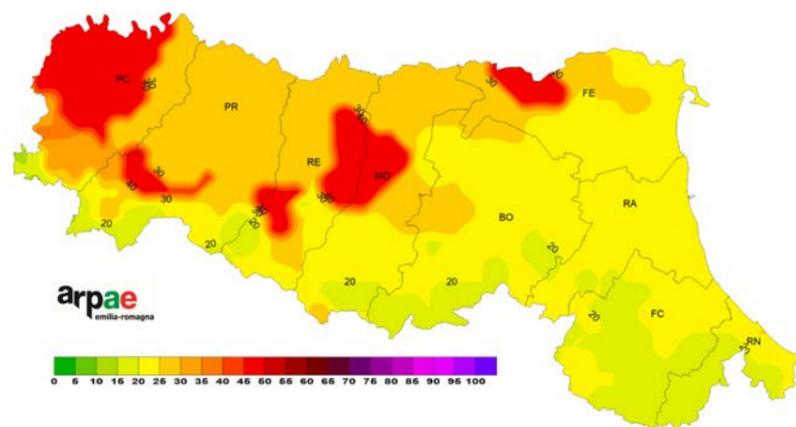
FIGURA 13 Distribuzione spaziale del numero massimo di giorni consecutivi senza precipitazioni (ottobre 2019-marzo 2020)



”

Giorni consecutivi senza precipitazioni:
1 ottobre 2019 - 31 marzo 2020

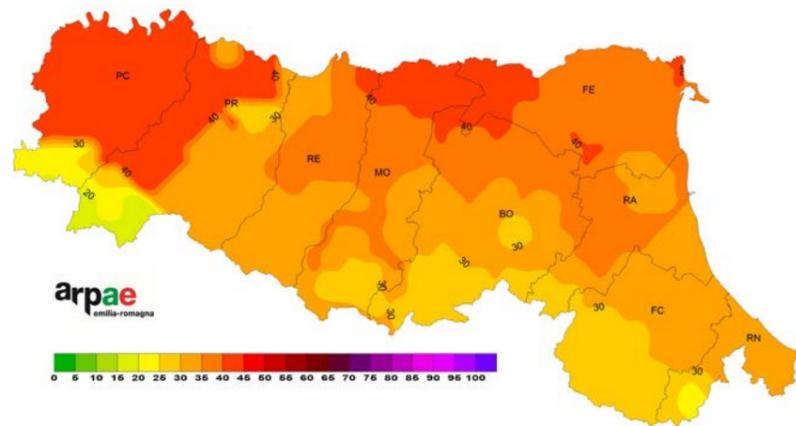
FIGURA 14 Distribuzione spaziale del numero massimo di giorni consecutivi senza precipitazioni (ottobre 2020-marzo 2021)



”

Giorni consecutivi senza precipitazioni:
1 ottobre 2020 - 31 marzo 2021

FIGURA 15 Distribuzione spaziale del numero massimo di giorni consecutivi senza precipitazioni (ottobre 2021-marzo 2022)



”

Giorni consecutivi senza precipitazioni:
1 ottobre 2021 - 31 marzo 2022

Giorni con precipitazione (RD)

L'indicatore *Giorni con precipitazione*, definito come il numero totale di giorni con precipitazione (ovvero con precipitazione maggiore uguale a 1,0 mm), è stato calcolato sull'Emilia-Romagna utilizzando i dati giornalieri di precipitazione. Il periodo preso in considerazione include i mesi da ottobre fino a marzo dell'anno successivo, sulla finestra temporale dal 1961 al 2022.

In figura 16 si può notare che sul lungo periodo (1961-2022), la serie dell'indice regionale invernale non mostra tendenze significative dal punto di vista statistico, ma un'intensa variabilità interannuale e inter-decennale, con valori più bassi intorno al 1990 e picchi più alti dal 2000 in poi.

Durante gli ultimi cinque anni, il valore massimo dell'indice regionale invernale di giorni con precipitazione è stato registrato nella stagione 2017-2018, ed è stato associato a valori di 40 giorni nella pianura centro-orientale, 60 giorni nella collina e fino a 80 giorni nel crinale (figura 17). Una distribuzione spaziale simile, ma con valori leggermente più bassi (circa 5 giorni in meno), è stata riscontrata per la stagione 2020-2021. Il numero più basso dell'indice regionale è stato invece registrato durante l'inverno 2021-2022, associato a circa 25 giorni in pianura e circa 55 giorni sul crinale (leggermente più alto sul crinale della provincia di Forlì-Cesena). Negli altri anni la distribuzione spaziale è stata simile a quest'ultima (figura 18-21).

”

Negli ultimi 5 anni il valore massimo di giorni con precipitazione è stato registrato nella stagione 2017-18 con:

- 40 gg. nella pianura centro-orientale
- 60 gg. in collina
- 80 gg. nel crinale

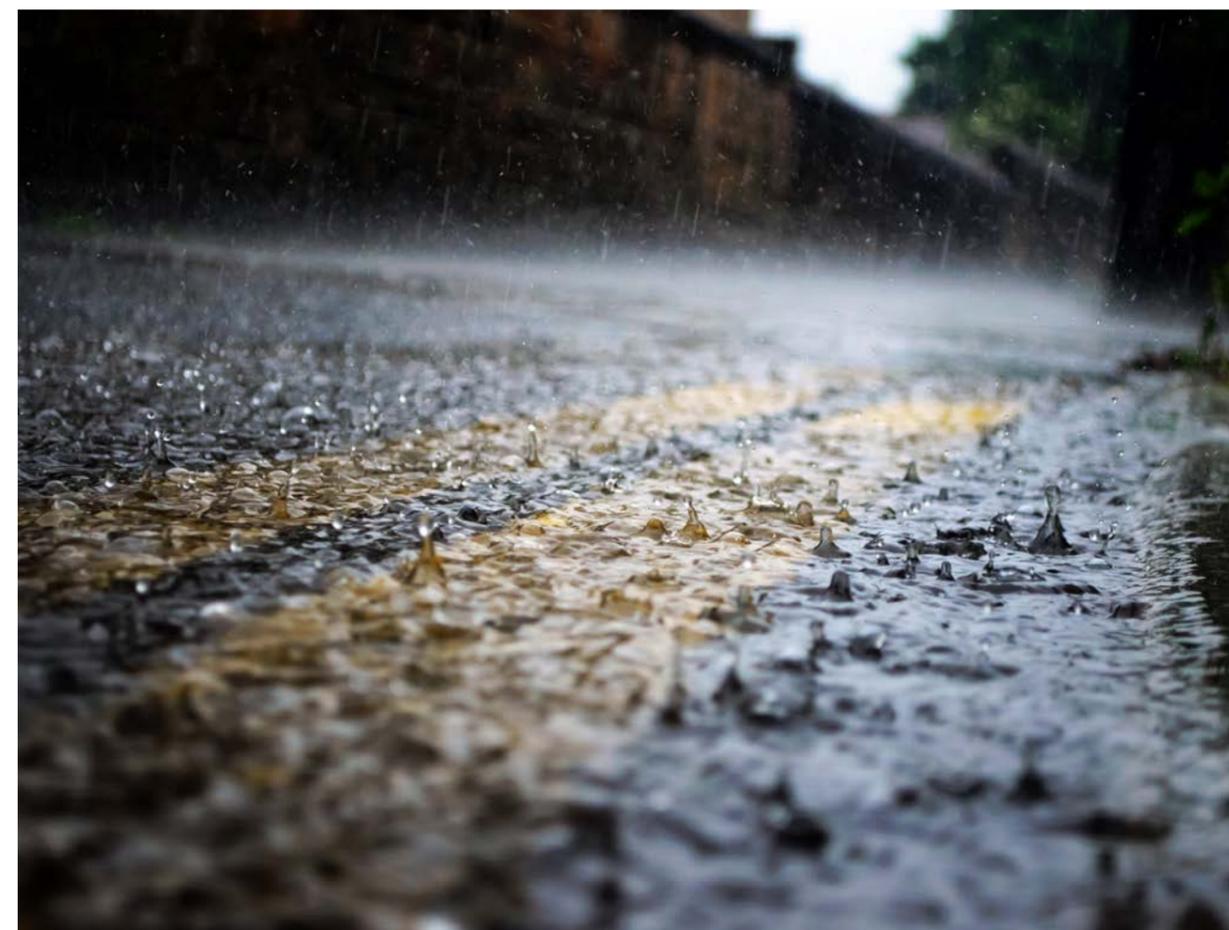
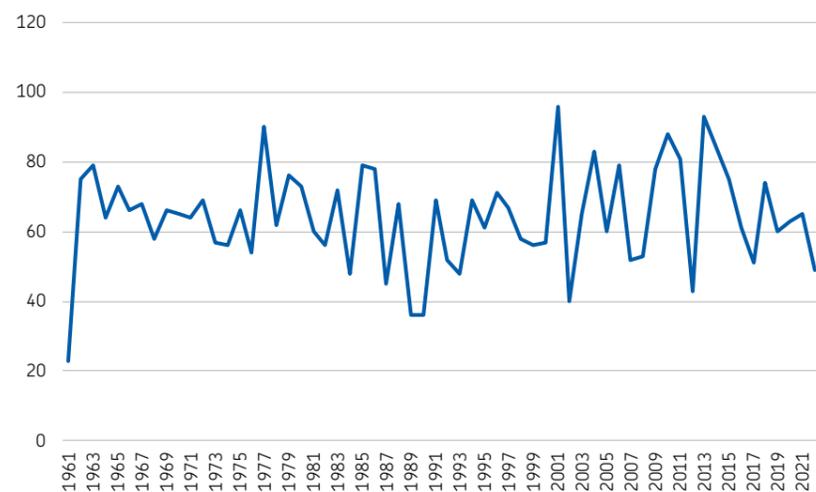
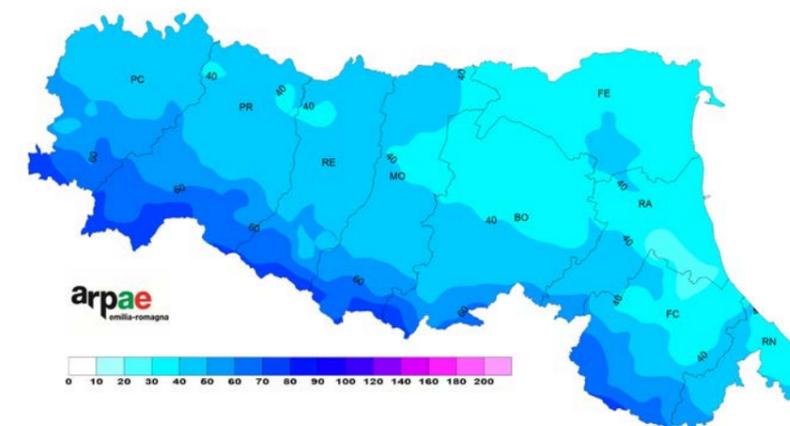


FIGURA 16 Andamento temporale dell'indice regionale invernale del numero di giorni piovosi (1961-2022)



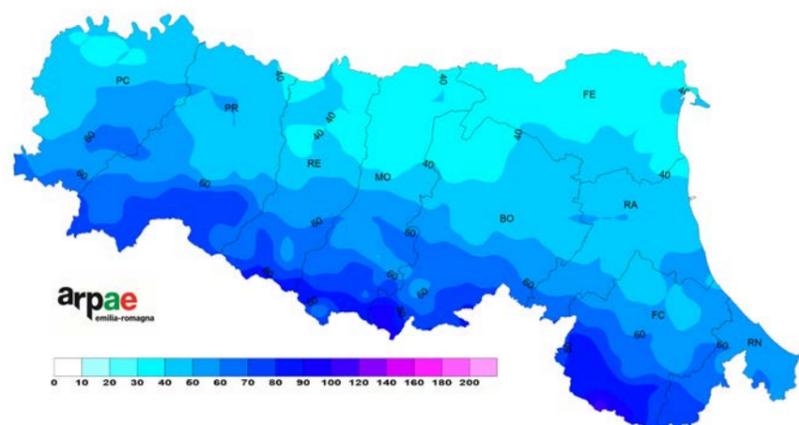
Numero di giorni piovosi:
1961 - 2022

FIGURA 19 Distribuzione spaziale del numero di giorni piovosi (ottobre 2019-marzo 2020)



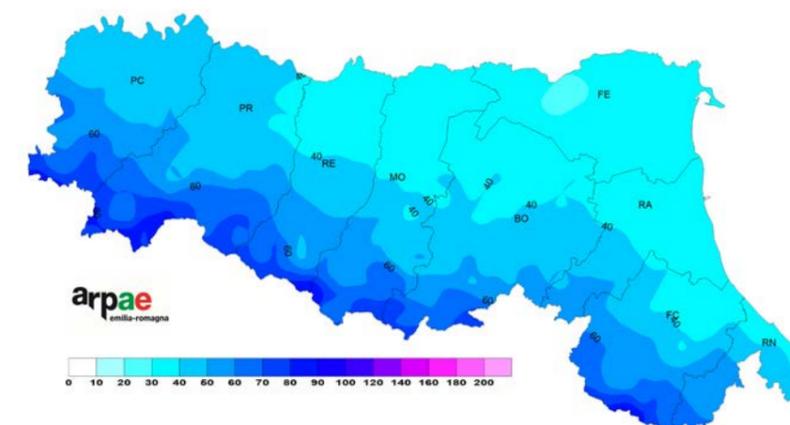
Numero di giorni piovosi:
1 ottobre 2019 - 31 marzo 2020

FIGURA 17 Distribuzione spaziale del numero di giorni piovosi (ottobre 2017-marzo 2018)



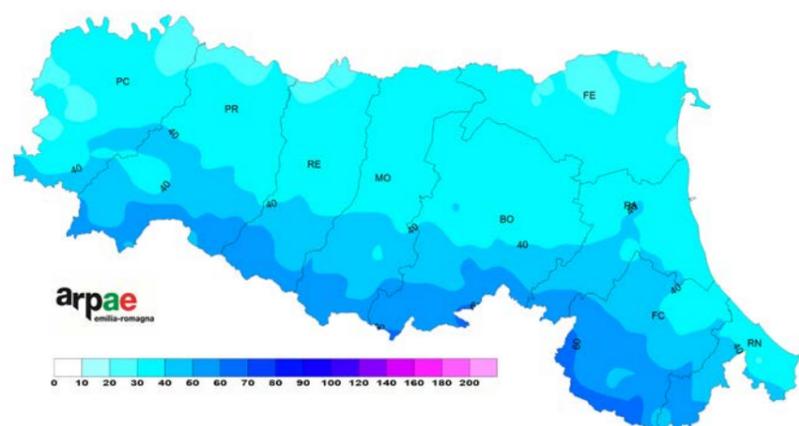
Numero di giorni piovosi:
1 ottobre 2017 - 31 marzo 2018

FIGURA 20 Distribuzione spaziale del numero di giorni piovosi (ottobre 2020-marzo 2021)



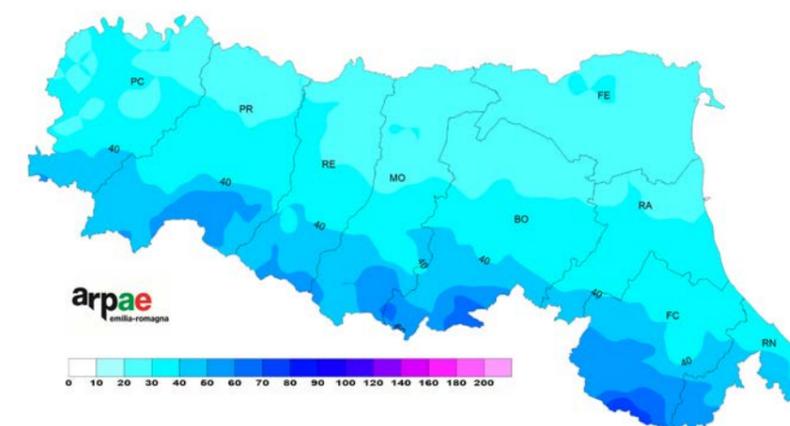
Numero di giorni piovosi:
1 ottobre 2020 - 31 marzo 2021

FIGURA 18 Distribuzione spaziale del numero di giorni piovosi (ottobre 2018-marzo 2019)



Numero di giorni piovosi:
1 ottobre 2018 - 31 marzo 2019

FIGURA 21 Distribuzione spaziale del numero di giorni piovosi (ottobre 2021-marzo 2022)



Numero di giorni piovosi:
1 ottobre 2021 - 31 marzo 2022

Descrizione del vento

La regione Emilia-Romagna si trova nel Bacino Padano, territorio caratterizzato da ventilazione scarsa a causa della struttura orografica che ne delimita i confini a nord, ovest e sud. Le catene montuose, oltre a rappresentare un ostacolo per i venti a bassa quota, favoriscono l'accumulo di aria fredda nel Bacino Padano in presenza di regimi meteorologici favorevoli alla sua formazione o avvezione; una volta accumulata, l'aria fredda a bassa quota aumenta la stratificazione e riduce il rimescolamento dell'aria, causando quindi accumulo di inquinanti negli strati superficiali.

L'accumulo degli inquinanti negli strati atmosferici più vicini al suolo è fortemente influenzato da diversi fattori, in particolare l'altezza di rimescolamento (la quota al di sotto della quale avvengono i moti turbolenti che favoriscono la dispersione degli inquinanti) **e la ventilazione**, ovvero l'intensità del vento negli strati atmosferici più bassi. Seppure non esista una correlazione diretta fra le variabili del vento e le concentrazioni degli inquinanti misurati, il legame tra inquinamento e intensità del vento è ormai saldamente riconosciuto. In particolare, si osserva che le concentrazioni di PM_{10} tendono ad aumentare nei mesi invernali, quando si ha il maggior numero di giornate meteorologicamente favorevoli alla stagnazione.

In questa analisi, vengono considerati i dati di vento relativi alla stagione invernale estesa di ciascun anno, che corrisponde ai mesi di gennaio, febbraio, marzo, ottobre, novembre e dicembre. L'analisi della variabilità temporale del vento presentata è relativa a un punto rappresentativo della pianura, collocato nei pressi della stazione meteorologica storica Arpae di San Pietro in Capofiume, nella pianura tra Bologna e Ferrara. Dal momento che i dati osservati di vento presentano buchi in alcuni periodi, ai fini dello studio è stato usato il valore orario di intensità del vento interpolato nel punto di griglia più vicino alla stazione, estratto dal dataset ERG5 dell'Osservatorio Clima Arpae, che include valori orari grigliati continui di vento sull'intera regione, dal 2001 a oggi. Da un confronto tra i dati osservati disponibili e i dati interpolati, risulta che questi ultimi valori sono molto simili ai primi e quindi affidabili.

In particolare, è stato definito un **indice che individua per quanti giorni il vento istantaneo ha superato in questa località il valore di 5 m/s**, una soglia che indica un valore di vento sopra al quale ci si può aspettare la presenza di rimescolamento dell'aria e ventilazione; quando il vento permane per tutta la giornata al di sotto di questo valore, il rimescolamento risulta invece assente.



L'accumulo degli inquinanti atmosferici al suolo è influenzato da:
- *altezza di rimescolamento*
- *intensità del vento negli strati più bassi*

Nel grafico vengono mostrati i valori dell'indice per il periodo 2018-2022. **Si osserva che il numero di giorni ventilati, in cui il vento ha toccato valori sufficienti per rimescolare gli strati bassi dell'atmosfera, è relativamente basso: nei cinque anni considerati, l'indice va da circa 30 a circa 55 giorni a stagione, quindi da meno di un giorno su sei a quasi due giorni su sei. Questo significa che nei sei mesi della stagione invernale estesa, le condizioni di scarsa ventilazione, favorevoli all'accumulo di alte concentrazioni di PM_{10} nei bassi strati dell'atmosfera vicino al suolo, si presentano per un numero totale di giorni tra 120 e 150.**

Negli anni considerati, il 2020 ha presentato condizioni invernali di minore ventilazione, mentre il 2019 le condizioni di maggiore ventilazione. Come già accennato, le condizioni di scarsa ventilazione sono cruciali per il verificarsi di alte concentrazioni di PM_{10} e quindi per condizioni di qualità dell'aria mediamente scarse, ma altri fattori dinamici possono influire sulle condizioni di bassa qualità dell'aria, quindi valori annuali bassi di questo indice di ventilazione non corrispondono sempre a valori bassi degli indici di qualità dell'aria, come le concentrazioni di PM_{10} .

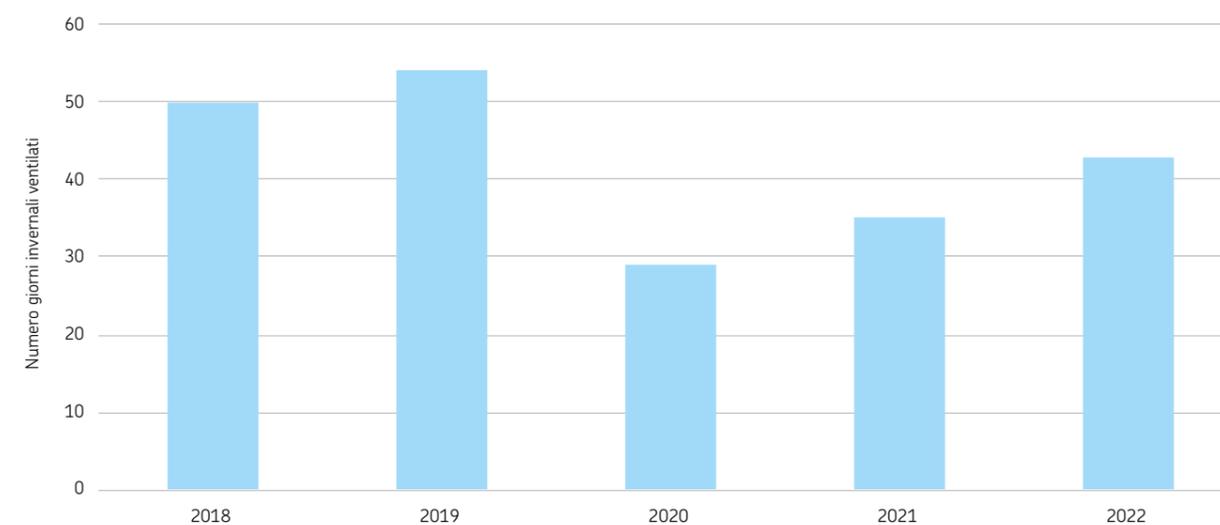


Negli ultimi 5 anni: il numero di giorni con ventilazione sufficiente a rimescolare gli strati bassi dell'atmosfera è compreso fra 30 e 55



Negli ultimi 5 anni: i giorni con scarsa ventilazione favorevoli ad accumulare PM_{10} sono compresi fra 120 e 150 gg

 **FIGURA 22** Numero di giorni invernali (gennaio, febbraio, marzo, ottobre, novembre e dicembre) ventilati, con vento massimo giornaliero superiore a 5 m/s, dal 2018 al 2022, a San Pietro Capofiume



Fonte: dataset orario grigliato ERG5 dell'Osservatorio Clima di Arpae

2

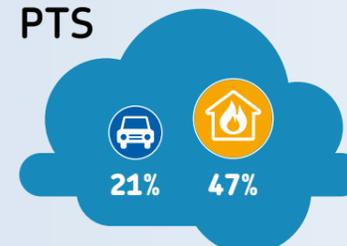
Emissioni in atmosfera



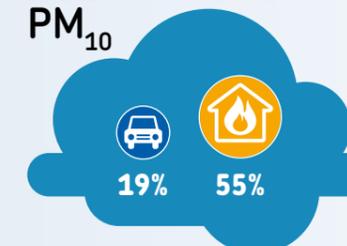
Pillole | “Dagli inquinanti ai gas serra”

LE EMISSIONI DI INQUINANTI - 2019 (MACROSETTORI CORINAIR)

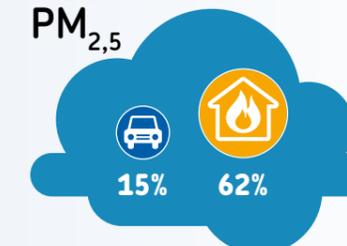
POLVERI TOTALI SOSPESI
PTS



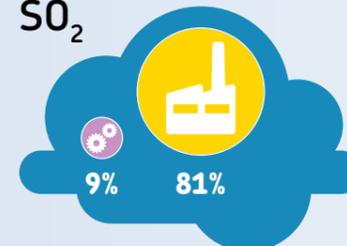
POLVERI GROSSOLANE
PM₁₀



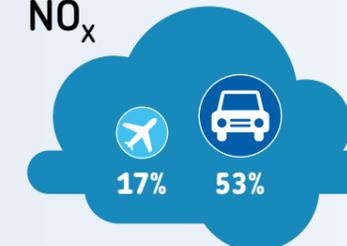
POLVERI FINI
PM_{2,5}



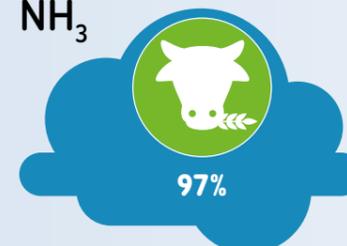
BIOSSIDO DI ZOLFO
SO₂



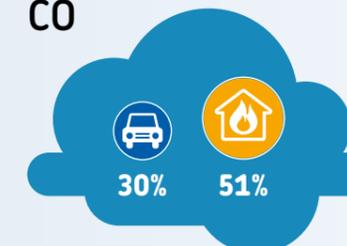
OSSIDI DI AZOTO
NO_x



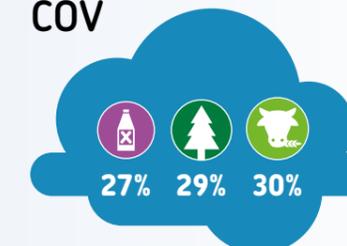
AMMONIACA
NH₃



MONOSSIDO DI CARBONIO
CO

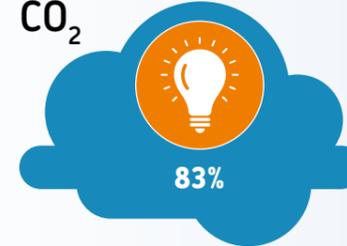


COMPOSTI ORGANICI VOLATILI
COV

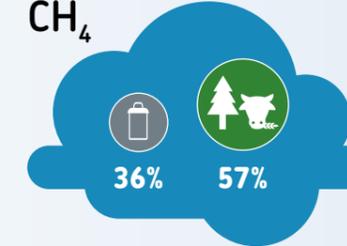


LE EMISSIONI DI GAS SERRA - 2020 (SETTORI IPCC)

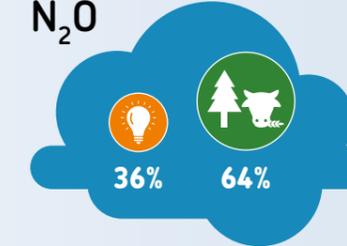
ANIDRIDE CARBONICA
CO₂



METANO
CH₄



PROTOSSIDO DI AZOTO
N₂O



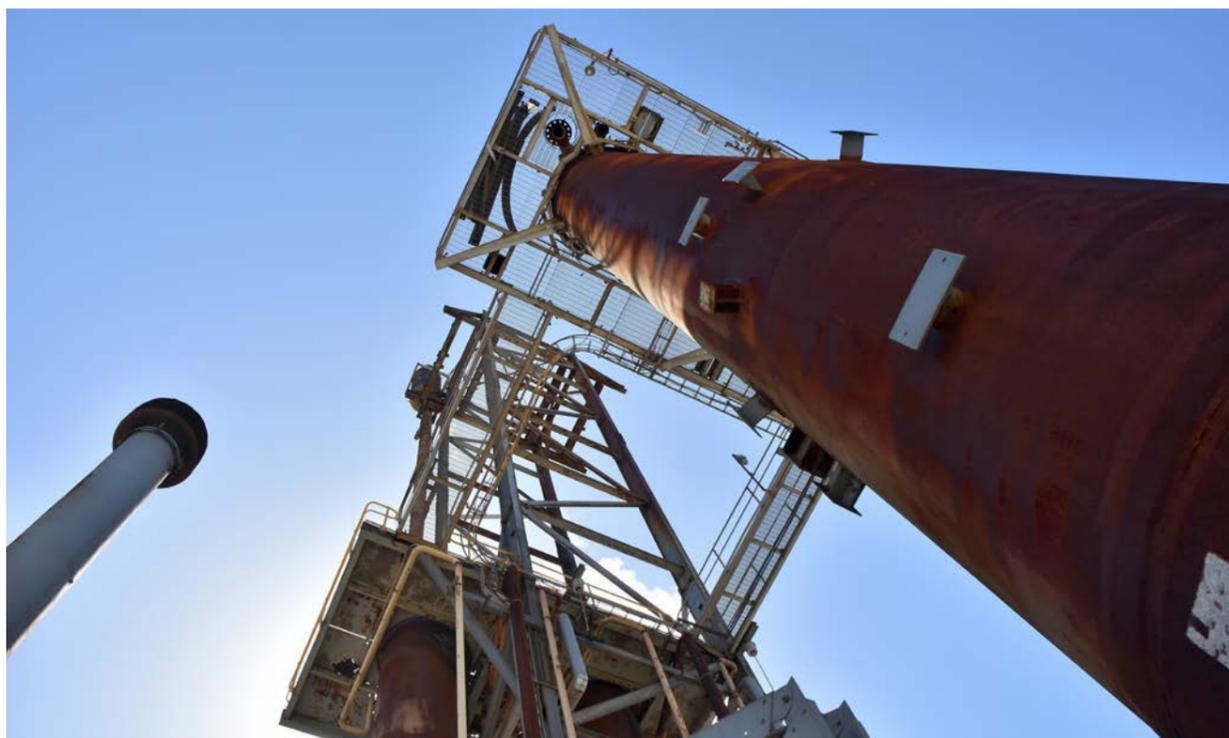
Emissioni in atmosfera

Per comprendere il fenomeno dell'inquinamento atmosferico risulta fondamentale conoscere il carico emissivo degli inquinanti provenienti dai diversi settori produttivi.

La stima quantitativa delle sostanze emesse dalle varie sorgenti, relativa dunque ai soli inquinanti di origine primaria, è realizzata utilizzando fattori di emissione e indicatori di attività integrati.

Tali informazioni sono raccolte negli inventari delle emissioni, ovvero serie organizzate di dati relativi alla quantità di inquinanti introdotta in atmosfera da ciascuna fonte di emissione.

Gli inventari delle emissioni sono aggiornati periodicamente al fine di seguire l'andamento dei determinanti, costituiti da un ampio complesso di fattori relativi alle varie attività umane. Parallelamente ha luogo un processo di progressivo affinamento delle metodologie di stima che se da un lato consente di migliorare l'affidabilità del dato restituito e di seguire l'evoluzione delle tecnologie e delle conoscenze, dall'altro non consente sempre un agevole confronto all'interno delle serie storiche delle emissioni.



Inventario delle emissioni 2019

L'inventario regionale delle emissioni in atmosfera raccoglie le stime emissive degli inquinanti primari prodotti dalle varie sorgenti e la loro distribuzione territoriale, fino a dettaglio comunale.

La più recente edizione dell'inventario delle emissioni è relativa al 2019 ed è stata redatta mediante il software IN.EM.AR (INventario EMissioni ARia) nella sua versione 7.0.9.

La metodologia di riferimento implementata da INEMAR è quella EMEP-CORINAIR contenuta nel documento "EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019" al quale si rimanda per i dettagli. Secondo questa metodologia le fonti di emissione sono classificate in 11 macrosettori (MS1 - Produzione di energia e trasformazione di combustibili, MS2 - Combustione non industriale, MS3 - Combustione industriale, MS4 - Processi Produttivi, MS5 - Estrazione e distribuzione di combustibili, MS6 - Uso di solventi, MS7 - Trasporto su strada, MS8 - Altre sorgenti mobili e macchinari, MS9 - Trattamento e smaltimento rifiuti, MS10 - Agricoltura, MS11 - Altre sorgenti e assorbimenti).

Di seguito si richiamano i risultati principali dell'inventario, rimandando ai contenuti riportati per esteso alla pagina web dedicata.

Le stime relative all'anno 2019 confermano che le fonti principali di emissioni legate all'inquinamento diretto da polveri sono costituite dal riscaldamento domestico a biomassa e dal trasporto su strada, seguiti dalle attività produttive e dai trasporti non stradali.

Alle emissioni di ossidi di azoto (NO_x), importanti precursori della formazione di particolato secondario e ozono, contribuiscono il trasporto su strada per il 53%, a seguire le altre sorgenti mobili, la combustione nell'industria, il riscaldamento e la produzione di energia.

Il principale contributo (97%) alle emissioni di ammoniaca (NH_3), anch'esso precursore di particolato secondario, deriva dalle pratiche agricole e dalla zootecnia.

L'utilizzo di solventi nel settore industriale e civile risulta il principale contributo antropogenico alle emissioni di composti organici volatili non metanici (COVnm), precursori di particolato secondario e ozono, assieme agli ossidi di azoto. La produzione di COVnm di origine biogenica, da specie agricole e da vegetazione, è la fonte che contribuisce maggiormente alle emissioni di questo inquinante.

La combustione nell'industria ed i processi produttivi risultano la fonte più rilevante di biossido di zolfo (SO_2) che, sebbene presenti una concentrazione in aria di gran lunga inferiore ai valori limite, risulta un importante precursore della formazione di particolato secondario, anche a basse concentrazioni.

Il monossido di carbonio (CO) è emesso dalla combustione domestica (MS2) per circa il 50% e dai trasporti su strada (MS7) per il 30%.

Le emissioni di sostanze inquinanti della regione Emilia-Romagna per i macrosettori *Corinair* sono riportate in [tabella 1](#) e [2](#) e nella successiva [figura 1](#).



*L'inventario delle emissioni in aria fornisce:
la stima emissiva delle sorgenti
e la loro distribuzione territoriale*

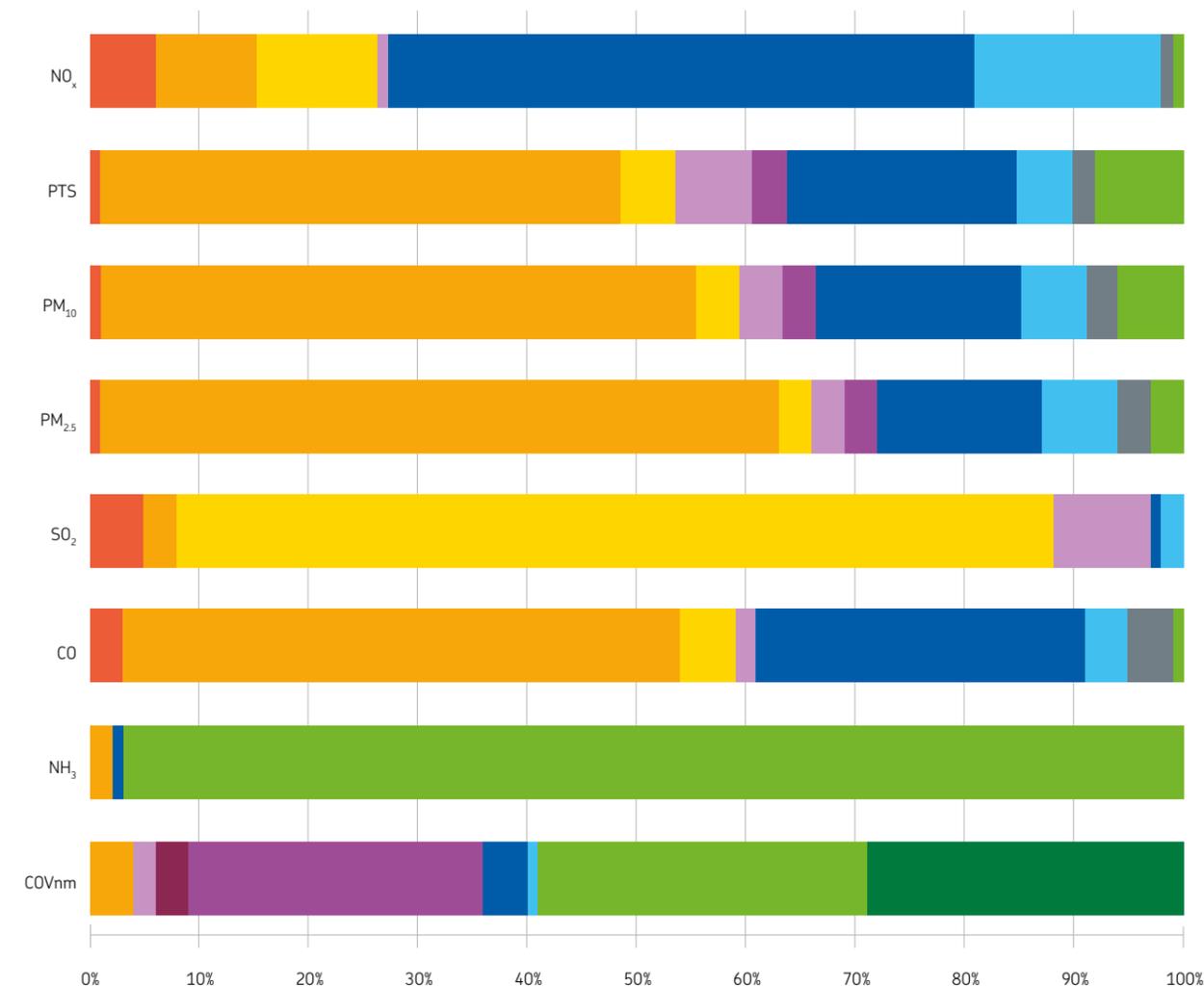
TABELLA 1
Ripartizione delle emissioni dell'Emilia-Romagna per macrosettori Corinair

	NO _x (t)	PTS (t)	PM ₁₀ (t)	PM _{2,5} (t)	SO ₂ (t)	CO (t)	NH ₃ (t)	COVnm (t)
Produzione di energia e trasformazione di combustibili	3.758	106	77	70	433	2.805	12	238
Combustione non industriale	5.865	6.379	6.074	5.923	216	45.634	706	5.152
Combustione industriale	7.294	628	421	321	6.788	4.170	19	580
Processi Produttivi	751	947	497	303	753	1.590	113	1.992
Estrazione e distribuzione di combustibili	0	0	0	0	0	0	0	3.669
Uso di solventi	69	431	292	256	5	19	2	33.213
Trasporto su strada	33.813	2.867	2.087	1.431	57	26.819	489	4.372
Altre sorgenti mobili e macchinari	10.484	665	654	643	127	3.410	2	1.061
Trattamento e smaltimento rifiuti	871	320	307	285	37	3.912	184	131
Agricoltura	608	1.086	632	324	14	709	43.982	36.781
Altre sorgenti	0	0	0	0	0	0	0	34.958
TOTALI	63.512	13.429	11.040	9.556	8.429	89.068	45.509	122.147

TABELLA 2
Ripartizione percentuale delle emissioni dell'Emilia-Romagna per macrosettori Corinair

	NO _x (%)	PTS (%)	PM ₁₀ (%)	PM _{2,5} (%)	SO ₂ (%)	CO (%)	NH ₃ (%)	COVnm (%)
Produzione di energia e trasformazione di combustibili	6	1	1	1	5	3	0	0
Combustione non industriale	9	47	55	62	3	51	2	4
Combustione industriale	11	5	4	3	81	5	0	0
Processi Produttivi	1	7	4	3	9	2	0	2
Estrazione e distribuzione di combustibili	0	0	0	0	0	0	0	3
Uso di solventi	0	3	3	3	0	0	0	27
Trasporto su strada	53	21	19	15	1	30	1	4
Altre sorgenti mobili e macchinari	17	5	6	7	2	4	0	1
Trattamento e smaltimento rifiuti	1	2	3	3	0	4	0	0
Agricoltura	1	8	6	3	0	1	97	30
Altre sorgenti	0	0	0	0	0	0	0	29

FIGURA 1
Contributi alle emissioni inquinanti di origine antropogenica in Emilia-Romagna (INEMAR 2019)



- Produzione di energia e trasformazione di combustibili
- Combustione non industriale
- Combustione industriale
- Processi Produttivi
- Estrazione e distribuzione di combustibili
- Uso di solventi
- Trasporto su strada
- Trattamento e smaltimento rifiuti
- Agricoltura
- Altre sorgenti

I MACROSETTORI EMISSIVI

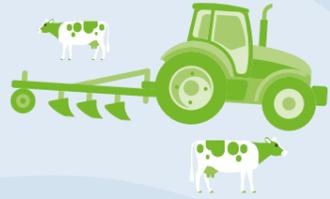
ALTRE SORGENTI
(emissioni naturali...)



ALTRE SORGENTI MOBILI E MACCHINARI
(aerei, navi, mezzi agricoli...)



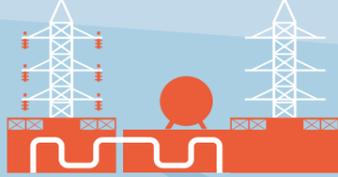
AGRICOLTURA
(coltivazioni, allevamenti...)



TRATTAMENTO E SMALTIMENTO RIFIUTI
(inceneritori, discariche...)



PRODUZIONE ENERGIA E TRASFORMAZIONE COMBUSTIBILI
(produzione energia elettrica, teleriscaldamento, raffinerie...)



COMBUSTIONE NELL'INDUSTRIA
(caldaie e forni per piastrelle, cemento, fusione metalli...)



PROCESSI PRODUTTIVI
(industria petrolifera, chimica, siderurgica, meccanica...)



ESTRAZIONE E DISTRIBUZIONE COMBUSTIBILI
(distribuzione e stoccaggio benzina, gas...)



USO DI SOLVENTI
(produzione e uso di vernici, colle, plastiche...)



COMBUSTIONE NON INDUSTRIALE
(riscaldamento degli ambienti)

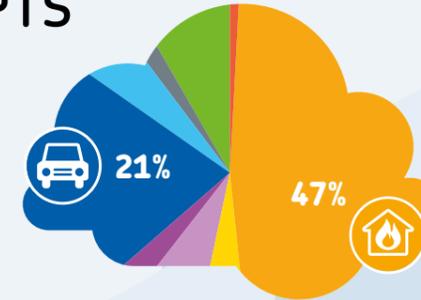


TRASPORTO SU STRADA
(traffico di veicoli leggeri e pesanti...)

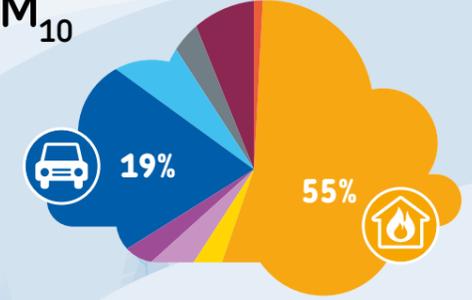


LE EMISSIONI IN ATMOSFERA PER MACROSETTORI IN EMILIA-ROMAGNA (2019)

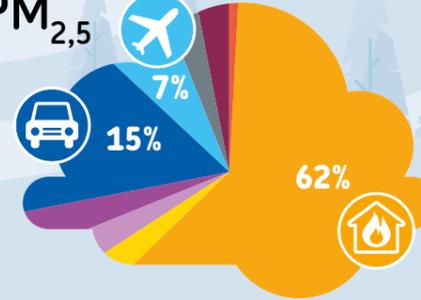
POLVERI TOTALI SOSPESSE
PTS



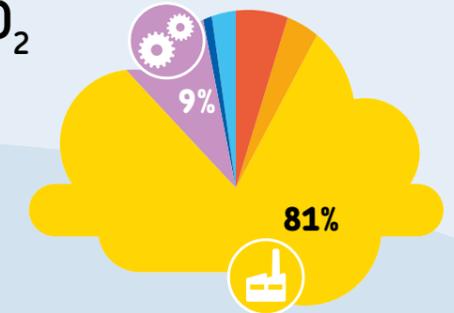
POLVERI GROSSOLANE
PM₁₀



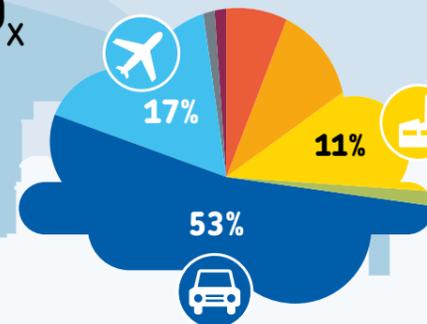
POLVERI FINI
PM_{2,5}



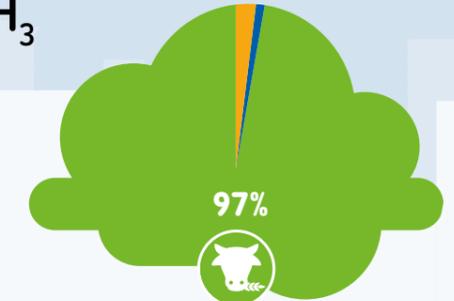
BIOSSIDO DI ZOLFO
SO₂



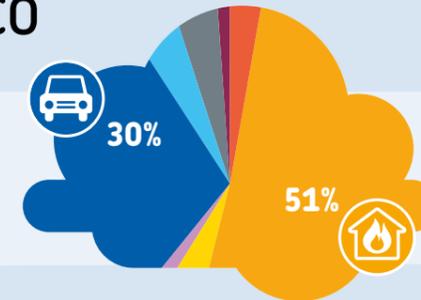
OSSIDI DI AZOTO
NO_x



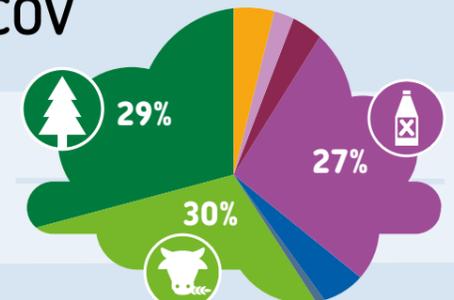
AMMONIACA
NH₃



MONOSSIDO DI CARBONIO
CO



COMPOSTI ORGANICI VOLATILI
COV

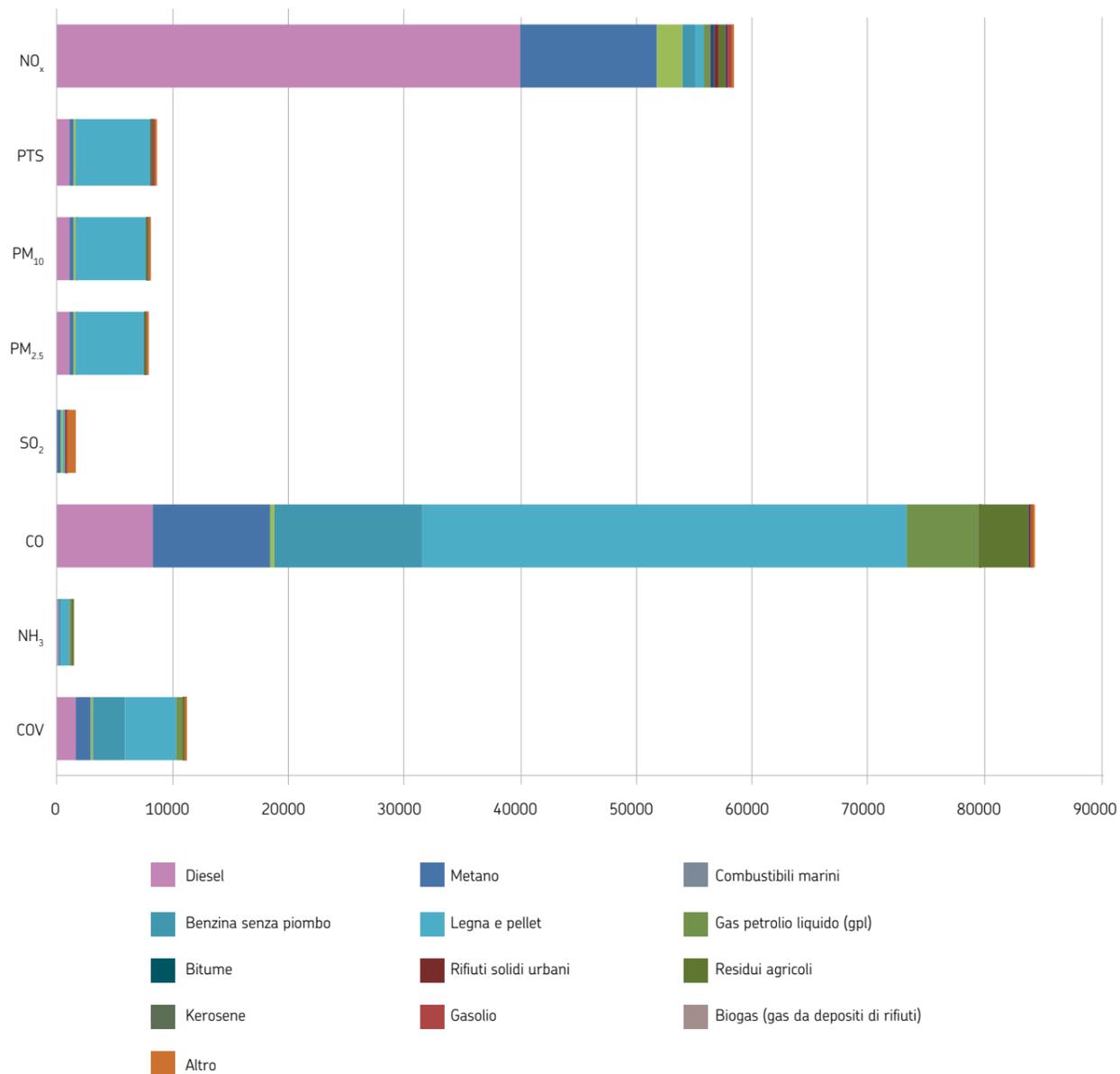


Il contributo dei diversi tipi di combustibile utilizzati in regione è mostrato in **figura 2**.

Dall'analisi della distribuzione delle emissioni dei diversi inquinanti rispetto al combustibile utilizzato emerge che **il consumo del gasolio per autotrasporto (diesel) è responsabile del 69% delle emissioni di NO_x, mentre per il PM₁₀ è preponderante l'apporto delle attività di combustione di legna e similari, dei diesel per autotrasporto, oltre ad usura di freni e pneumatici e abrasione strade che si verificano per tutti i mezzi di trasporto**. La combustione della biomassa legnosa ha un ruolo importante anche nelle emissioni di CO.

Le emissioni di COVnm e NH₃ non dipendono o derivano solo in parte dalla combustione e, pertanto, non sono associabili all'uso di uno specifico combustibile.

FIGURA 2
Ripartizione percentuale delle emissioni dei principali inquinanti per combustibili (INEMAR 2019)



In un contesto che vede l'azione congiunta di fattori di carattere generale e di misure specifiche volte al miglioramento della qualità dell'aria, il progressivo rinnovamento del parco veicolare, la sempre maggiore applicazione delle **migliori tecniche disponibili (BAT) in campo produttivo, zootecnico ed agricolo, il miglioramento delle prestazioni energetiche di edifici** e sistemi di riscaldamento e raffrescamento, l'**incremento dell'uso di fonti di energia rinnovabile**, determinano nei corrispondenti settori una diminuzione del carico emissivo primario sia a scala globale sia nel territorio regionale.

Tuttavia è possibile osservare che non sono avvenute nel tempo variazioni sostanziali nella distribuzione territoriale delle sorgenti e nel peso dei diversi contributi.



Diminuzione carico emissivo primario per:

- rinnovo parco veicolare
- BAT
- miglioramento prestazioni energetiche degli edifici
- incremento dell'energia rinnovabile

Trend temporali dell'inventario delle emissioni di Ispra per COVnm, PM, NO_x, NH₃, SO₂

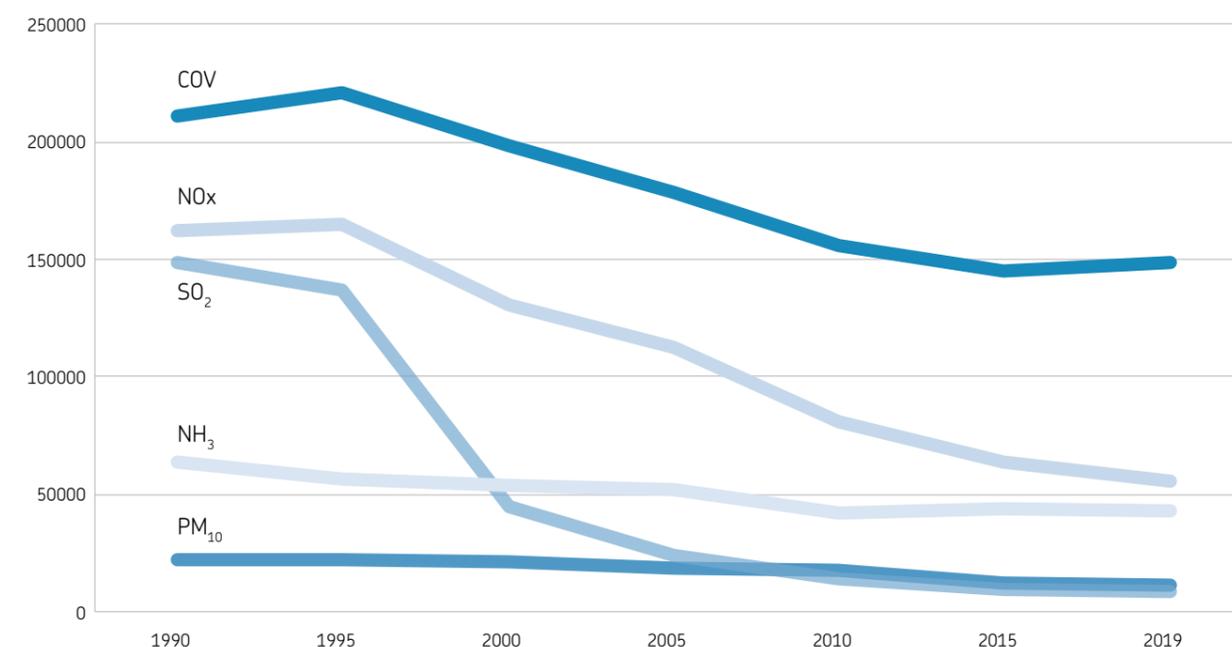
Nel periodo 1990-2019, le emissioni di quasi tutti gli inquinanti mostrano una tendenza al ribasso, come evidenziato dai dati dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (Ispra).

A livello regionale le riduzioni complessive sono particolarmente rilevanti per i principali inquinanti primari (SO_x -94%; NO_x -65%; PM₁₀ -49%; NH₃ -33%; COVnm -29%) nel 2019 rispetto al 1990.

I principali driver sovra-regionali del trend sono le riduzioni nei settori industriale e dell'autotrasporto, dovute all'implementazione di diverse Direttive Europee che hanno introdotto nuove tecnologie, limiti di emissione degli impianti, limitazione del contenuto di zolfo nei combustibili liquidi e passaggio a combustibili più puliti.

Le emissioni sono diminuite anche per il miglioramento dell'efficienza energetica e per la promozione delle energie rinnovabili.

FIGURA 3
Andamenti delle emissioni regionali dei principali macroinquinanti dal 1990 al 2019 (dati Ispra)



Inventario delle emissioni di gas serra 2020

A tutte le scale, le politiche in materia di clima ed energia sono chiamate a fornire un contributo efficace per il raggiungimento della neutralità carbonica “prima del 2050”.

L'inventario dei gas serra rappresenta la base conoscitiva imprescindibile per il raggiungimento di questo obiettivo.

L'inventario delle emissioni di gas climalteranti, riferito all'anno 2020, è stato compilato secondo la metodologia IPCC “Guidelines for national greenhouse gas inventories” (aggiornato al 2019). La metodologia IPCC prevede una stima delle emissioni e della rimozione di gas serra secondo 5 settori principali, in cui sono raggruppate sia le fonti emissive, sia i processi di stoccaggio di carbonio.

In **tabella 3** si riporta, per ciascun settore IPCC, la descrizione delle attività valutate in correlazione con i macrosettori SNAP (*Selected Nomenclature for sources of Air Pollution*), previsti dalla metodologia EMEP-CORINAIR, che costituisce il riferimento per la valutazione delle emissioni in atmosfera delle sostanze inquinanti.

I **gas climalteranti** (GHG - Greenhouse Gases), **responsabili dell'aumento dell'effetto serra naturale**, stimati nell'ambito dell'inventario, sono **anidride carbonica CO₂, metano CH₄ e protossido di azoto N₂O**. Questi gas non hanno lo stesso comportamento nei confronti del riscaldamento della terra. Il potenziale di riscaldamento, infatti, viene espresso in termini di CO₂eq. Ciascuno di questi gas concorre alla CO₂eq in base al proprio specifico “potere climalterante” (GWP - *Global Warming Potential*) che sostanzialmente corrisponde alla “capacità serra” di quel composto in relazione al potere climalterante della CO₂, convenzionalmente posto uguale a 1, lungo un intervallo temporale che normalmente è di 100 anni.

Ai fini della presente quantificazione della CO₂eq sono stati utilizzati i valori di GWP, per ciascun composto, proposti nel V rapporto IPCC.

$$CO_2eq (kt) = CO_2 + 265 * N_2O + 28 * CH_4$$

Seppur, CH₄ e N₂O, abbiano un «potere climalterante» molto più alto della CO₂, è proprio quest'ultima ad essere il principale e più rilevante gas ad effetto serra, contribuendo praticamente al 99% delle emissioni, in ragione delle quantità emesse.



I gas climalteranti sono: anidride carbonica, metano, protossido di azoto



Il principale gas climalterante: anidride carbonica

TABELLA 3
Settori IPCC - Macrosettori Corinair

SECTOR IPCC	ATTIVITÀ	MACROSETTORI CORINAIR
Energia	<ul style="list-style-type: none"> • esplorazione e sfruttamento di fonti energetiche primarie; • conversione delle fonti energetiche primarie in forme energetiche più utilizzabili nelle raffinerie e nelle centrali elettriche; • trasmissione e distribuzione di carburanti; • utilizzo di combustibili nelle attività produttive, nei trasporti ed in sistemi destinati al riscaldamento 	 MS1 - Produzione di energia e trasformazione di combustibili  MS2 - Combustione non industriale  MS3 - Combustione industriale  MS5 - Estrazione e distribuzione di combustibili  MS7 - Trasporto su strada  MS8 - Altre sorgenti mobili e macchinari
Processi industriali ed uso di prodotti (IPPU)	<ul style="list-style-type: none"> • processi industriali, dall'uso di gas serra nei prodotti, e da usi non energetici del carbonio da combustibili fossili 	 MS4 - Processi Produttivi  MS6 - Uso di solventi
Agricoltura, foresta e altri usi del suolo (AFOLU)	<ul style="list-style-type: none"> • coltivazioni agricole • zone umide gestite e terreni allagati • zootecnia (fermentazione enterica) e sistemi di gestione del letame; • C-stock associato ai prodotti legnosi raccolti 	 MS10 - Agricoltura  MS11 - Altre sorgenti e assorbimenti
Rifiuti		 MS9 - Trattamento e smaltimento rifiuti
Altro	<ul style="list-style-type: none"> • emissioni indirette da depositi di azoto da fonti non agricole 	

Settore Energia

Le emissioni relative al settore Energia sono dovute alle attività di **combustione sia di combustibili fossili, sia di biomasse** (responsabili del solo contributo in termini di emissioni di CH₄). Le emissioni dei gas sono linearmente correlate ai consumi di combustibile, per ciascuna attività e per vettore energetico.

I dati di base utilizzati sono i consumi energetici elaborati da ARPAE nell'ambito del Bilancio Energetico Regionale (BER).

Settore IPPU

Il settore IPPU stima le emissioni derivanti dai **processi industriali di produzione**, ovvero le emissioni legate alla produzione di un dato bene materiale. Si stimano quindi le emissioni dovute ai processi di fabbricazione del vetro, del cemento e dell'industria chimica.

Settore AFOLU

Il settore agricoltura contribuisce all'effetto serra con emissioni di metano (CH₄), legate principalmente all'attività di **produzione zootecnica**, e di protossido di azoto (N₂O), derivante principalmente dalle **colture fertilizzate**.

Le emissioni derivanti dalle attività zootecniche sono dovute all'attività di fermentazione enterica e di gestione delle deiezioni (composti azotati). Le emissioni di N₂O da suoli agricoli derivano dall'azoto somministrato con concimi minerali, stimato sulla base del contenuto di azoto per i diversi tipi di fertilizzante.

Settore rifiuti

Per quanto concerne invece il settore del **trattamento rifiuti**, analogamente al settore Energia, le emissioni sono state calcolate secondo la metodologia IPCC che basa tale valutazione in funzione dell'origine del carbonio contenuto nel rifiuto trattato e della tecnica di trattamento dello stesso (le tipologie considerate sono: discariche e termovalorizzatori).

Il bilancio GHG riferito agli impianti di termovalorizzazione ha lo scopo di determinare il loro contributo, in termini di produzione di gas serra, considerando da un lato le emissioni dirette prodotte dalla combustione dei rifiuti (tenendo conto della percentuale di carbonio rinnovabile) e, dall'altro, le emissioni evitate dal recupero di energia effettuato in tali impianti.

Ai fini dei calcoli di seguito riportati, per emissioni dirette ed evitate si intende:

- emissioni dirette: emissioni di CO₂ di origine fossile, di N₂O e CH₄ derivanti direttamente dal processo di combustione (ovvero le emissioni al camino, determinate dal processo di combustione dei rifiuti);
- emissioni evitate: emissioni costituite complessivamente dalla CO₂eq determinata dalla energia elettrica e termica prodotte dal termovalorizzatore attraverso una diversa tipologia impiantistica (per la quota parte di energia elettrica si fa riferimento al mix energetico nazionale e per quella termica si considera un impianto alimentato a gas naturale)



Settore energia:
stima le emissioni derivanti dalla combustione di combustibili fossili e biomasse



Settore IPPU:
stima le emissioni derivanti dai processi industriali di produzione



Settore AFOLU:
stima le emissioni derivanti da coltivazioni agricole e attività zootecnica



Settore rifiuti:
stima le emissioni derivanti dal trattamento dei rifiuti

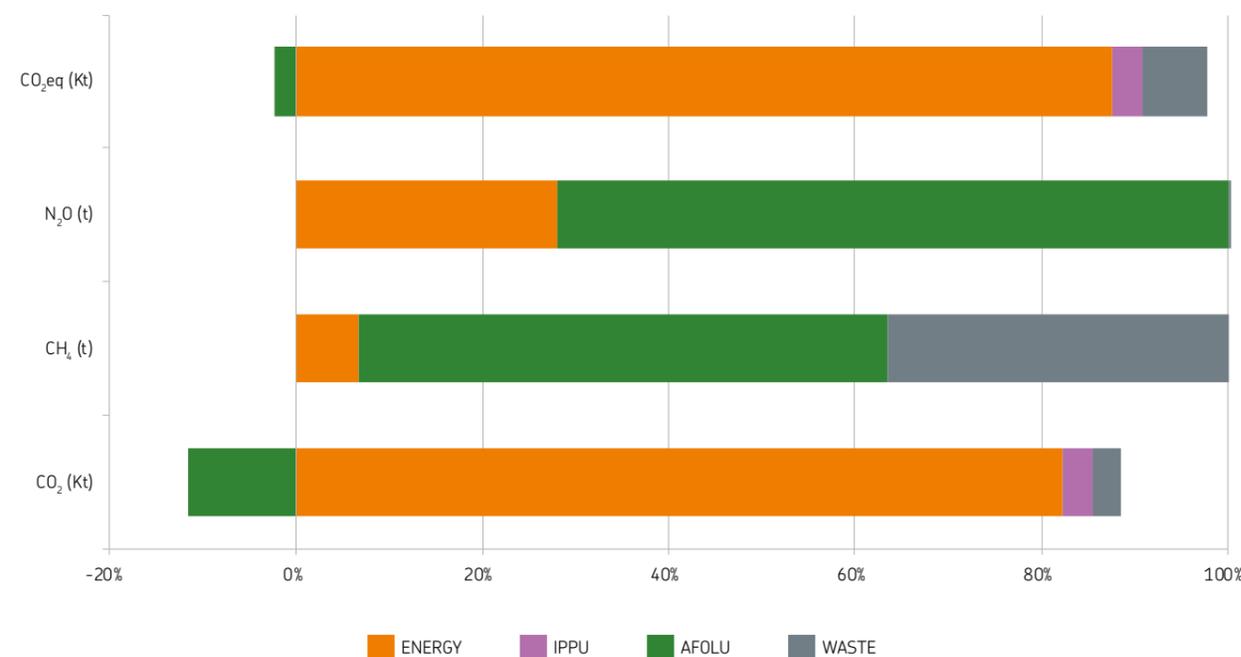
Le emissioni dei gas serra, relativamente all'anno 2020, per la Regione Emilia-Romagna sono complessivamente 37.344 Kt CO₂eq.

TABELLA 4
Ripartizione delle emissioni di gas serra dell'Emilia-Romagna per settori IPCC (2020)

	CO ₂ (kt)	CH ₄ (t)	N ₂ O (t)	CO ₂ eq (kt)
ENERGY	29.621	8.520	2.033	30.398
IPPU	1.155	0	0	1.155
AFOLU	-4.123	71.073	5.207	-753
WASTE	1.148	45.619	4	2.427
TOTALE	27.801	125.213	7.245	33.226
TOTALE (-C STOCK)	31.924	125.033	7.242	37.344

Fonte: Arpae, Emilia-Romagna

FIGURA 4
Contributi alle emissioni GHG in Emilia-Romagna (Bilancio GHG 2020) per settore IPCC



Dall'analisi dei risultati riportati in **tabella 4** risulta evidente che **il settore energia è responsabile del 83% delle emissioni di CO₂**; rispetto invece alle emissioni di CO₂eq, il settore energia contribuisce per 87%.

Il settore AFOLU che valuta le emissioni derivanti dalle attività agro zootecniche e forestali, rappresenta il 57% delle emissioni di metano e il 64% di quelle di N₂O.

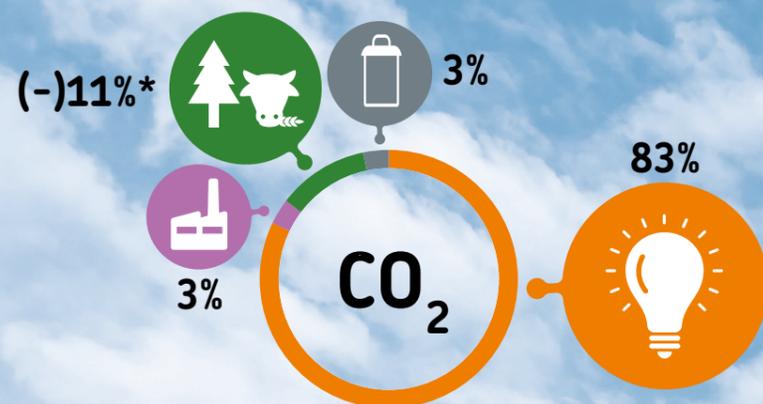
Il contributo emissivo in termini di CO₂eq del settore AFOLU è dato dalle attività zootecniche, responsabili di elevate emissioni di CH₄, e dalle emissioni del settore agro forestale e uso del suolo che invece svolge un ruolo di stoccaggio del carbonio computato come rimozione di CO₂ dall'atmosfera.



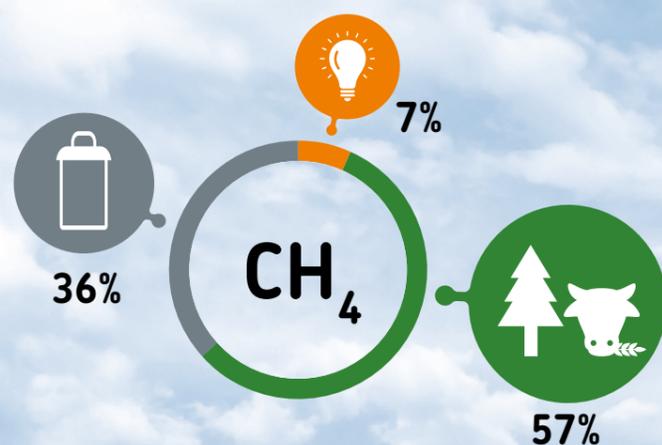
Settore energia:
è responsabile del 83% delle emissioni di CO₂

LE EMISSIONI DI GAS SERRA IN EMILIA-ROMAGNA (2020): CO₂, CH₄, N₂O

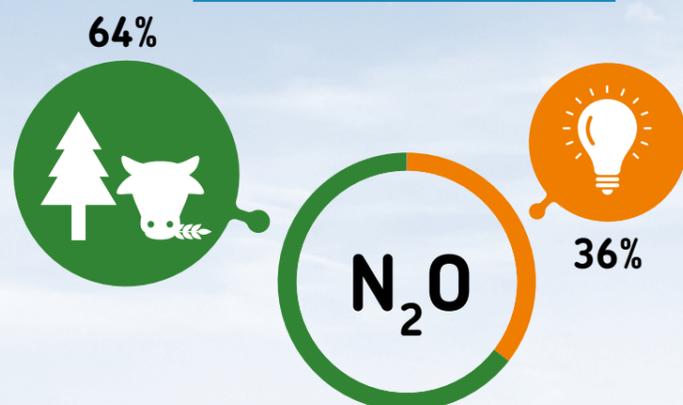
ANIDRIDE CARBONICA



METANO

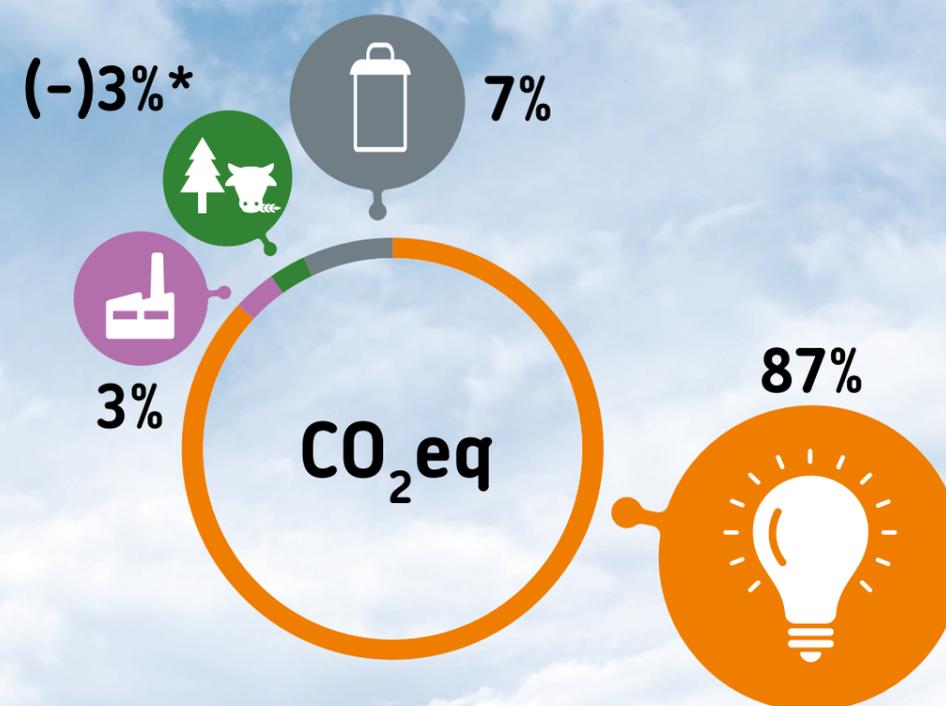


PROTOSSIDO DI AZOTO



LE EMISSIONI DI GAS SERRA IN EMILIA-ROMAGNA (2020) ESPRESSE IN TERMINI DI CO₂eq

ANIDRIDE CARBONICA eq



$$CO_2eq \text{ (kt)} = CO_2 + 265 * N_2O + 28 * CH_4$$



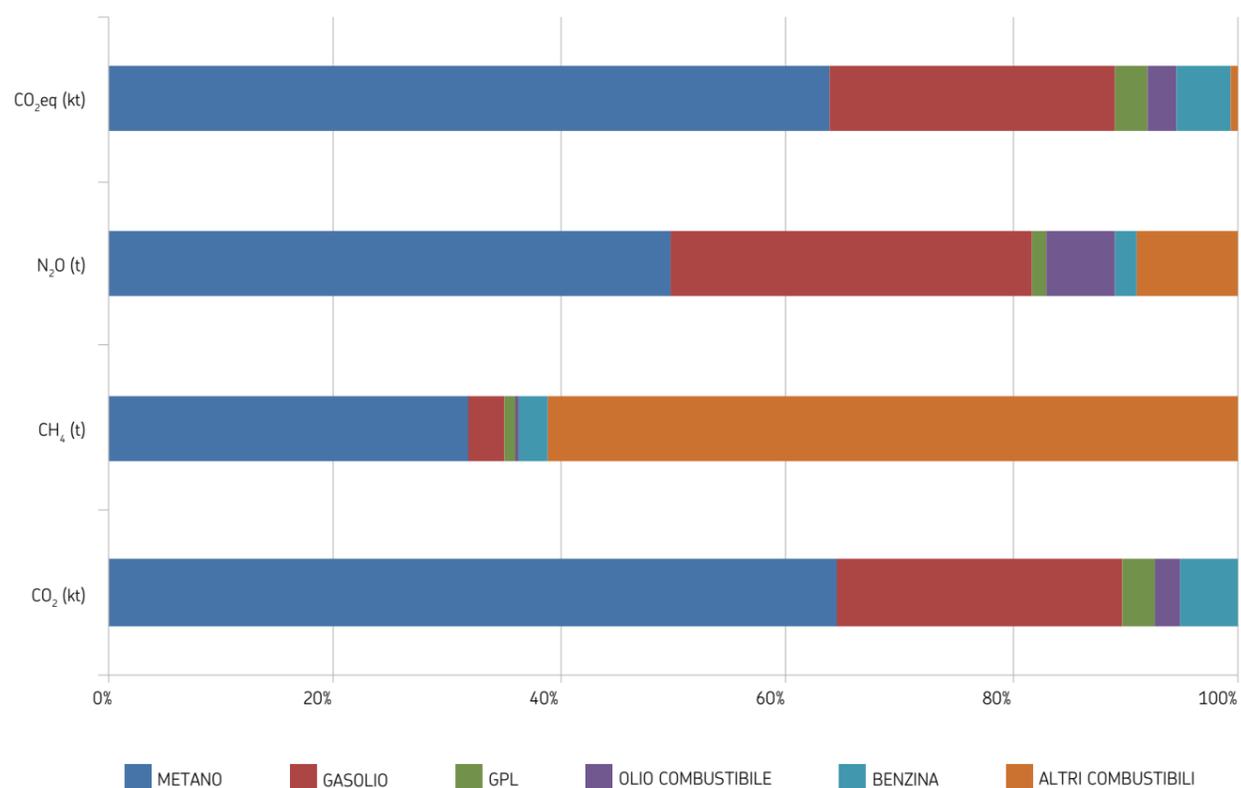
* Il contributo del settore AFOLU è sempre considerato positivo nel calcolo del suo peso in termini di percentuale, ai sensi della metodologia IPCC

Analizzando il contributo emissivo per vettore energetico riportato in **figura 5**, emerge che il combustibile maggiormente responsabile delle emissioni di CO₂eq è il **metano** (64%), seguito dal **gasolio** (25%). Da tale analisi risulta evidente che anche la combustione della biomassa contribuisce alle emissioni di CO₂eq in quanto responsabile delle emissioni di CH₄ e N₂O.

TABELLA 5
Contributi alle emissioni GHG Emilia-Romagna per vettore energetico (2020)

	CO ₂ (kt)	CH ₄ (t)	N ₂ O (t)	CO ₂ eq (kt)
METANO	19.017	2.703	1.011	19.361
GASOLIO	7.445	273	649	7.624
GPL	841	94	28	851
OLIO COMBUSTIBILE	701	27	126	735
BENZINA	1.455	203	38	1.471
ALTRI COMBUSTIBILI	0	5.175	181	193
	29.459	8.475	2.033	30.235

FIGURA 5
Ripartizione percentuale delle emissioni dei GHG per vettore energetico (2020)



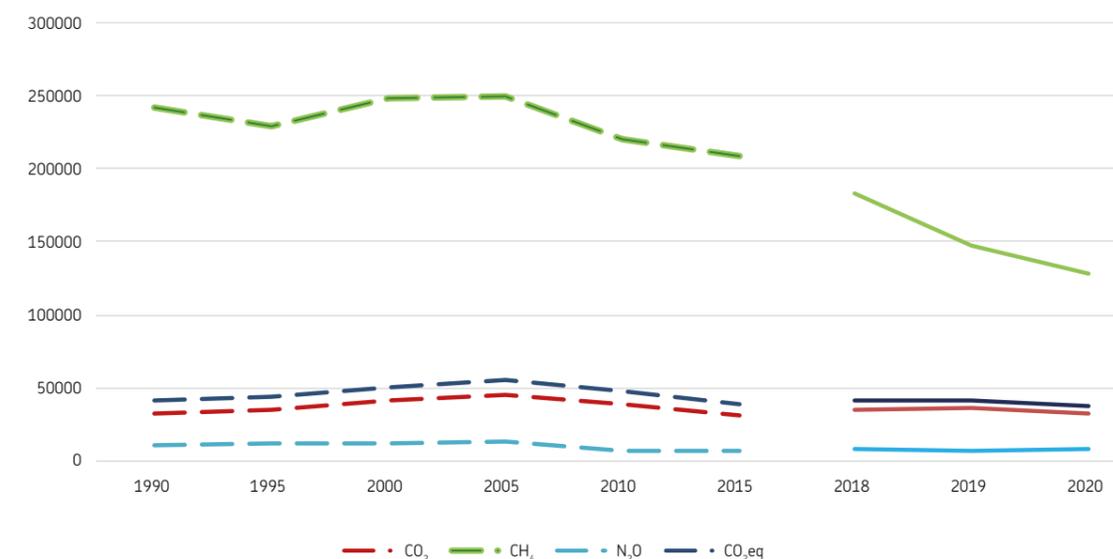
Analisi trend emissivo

Infine, per valutare l'andamento negli anni (1990-2020) delle emissioni di GHG si riporta in **figura 6** il trend dei gas serra costruito con i dati regionali elaborati nell'ambito dell'Inventario Nazionale (ISPRA) per le annualità che vanno dall'anno 1990 all'anno 2017 e i dati relativi all'Inventario Regionale GHG (ARPAE) per gli anni dal 2018 al 2020. **Nell'anno 2020 si riscontra una forte riduzione delle emissioni dei gas serra pari a -9% rispetto alle emissioni stimate per l'anno 2019 e del 10% rispetto alle emissioni riferite all'anno 1990.**



Nel 2020:
si assiste a una riduzione delle emissioni di CO₂eq pari al 9% rispetto al 2019 e del 10% rispetto al 1990

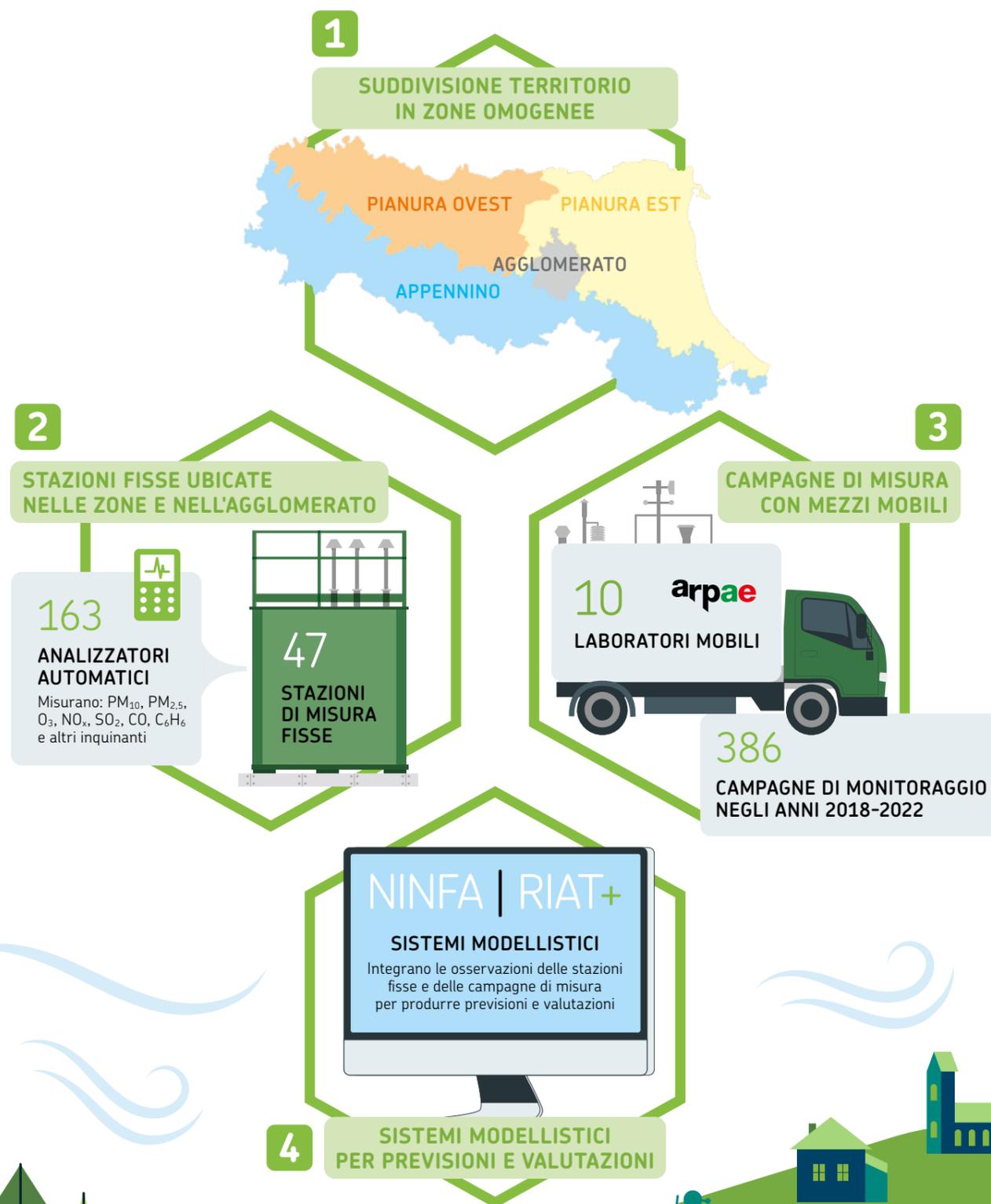
FIGURA 6
Trend emissioni regionali GHG (ISPRA 1990-2017; ARPAE 2018-2020)



3

Zonizzazione, monitoraggio e valutazione

Pillole | “Conoscere lo stato dell’aria”



La zonizzazione del territorio regionale

La Direttiva 2008/50/CE, recepita dal **Dlgs 155/2010**, prevede che gli Stati Membri adottino una **zonizzazione del territorio ai fini della valutazione della qualità dell'aria**. In Italia la zonizzazione, ai fini della protezione della salute, è stata adottata da tutte le Regioni e le Province Autonome. La zonizzazione definisce le unità territoriali **“zone”** e **“agglomerati”**, a partire da un'analisi degli elementi del contesto territoriale e socio-economico (urbanizzazione del territorio, densità abitativa, caratteristiche orografiche e meteo-climatiche del territorio), unitamente all'analisi del carico emissivo. Sulla base di tale analisi, vengono individuate aree in cui uno o più di tali elementi, che sono predominanti nel determinare i livelli degli inquinanti, sono omogenei. Le unità territoriali così definite sono, poi, periodicamente classificate ai fini della valutazione della qualità dell'aria, secondo quanto dettato dall'articolo 4 e Allegato II del DLgs 155/2010.

Con la **zonizzazione regionale**, approvata con DGR 2001/2011, il territorio è stato ripartito in un **agglomerato**, relativo a **Bologna** e ai **comuni limitrofi**, e in **tre zone di qualità dell'aria** (**Appennino**, **Pianura est**, **Pianura ovest**, *figura 1*). Anche con le successive fusioni e aggregazioni di comuni da altre regioni, non sono intervenute variazioni ai presupposti su cui è basata tale zonizzazione, che pertanto rimane invariata.

”

Zonizzazione (Dlgs 155/2010):
adozione di unità territoriali
“omogenee” per la valutazione
della qualità dell'aria

”

Zonizzazione Emilia-Romagna:
- 1 agglomerato
(Bologna e comuni limitrofi)
- 3 zone
(Appennino, Pianura est,
Pianura ovest)

Presso un numero selezionato di stazioni, che misurano inquinanti ai fini della protezione della salute umana, è attivo anche il monitoraggio degli inquinanti rilevanti ai fini della protezione della vegetazione. I dati raccolti sono oggetto di reporting ai sensi della Decisione 2011/850/UE; tuttavia **non** sono state ancora **individuate specifiche zone per la protezione della vegetazione e degli ecosistemi** da parte degli Enti competenti. La zonizzazione relativa alla valutazione della qualità dell'aria con riferimento alla vegetazione e agli ecosistemi non corrisponde, necessariamente, a quella relativa alla valutazione della qualità dell'aria con riferimento alla salute umana. A livello nazionale, si sta portando avanti l'attività finalizzata alla definizione e predisposizione della zonizzazione per la protezione della vegetazione e degli ecosistemi.

”

Zonizzazione regionale protezione vegetazione ed ecosistemi:
in corso di definizione

FIGURA 1
La zonizzazione della regione Emilia-Romagna



La rete di monitoraggio

La rete regionale per la valutazione della qualità dell'aria risulta composta da **47 punti di misura in siti fissi**, con un totale di 163 analizzatori automatici per gli inquinanti principali: particolato (PM₁₀, PM_{2,5}), biossido di azoto (NO₂), ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), BTX (benzene, toluene, etilbenzene, xileni), biossido di zolfo (SO₂), ozono (O₃). La rete è completata da altri sensori di microinquinanti, da 10 laboratori mobili e numerose unità mobili per la realizzazione di campagne di valutazione. "I filtri campionati per la misura del particolato atmosferico, derivanti da alcune stazioni, vengono sottoposti ad analisi chimiche di laboratorio per la determinazione delle concentrazioni di Metalli (Nichel, Piombo, Cadmio, Arsenico) e Idrocarburi Policiclici aromatici (IPA).

L'ultimo aggiornamento della configurazione risale al gennaio 2020, a seguito del riesame del Programma di valutazione, effettuato nel 2017 e approvato dalla Giunta regionale a luglio 2019; tale assetto continua a soddisfare nel tempo sia i criteri normativi (Allegati III, V, VIII, IX, Appendice II del DLgs 155/2010), sia le esigenze modellistiche e di rappresentatività del territorio.

La rete di monitoraggio è, inoltre, certificata secondo la norma UNI EN ISO 9001:2015 ed è sottoposta a un regolare programma di controllo di qualità.

Delle 47 stazioni appartenenti alla rete regionale, **4** sono ubicate nell'**Agglomerato di Bologna**, **18** sono situate nella **zona Pianura ovest**, **20** nella **zona Pianura est**, **5** nella **zona Appennino** (figura 2). Le stazioni di misurazione di traffico sono 12 e sono posizionate nei capoluoghi e in centri urbani in prossimità di strade ad alto traffico e hanno lo scopo di rilevare gli inquinanti emessi dal traffico veicolare;



Numero stazioni della rete di monitoraggio:
47 siti fissi



Le 47 stazioni sul territorio:
18 Pianura ovest
20 Pianura est
4 Agglomerato Bologna
5 Appennino



in tutte vengono rilevati PM₁₀ e ossidi di azoto, mentre in aggiunta in 5 di queste vengono monitorati anche il monossido di carbonio e in 9 il benzene. Le stazioni di fondo urbano e suburbano sono in totale 21 e sono posizionate in aree urbane, all'interno di parchi o aree verdi, e hanno lo scopo di rilevare i livelli di **inquinamento di fondo** (inteso come contributo integrato di tutte le fonti di emissione) presenti in ambiente **urbano**. In queste stazioni, oltre al PM₁₀ e agli ossidi di azoto, si rilevano anche ozono e PM_{2,5}. Le restanti stazioni, di fondo rurale, sono 14 e sono invece posizionate al di fuori delle città, al fine di definire i livelli di **inquinamento di fondo** presenti in **aree rurali**, lontano da fonti dirette di emissione. I dati delle stazioni di fondo vengono usati nel modulo di post processamento statistico integrato alla catena modellistica operativa NINFA, al fine di ottenere una distribuzione territoriale delle concentrazioni degli inquinanti principali (PM₁₀, PM_{2,5}, biossido d'azoto e ozono) sull'intero territorio regionale.

La strumentazione impiegata nella rete di monitoraggio è relativamente nuova e caratterizzata da un buon rendimento in termini di efficienza. L'assicurazione di qualità del dato è effettuata secondo i controlli QA/QC (Assicurazione Qualità/Controllo Qualità) previsti dalle Linee guida nazionali (LG SNPA - 37/2021), dal Decreto ministeriale (DM 30 marzo 2017) e dalle Norme tecniche relative al monitoraggio della qualità dell'aria, nonché attraverso procedure interne di controllo registrate secondo la ISO 9001.

La **gestione della rete della qualità dell'aria** è uno dei **processi in certificazione UNI EN ISO 9001 di Arpae**. Il sistema di controllo qualità, attraverso una sistematica azione di documentazione delle procedure, controllo e verifica, garantisce il mantenimento degli standard stabiliti dalla certificazione.

Nella tabella qui di seguito viene riportata, in dettaglio, la dotazione strumentale delle stazioni della rete regionale al 1 gennaio 2023 (tabella 1).



Processo certificato:
procedura UNI EN ISO 9001
per la gestione della rete
di qualità dell'aria

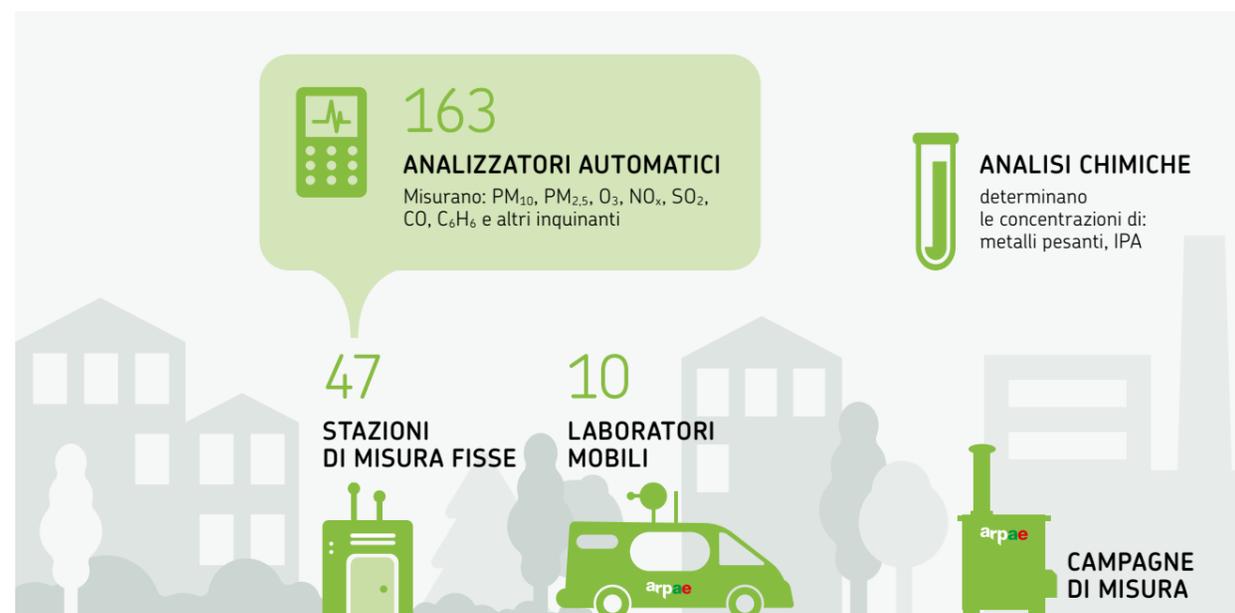
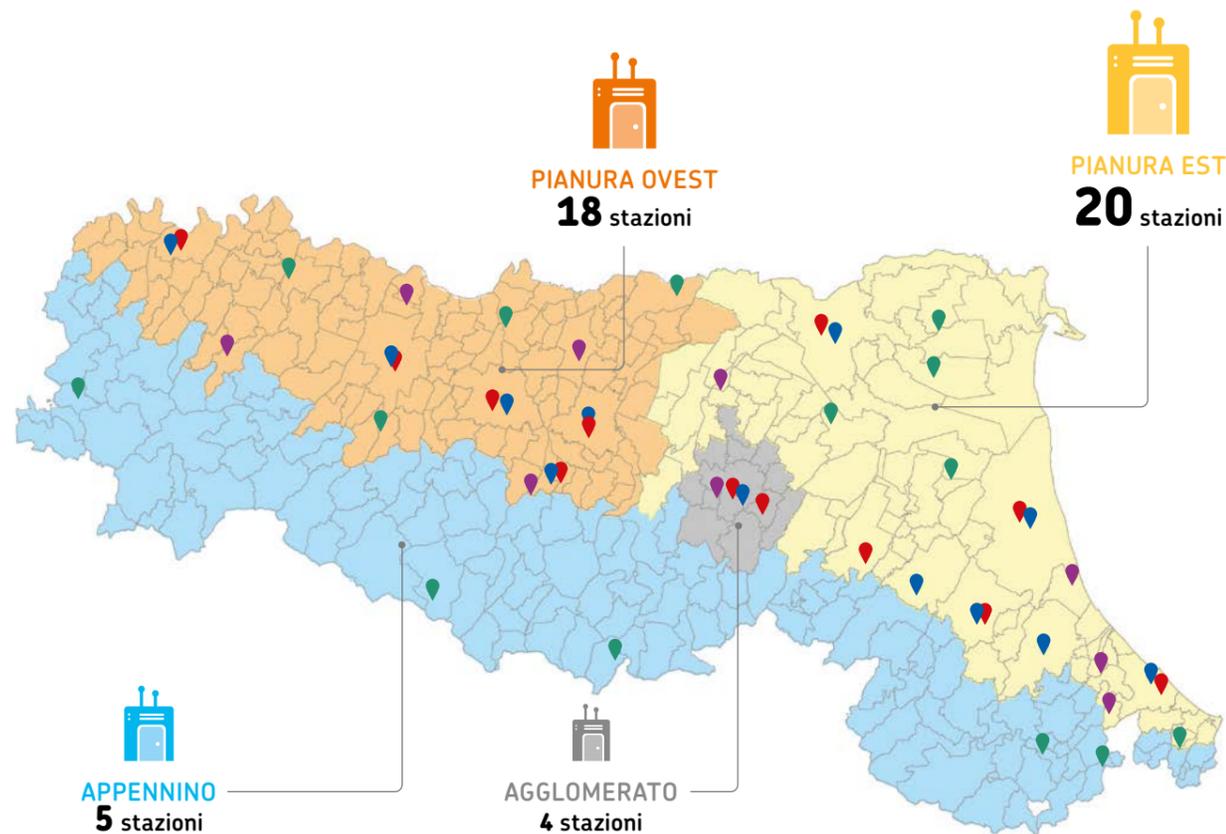


FIGURA 2 Le stazioni della rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria e la zonizzazione al 2023 (agglomerato di Bologna, Appennino, Pianura ovest, Pianura est)



<p>12 STAZIONI DI TRAFFICO URBANO</p> <p>DOVE: in prossimità di strade a medio/alto traffico</p> <p>PERCHÉ: rilevare gli inquinanti in prossimità di hotspots</p>	<p>12 STAZIONI DI FONDO URBANO</p> <p>DOVE: nelle aree urbane non sottoposte a fonti emissive specifiche</p> <p>PERCHÉ: rilevare i livelli di inquinamento di fondo in città</p>	<p>9 STAZIONI DI FONDO SUBURBANO</p> <p>DOVE: fuori dai capoluoghi, in aree suburbane, parzialmente edificate</p> <p>PERCHÉ: definire i livelli di inquinanti in zone non completamente urbanizzate</p>	<p>14 STAZIONI DI FONDO RURALE</p> <p>DOVE: in aree rurali, distanti dalle fonti di emissione</p> <p>PERCHÉ: definire i livelli di inquinamento di fondo presenti in regione, lontano da fonti dirette di emissione</p>
--	---	--	--

TABELLA 1 Rete di misura prevista dal Programma di Valutazione

COMUNE	NOME STAZIONE	TIPO STAZIONE	NO ₂	NO _x veg**	PM ₁₀	PM _{2,5}	O ₃ sal*	O ₃ veg**	C ₆ H ₆	CO	SO ₂	Pb	As	Ni	Cd	BaP
Bologna	Via Chiarini	Stazione di Fondo Urbano	●		●		●									
Bologna	Giardini Margherita	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●					●	●	●	●	●
Bologna	Porta San Felice	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●			●	●						
S. Lazzaro Di Savena	San Lazzaro	Stazione di Fondo Urbano	●		●											
Corte Brugnatella	Corte Brugnatella	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●	●								
Villa Minozzo	Febbio	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●	●								
Porretta Terme	Castelluccio	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●	●								
Sogliano	Savignano Di Rigo	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●	●								
San Leo	San Leo	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●	●								
Piacenza	Giordani - Farnese	Stazione di Fondo Urbano	●		●				●	●						
Piacenza	Parco Montecucco	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●									
Lugagnano Val D'arda	Lugagnano	Stazione di Fondo Urbano	●		●		●									
Besenzone	Besenzone	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●									
Parma	Montebello	Stazione di Fondo Urbano	●		●				●							
Parma	Cittadella	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●					●	●	●	●	●
Colorno	Saragat	Stazione di Fondo Urbano	●		●		●									
Langhirano	Badia	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●	●								
Reggio Emilia	S. Lazzaro	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●									
Reggio Emilia	Timavo	Stazione di Fondo Urbano	●		●				●	●						
Castellarano	Castellarano	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●									
Guastalla	San Rocco	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●	●								
Modena	Giardini	Stazione di Fondo Urbano	●		●				●							
Modena	Parco Ferrari	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●						●	●	●	●
Carpi	Remesina	Stazione di Fondo Urbano	●		●		●									
Fiorano Modenese	Circ. San Francesco	Stazione di Fondo Urbano	●		●											
Sassuolo	Parco Edilcarani	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●									
Mirandola	Gavello	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●	●								
Imola	De Amicis	Stazione di Fondo Urbano	●		●											
Molinella	S. Pietro Capofume	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●	●								
Ferrara	Isonzo	Stazione di Fondo Urbano	●		●				●			●	●	●	●	●
Ferrara	Villa Fulvia	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●									
Cento	Cento	Stazione di Fondo Urbano	●		●		●									
Jolanda Di Savoia	Gherardi	Stazione di Fondo Urbano	●	●	●	●	●	●								
Ostellato	Ostellato	Stazione di Fondo Urbano	●	●		●	●	●								
Ravenna	Caorle	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●				●					
Ravenna	Zalamella	Stazione di Fondo Urbano	●		●				●	●						
Faenza	Parco Bertozzi	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●									
Cervia	Delta Cervia	Stazione di Fondo Urbano	●		●		●									
Alfonsine	Ballirana	Stazione di Fondo Urbano	●	●		●	●	●								
Forlì	Parco Resistenza	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●									
Forlì	Roma	Stazione di Fondo Urbano	●		●				●							
Cesena	Franchini Angeloni	Stazione di Fondo Urbano	●		●											
Savignano Rubicone	Savignano	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●									
Rimini	Flaminia	Stazione di Fondo Urbano	●		●				●	●						
Rimini	Marecchia	Stazione di Fondo Urbano	●		●	●	●					●	●	●	●	●
Verrucchio	Verucchio	Stazione di Fondo Urbano	●		●		●									
San Clemente	San Clemente	Stazione di Fondo Urbano	●	●		●	●	●								
TOTALE			47	14	43	24	34	14	9	5	1	5	5	5	5	5

LEGENDA: ■ Agglomerato ■ Appennino ■ Pianura Ovest ■ Pianura Est ● Punti di campionamento

🚗 Stazione di Traffico Urbano 🏠 Stazione di Fondo Urbano 🏡 Stazione di Fondo Suburbano 🌳 Stazione di Fondo Rurale

* salute
** vegetazione

I laboratori mobili di Arpae

I dati rilevati dalle stazioni fisse della rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria vengono integrati da Arpae con le misure provenienti da **dieci laboratori mobili, attrezzati per rilevare i principali inquinanti atmosferici**: biossido di azoto, monossido di carbonio, biossido di zolfo, particolato PM_{2,5}, PM₁₀, benzene, etilbenzene, xileni, toluene, ozono, metalli pesanti, IPA e alcuni parametri meteorologici quali temperatura, umidità, pioggia, direzione e velocità del vento. Con questi mezzi sono svolte campagne utili per misurare i livelli di inquinamento atmosferico presenti in aree di interesse (ai sensi del Dlgs 155/2010) e per indagini su richiesta a supporto tecnico degli enti locali (amministrazioni Comunali).

Dalla sua istituzione **Arpae ha effettuato quasi 2.000 campagne di monitoraggio della qualità dell'aria che hanno visto l'uso di laboratori mobili**, della durata di circa un mese l'una (tabella 2). Solitamente l'attività si basa su una programmazione annuale che tiene conto delle sollecitazioni e richieste che provengono dalle amministrazioni comunali e/o di altri portatori d'interesse, per indagare particolari situazioni di disagio ambientale, oppure, su richiesta di Arpae, per approfondimenti di varia natura ritenuti utili per una migliore comprensione e analisi dei dati inerenti l'inquinamento atmosferico locale.



N. laboratori mobili di Arpae: 10, utilizzati per rilevare i principali inquinanti atmosferici



2000 campagne di monitoraggio in cui Arpae ha impiegato laboratori mobili

TABELLA 2
Tabella quantitativa delle indagini effettuate

	CAMPAGNE DI MONITORAGGIO COMPLESSIVE EFFETTUATE DA ARPAE 1996-2022	CAMPAGNE DI MONITORAGGIO EFFETTUATE DA ARPAE NEL QUINQUENNIO 2018-2022
PIACENZA	238	59
PARMA	215	37
REGGIO EMILIA	240	58
MODENA	372	51
BOLOGNA	132	39
FERRARA	85	6
FORLÌ-CESENA	150	26
RAVENNA	304	74
RIMINI	210	36
TOTALI	1946	386

L'individuazione, di volta in volta, del sito di misura è strettamente connessa agli obiettivi che la campagna di monitoraggio vuole perseguire, tenendo conto di molteplici aspetti quali: sorgenti inquinanti puntuali, lineari e diffuse, contesto urbanistico, traffico, densità di popolazione, parametri meteorologici, stagionalità, ecc. In specifiche circostanze la rilevazione effettuata con il laboratorio mobile è affiancata da altre misure che prevedono l'impiego di campionatori passivi, campionatori attivi di polveri, rilevazioni radar di traffico, sensori di varia natura. In situazioni complesse si può ricorrere anche all'utilizzo di specifici modelli matematici per lo studio della diffusione degli inquinanti.

I laboratori mobili sono stati impiegati anche per partecipare a diversi progetti di ricerca europei, in collaborazione con le Università; fra i più recenti si citano iScape, Life Urban Proof, Horizon 2020 iChange, i risultati dei quali sono stati presentati in diversi convegni scientifici nazionali e oggetto di pubblicazioni.

Si riporta la mappa del totale delle campagne svolte con laboratorio mobile nel quinquennio 2018-2022 sul territorio regionale (figura 3). Come si può intuire, il numero più elevato di campagne ha interessato aree territoriali maggiormente antropizzate, dove le emissioni sono superiori: queste zone sono per lo più localizzate nella pianura e pedecollina.



FIGURA 3
Campagne effettuate nel quinquennio 2018-2022



(Mappa estratta dal sito Arpae: <https://www.arpae.it/temi-ambientali/aria/report-aria/dati-laboratori-mobili>)

La “rete ricerca” di monitoraggio

La rete di monitoraggio della qualità dell'aria si è arricchita di numerose misure di approfondimento, non strettamente previste dalla normativa in vigore, ma utili per accrescere la comprensione dei meccanismi di formazione e accumulo degli inquinanti. Tali misure sono utilizzate inoltre per studiare il ruolo delle sorgenti attraverso osservazioni che vanno ad integrare le informazioni fornite dagli inventari delle emissioni.

Il sito principale in cui è svolta la maggior parte di queste misure e che è stato coinvolto in numerosi progetti di ricerca è posizionato in via Gobetti a Bologna, all'interno dell'area della ricerca del CNR. In questa stazione di misura, che nasce come “Mainsite” del progetto Supersito della Regione Emilia-Romagna e Arpa, sono disponibili serie storiche giornaliere di composizione chimica del $PM_{2,5}$, dal 2011, e del PM_{10} , dal 2018. Sempre dal 2018 sono disponibili dati orari di black carbon, mentre la concentrazione numerica delle particelle e la distribuzione dimensionale dell'aerosol viene registrata dal 2012. A questi dati si sono aggiunte nel tempo numerose informazioni provenienti da campagne di misura che hanno riguardato, per fare alcuni esempi, la composizione del PM_1 oraria, le concentrazioni di diversi composti organici presenti nel particolato, le caratteristiche tossicologiche dell'aerosol o il suo potenziale ossidativo.

Sforzi per accrescere le conoscenze disponibili sugli inquinanti atmosferici con **misure innovative** non si sono limitati al solo sito principale di Bologna, ma hanno **interessato tutta la regione**. Dal 2011 sono disponibili informazioni sulla composizione chimica del $PM_{2,5}$ nei siti di fondo urbano di Parma (Cittadella) e Rimini (Marecchia), oltre che nel sito di fondo rurale di S. Pietro Capofiume (BO). Nel sito di S. Pietro Capofiume, inoltre, è monitorata, dal 2017, la concentrazione dell'ammoniaca che, pur non essendo normata dalla legislazione sulla qualità dell'aria, è un gas che svolge un ruolo chiave come precursore dell'aerosol atmosferico.

Nel 2023 sono stati installati ulteriori misuratori di black carbon, in modo da creare una rete di misure di questo importante parametro indicativo delle combustioni antropiche che coprisse, oltre al già citato sito di Bologna, anche i fondi urbani di Piacenza (Parco Montecucco), Reggio dell'Emilia (San Lazzaro), Modena (Parco Ferrari) e Ravenna (Caorle). Sempre nel 2023, sono stati installati **contatori ottici di particelle** in grado di fornire dati, certificati equivalenti a quelli previsti dalla normativa, sulla concentrazione oraria del particolato atmosferico per avere la disponibilità di informazioni sullo sviluppo nell'arco della giornata di PM_1 , $PM_{2,5}$ e PM_{10} . Questi sistemi di misura sono stati collocati in 9 fondi urbani della regione: Piacenza (Parco Montecucco), Parma (Cittadella), Reggio dell'Emilia (San Lazzaro), Modena (Parco Ferrari), Ferrara (Villa Fulvia), Bologna (Giardini Margherita), Forlì (Parco Resistenza), Ravenna (Caorle) e Rimini (Marecchia).

Infine, nel corso del 2023, è stato installato un misuratore di VOC precursore dell'Ozono, presso la stazione di Reggio San Lazzaro. A prescindere dalle misure eseguite in continuo, numerose **campagne di approfondimento** sono state eseguite anche in altri punti, **con strumentazione rilocabile**, per ottenere informazioni aggiuntive sul territorio (ad esempio a Rimini nel 2018 o a Ravenna nel 2022) o in particolari situazioni (ad esempio a diverse altezze dal suolo o a diverse distanze da una strada a elevato traffico).

”

La “rete ricerca” di monitoraggio arricchisce la conoscenza di base con numerose misure di approfondimento

”

Il sito principale, a Bologna, esegue misure su: PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_{10} , composizione chimica del particolato, black carbon, distribuzione dimensionale di aerosol

”

Le misure innovative si estendono, oltre che a Bologna, a diversi punti della regione: Parma, Rimini, San Pietro Capofiume (Bo)

Le catene modellistiche per l'analisi e la previsione

Il Dlgs 155/2010 prevede che la valutazione della qualità dell'aria ambiente sia effettuata mediante l'impiego delle informazioni provenienti dai punti di misura in siti fissi e che queste possano essere integrate con quelle provenienti da altre fonti, come le **tecniche di modellizzazione e di stima obiettiva, per poter rappresentare adeguatamente la distribuzione delle concentrazioni degli inquinanti atmosferici normati**.

A questo scopo Arpa si è dotata dei **sistemi modellistici NINFA** (Northern Italy Network to Forecast Aerosol and photochemical pollution) e **RIAT+** (Regional Integrated Assessment Tool PLUS).

Questi modelli fungono da supporto per:

- la valutazione quotidiana e annuale dello stato della qualità dell'aria (analisi);
- la previsione e la gestione degli inquinanti:
 - durante il semestre freddo previsione sul breve periodo ai fini dell'attivazione delle misure emergenziali per quanto riguarda il PM_{10} ;
 - durante il semestre caldo previsione sul breve periodo per quanto riguarda l'ozono.
- gestione sul lungo periodo, attraverso il supporto alla pianificazione regionale e locale.

Le catene modellistiche per l'analisi e la previsione

In Arpa è operativa, dal 2004, una **catena modellistica** denominata **NINFA** (Network dell'Italia del Nord per previsioni di smog Fotochimico e Aerosol), **per la valutazione e la previsione della qualità dell'aria**. Tale catena è stata recentemente valutata nell'ambito dell'attività del gruppo FAIRMODE (Forum europeo sulla modellistica per la qualità dell'aria).

Le informazioni in input principali, che devono essere fornite per il calcolo delle concentrazioni, sono:

- le **emissioni** presenti nel dominio di interesse e la relativa caratterizzazione spaziale e temporale;
- le **variabili meteorologiche** (vento, temperatura, radiazione, ecc), che influenzano i processi di trasporto e dispersione degli inquinanti;
- le concentrazioni in un'area che include il dominio di calcolo (**condizioni al contorno**).

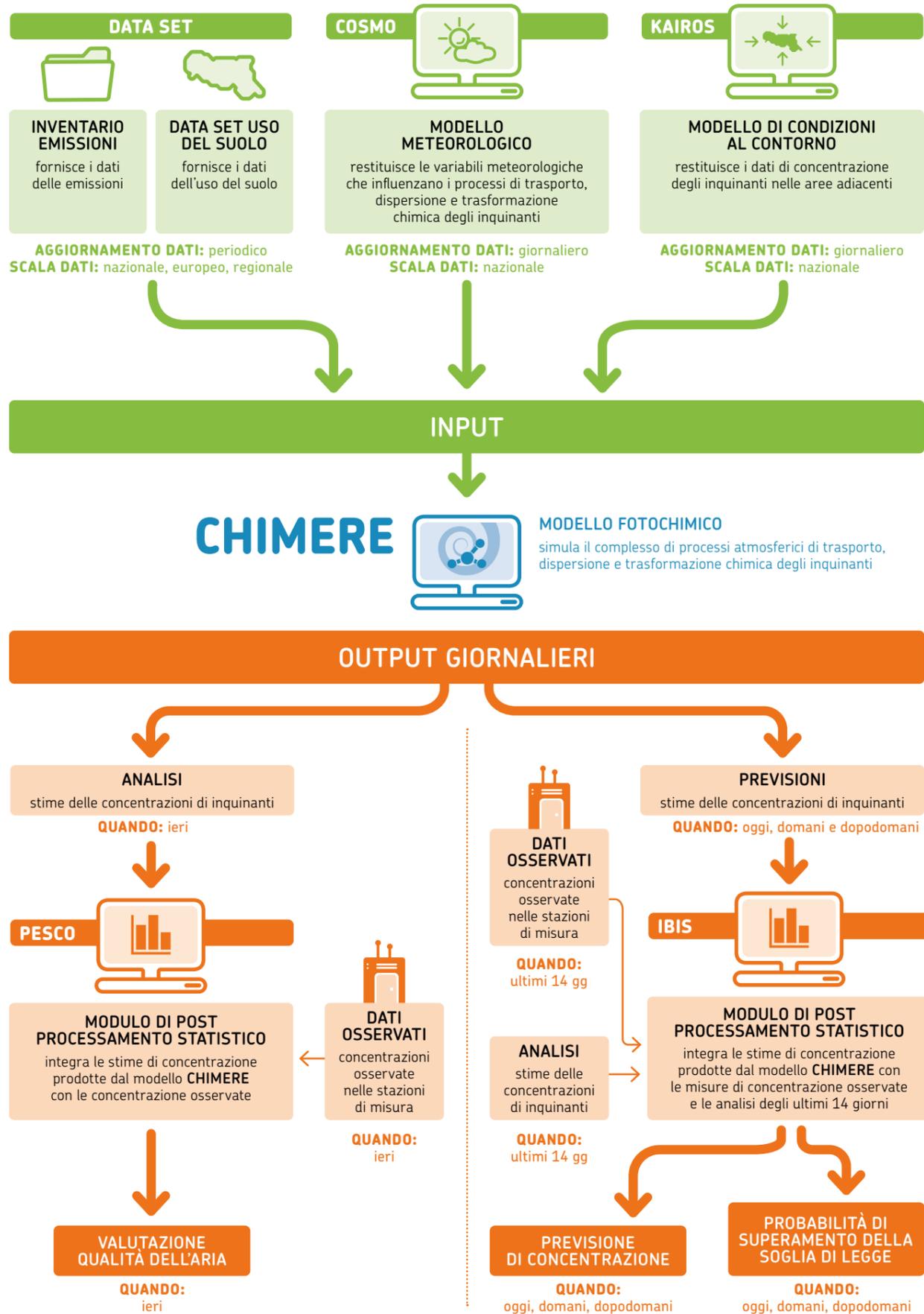
”

Sistemi modellistici NINFA E RIAT+ servono per la previsione e valutazione della qualità dell'aria e supportano la pianificazione

”

Catena modellistica NINFA: stima la concentrazione degli inquinanti in atmosfera sia in previsione, che in valutazione

FIGURA 4
Il funzionamento schematico della catena modellistica NINFA, per le previsioni e le valutazioni dello smog fotochimico e aerosol



La catena NINFA (figura 4), il cui dominio di calcolo è centrato sulla regione Emilia-Romagna, si basa sul modello fotochimico e di trasporto **CHIMERE**, guidato dal modello meteorologico **COSMO**. Le concentrazioni di inquinanti ai bordi del dominio di simulazione di NINFA sono fornite da **KAIROS** (www.snpambiente.it/prodotti/previsioni-qualita-dellaria-in-italia/), modello a scala nazionale sviluppato da Arpae nell'ambito del SNPA (Sistema Nazionale Protezione Ambientale).

L'input emissivo del modello di simulazione viene predisposto a partire dagli inventari a diversa scala spaziale: a livello regionale dall'inventario delle emissioni **INEMAR** (INventario EMISSIONi ARia), a livello nazionale dall'inventario nazionale ISPRA per le emissioni diffuse e puntuali, a livello transnazionale (nel nostro caso per quanto riguarda le rotte navali) dall'inventario europeo fornito da EMEP/EEA (European Monitoring and Evaluation Program / Environment European Agency).

La parte centrale del sistema è rappresentata dal **modello fotochimico e di trasporto** che, utilizzando le informazioni in input, fornisce le concentrazioni di decine di inquinanti in atmosfera sia in previsione (oggi, domani, dopodomani), che in analisi (giorni del passato).

La catena modellistica NINFA di valutazione e previsione di qualità dell'aria, limitatamente al territorio regionale, si completa con due moduli di **post processamento statistico** che integrano le stime di concentrazione prodotte dal modello con misure di concentrazione osservate nelle stazioni di monitoraggio. In questo modo, il dato puntuale delle stazioni viene integrato con la capacità del modello di ricostruire la struttura spaziale delle concentrazioni sull'intera area regionale, difficilmente individuabile usando solo i dati delle stazioni di monitoraggio.

Per le previsioni per il giorno in corso e i due successivi, ai risultati del modello fotochimico è applicato un modulo statistico denominato **IBIS** (Inferenza Bayesiana Inquinamento Simulato), che utilizza i dati misurati dalle stazioni di monitoraggio nei 14 giorni precedenti, al fine di stimare una distribuzione di possibili valori di concentrazione. Da questa elaborazione è possibile ricavare la **concentrazione prevista** e una **probabilità di superamento delle soglie di legge**.

La **valutazione** a posteriori della **qualità dell'aria** è effettuata, quotidianamente, **per il giorno precedente** e si basa su un modulo statistico denominato **PESCO**, applicato ai risultati del modello CHIMERE. Questo modulo utilizza consolidate **tecniche di kriging** a deriva esterna (algoritmo per l'interpolazione di dati georeferenziati che, partendo da dati di origine definiti su punti sparsi, li interpola su una griglia regolare): per ogni punto della griglia in cui si vuole stimare la concentrazione, il valore ottenuto dipende dalla distanza dai punti di misura, dal valore del modello nel punto e dalla quota altimetrica.

”
Gli input (informazioni necessarie) per NINFA:
- emissioni
- variabili meteorologiche
- condizioni al contorno
- misure di qualità dell'aria per i moduli statistici

”
Post-processamento statistico delle concentrazioni:
le concentrazioni degli inquinanti prodotte dal modello sono integrate con le concentrazioni osservate nelle stazioni di misura

Oltre alla valutazione quotidiana delle concentrazioni del giorno precedente, il sistema modellistico NINFA fornisce anche **valutazioni** delle concentrazioni degli inquinanti **per gli anni passati**, combinando con le stesse tecniche di kriging i valori annuali misurati e quelli stimati dal modello fotochimico.

Il medesimo metodo di kriging a deriva esterna è stato applicato per le valutazioni delle concentrazioni di inquinanti su **tutto il Bacino Padano**, nell'ambito del **progetto Prepair**. Si rimanda al report del progetto per la descrizione dettagliata della metodologia usata, comune alla metodologia usata per le valutazioni regionali sull'Emilia-Romagna (<https://www.lifeprepare.eu/index.php/2023/06/22/online-il-report-2022-di-valutazione-della-qualita-dellaria-nel-bacino-padano-e-slovenia/>).

L'analisi sull'Emilia-Romagna è stata eseguita per l'anno 2022 e, con la stessa metodologia, per i quattro anni precedenti, al fine di avere un **dataset omogeneo** per il periodo **2018-2022**. Le valutazioni ottenute sono presentate, in forma di mappa, nei capitoli dedicati.

Il tool RIAT+

RIAT+ è un **applicativo software di valutazione integrata**, sviluppato inizialmente durante il progetto **OPERA** (LIFE09 ENV/IT/000092), al fine di supportare i decisori e i tecnici nell'**individuazione di misure e tecnologie ottimali per la riduzione delle emissioni inquinanti**, per migliorare la qualità dell'aria al minimo costo (*figura 5*).

Nell'ambito del progetto LIFE-IP Prepair è stata realizzata una nuova versione del tool RIAT+, tenendo conto anche dei miglioramenti ottenuti grazie al progetto Interreg Alcotra Climaera, versione ulteriormente aggiornata del tool per il PAIR2030.

Il software di proprietà del JRC (Joint Research Center) della Commissione europea e dei partner di OPERA è distribuito gratuitamente: <http://www.riatplus.eu/html/ita/download.html>.

Le componenti e le caratteristiche principali dell'applicativo RIAT+ sono:

- **l'applicazione di modelli sorgente-recettore per la stima delle concentrazioni in atmosfera, a partire dalle riduzioni emissive applicate**

Poiché un CTM (Chemical Transport Model), a causa dei tempi di calcolo elevati, non può essere eseguito in tempo reale all'interno della procedura di ottimizzazione utilizzata da RIAT+, si utilizza una relazione più semplice che lega la riduzione delle fonti emissive con gli indicatori di qualità dell'aria. Questa relazione (denominata modello sorgente/recettore) può essere definita attraverso reti neurali artificiali o funzioni lineari. Il modello sorgente/recettore è stato costruito secondo l'approccio impiegato all'interno del tool di screening SHERPA (Screening for High Emission Reduction Potential on Air), presupponendo una relazione multilineare tra la concentrazione e le variazioni delle emissioni.



Progetto Prepair: valuta le concentrazioni di inquinanti nell'aria a scala di Bacino Padano

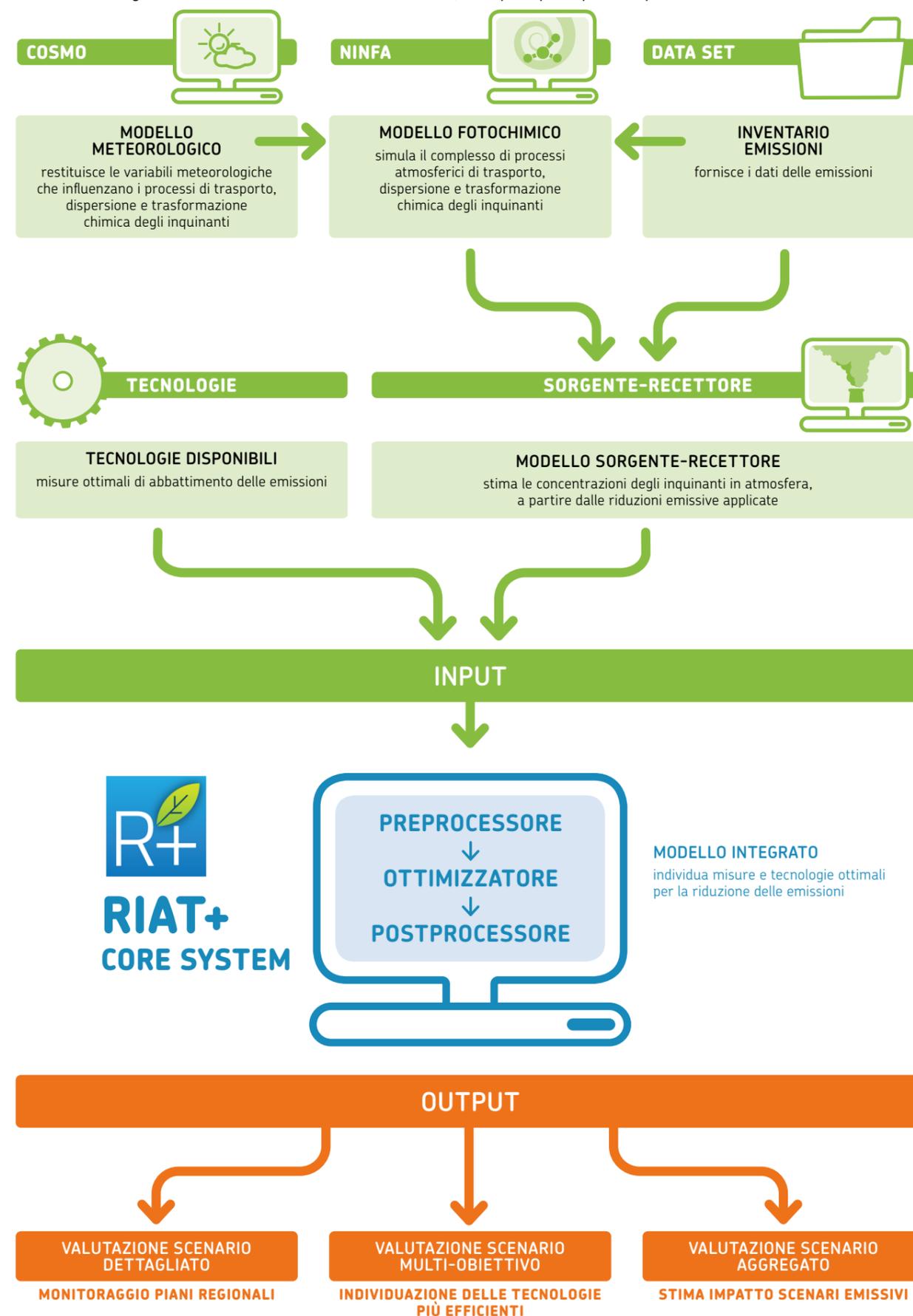


Applicativo software RIAT+: permette di individuare le misure ottimali da adottare per la riduzione delle emissioni di inquinanti in atmosfera



*Componenti RIAT+:
- modelli sorgente-recettore
- modulo di valutazione di scenari*

FIGURA 5
Lo schema generale di funzionamento del software RIAT+, con i principali input e output del modello



- **un modulo di valutazione di scenari di ottimizzazione multi-obiettivo**

Le tecnologie messe a disposizione, ovvero le misure di riduzione delle emissioni, sono selezionate per minimizzare uno o più indicatori di qualità dell'aria (ad esempio la concentrazione di PM₁₀ media annua) nel dominio spaziale di applicazione delle politiche, minimizzando i costi necessari conseguenti all'applicazione delle misure, per ottenere la massima riduzione delle concentrazioni; il modulo è in grado di selezionare e mostrare all'utente, attraverso l'interfaccia grafica di RIAT+, l'intero insieme di queste misure ottimali di abbattimento, sia in termini di tassi di applicazione (ovvero i livelli di penetrazione delle tecnologie da raggiungere nel mercato nell'anno del piano), sia in termini di riduzione dei costi indiretti (sanitari) e delle emissioni.

Secondo questo approccio i legami tra le variazioni delle emissioni e delle concentrazioni sono calcolati cella per cella stimando due parametri α e ω : il primo parametro dipende dall'importanza relativa di un precursore di emissione rispetto ad un altro, il secondo è legato alla velocità di diminuzione dell'impatto delle emissioni con la distanza.

RIAT+ consente numerose opzioni di esecuzione:

- è possibile considerare diversi indici di qualità dell'aria (media annuale di PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂);
- il budget può essere vincolato a un valore specifico (approccio costo-efficacia);
- è possibile definire un sottodominio di applicazione delle politiche e/o di ottimizzazione (ad esempio zone critiche per la qualità dell'aria);
- la sostituzione delle tecnologie più avanzate può essere inibita per alcuni anni, mentre le tecnologie più obsolete possono essere sostituite da tecnologie migliori;
- l'ottimizzazione può essere limitata a un sottoinsieme di tecnologie;
- scenari di emissione specifici possono essere simulati con riduzioni di emissioni aggregate o con l'applicazione di tecnologie specifiche.

In particolare la versione di RIAT+, sviluppata nell'ambito del progetto Prepair e in PAIR2030, permette di eseguire le elaborazioni differenziate, per ogni regione, di questi scenari:

- **scenario dettagliato**

Tale approccio permette all'utente di introdurre i tassi di applicazione (AR) di un sottoinsieme di misure (o dell'intero set di misure) e valutare gli impatti in termini di indicatori di qualità dell'aria e costi ed è **utile per monitorare i piani regionali di qualità dell'aria**.

- **scenario multi-obiettivo**

Tale approccio permette di individuare quali sono le tecnologie più efficaci ed efficienti **a livello regionale o sovregionale** per migliorare la qualità dell'aria, individuando l'insieme, teoricamente ottimale, di azioni di riduzione delle emissioni.

- **scenario aggregato**

Tale approccio permette all'utente di applicare le percentuali di riduzione delle emissioni per inquinante **a un intero macrosettore o più macrosettori**, per stimare, attraverso RIAT+, l'impatto di tali riduzioni sulla qualità dell'aria.

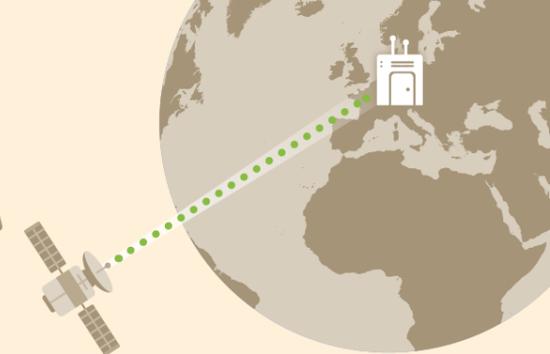


Gli scenari del modello RIAT+:

- scenario dettagliato
- scenario multi-obiettivo
- scenario aggregato



APPROFONDIMENTO Il progetto Maia della NASA



Il progetto Maia (Multi-Angle Imager for Aerosols), sponsorizzato dalla NASA e guidato dal Jet Propulsion Laboratory (JPL) della NASA, è attualmente in fase di sviluppo e **combinerà le misurazioni satellitari delle proprietà degli aerosol atmosferici e quelle in superficie delle concentrazioni di particolato (PM)**.

Sono previsti studi sulle connessioni tra inquinanti nell'aerosol e problemi di salute, come malattie cardiovascolari e respiratorie ed esiti del parto, per numerose aree target primarie che comprendono le principali città di Stati Uniti, Europa, Medio Oriente, Africa e Asia.

Maia prevede misure satellitari con una fotocamera digitale specializzata, che acquisirà misurazioni multiangolari, multispettrali e polarimetriche della luce solare diffusa dalla superficie e dall'atmosfera terrestre. L'elaborazione al computer delle immagini satellitari genererà **informazioni sulle caratteristiche fisiche dello strato di inquinamento atmosferico**, come la quantità di particelle e la loro distribuzione dimensionale.

Il satellite studierà tre tipi di aree target: **aree target primarie**, che comprendono grandi aree metropolitane, dove gli epidemiologi potranno studiare gli impatti di vari tipi di particolato (PM) sulla salute umana. **Aree target secondarie** che contengono ulteriori aree di interesse scientifico.

Aree target di calibrazione/validazione che verranno osservate regolarmente per verificare l'accuratezza delle misurazioni dello strumento MAIA e dei dati prodotti. Il progetto comunque non è ancora definitivo, potrebbero esserci cambiamenti prima del lancio del satellite.

La fotocamera orientabile di Maia consentirà la raccolta di immagini multiangolari su un ampio campo di osservazione. Integrando le osservazioni satellitari con le misurazioni effettuate a terra dai sistemi di monitoraggio del PM, sarà possibile **generare mappe del PM e dei suoi principali componenti chimici, tra cui solfato, nitrato, carbonio organico e carbonio elementare**, con una risoluzione di 1 km all'interno delle aree target individuate per lo studio. Una di queste aree target primarie si trova in Italia e copre **un'area che si estende da Roma alla Pianura Padana**.

Arpae collabora al team scientifico del progetto e fornirà dati di composizione chimica del PM nei tre fondi urbani di via Gobetti a Bologna, Cittadella a Parma e Marecchia a Rimini, oltre che i dati relativi al fondo rurale di San Pietro Capofiume (BO). Queste misurazioni sono necessarie per trasformare i dati del satellite. Il cui lancio, ad oggi, è previsto per il 2025, in informazioni sulle concentrazioni di PM vicino alla superficie, in particolare quelle associate ai diversi costituenti chimici.



- Aree Target Primarie
- Aree Target Secondarie
- Aree Target di Calibrazione



SITOGRAFIA

Maggiori informazioni sul sito:

<https://maia.jpl.nasa.gov>

MAIA





APPROFONDIMENTO

Le misure di qualità dell'aria con strumenti non convenzionali: smart sensors

1. INTRODUZIONE

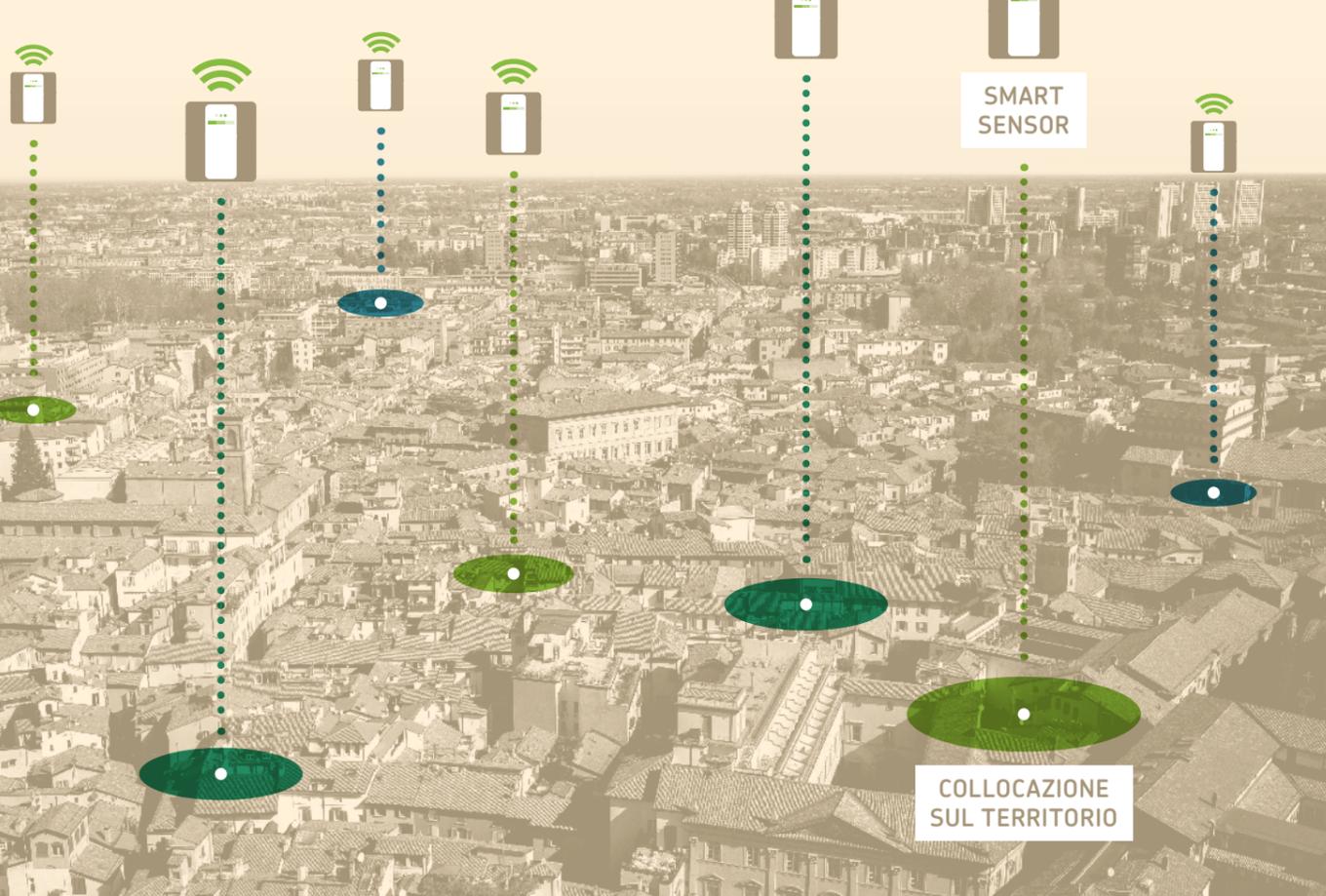
Il termine **"smart sensors"** indica qualsiasi tipo di dispositivo elettronico in grado di ricevere ed elaborare informazioni provenienti dall'ambiente esterno e restituire dati in formato digitale. Possono fornire misure fisiche (come temperatura, umidità, pressione atmosferica, ecc.) o anche misure chimiche (come la concentrazione di aerosol atmosferico, biossido di azoto, ammoniaca, ozono, ecc.). Gli **smart sensors** possono costare relativamente poco (ma non sempre), sono poco energivori, hanno ridotte dimensioni e sono di facile installazione. La diffusione di internet e l'utilizzo di applicazioni specifiche negli smartphone hanno permesso il controllo e la lettura di questi dispositivi da remoto: generalmente forniscono dati in tempo reale sul web e l'utente può consultarli. La facilità di accesso ai dati ha accresciuto l'interesse da parte dell'opinione pubblica verso questi **nuovi sistemi di misura**.

2. SMART SENSORS PER LA MISURAZIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA

Nel campo della qualità dell'aria, in commercio esistono diverse tipologie di **smart sensors**, che misurano le concentrazioni degli inquinanti in atmosfera: questi sistemi possono misurare il particolato (PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀, ecc.), gli ossidi di azoto (NO₂, NO_x), Ozono (O₃), i composti organici volatili (VOC), l'ammoniaca (NH₃) e altri elementi o sostanze in fase gas e/o solida.

Nel mercato esistono ditte che implementano e commercializzano prodotti che misurano la qualità dell'aria sia all'interno delle abitazioni (ambiente indoor), che all'esterno (ambiente outdoor). Vi sono inoltre ditte che, oltre a vendere i propri dispositivi, consentono agli acquirenti di condividere i propri dati di misura in portali sul web, ove è possibile consultare sia la qualità dell'aria nella propria regione, sia quella di tutti gli altri utenti connessi.

SMART SENSOR: COPERTURA CAPILLARE DEL TERRITORIO



L'AFFIDABILITÀ DI UNA MISURA



MISURA ACCURATA

Distanza del valore dal vero. In termini di bersaglio con frecce, una maggiore accuratezza corrisponde a una freccia il più possibile corrispondente al centro del bersaglio.

MISURA PRECISA

Dispersione delle singole misure. In termini di bersaglio con frecce, una maggiore precisione corrisponde a delle frecce molto concentrate in un punto.

In questo sistema, il **cittadino** (utente finale) è sia il **generatore di informazione** (le misure del proprio dispositivo vengono raccolte nel database centrale), sia il **fruitore** (accedendo al portale può sapere quale è la qualità dell'aria nella propria regione e nelle altre parti del globo dove si utilizzano sensori simili). Sul mercato esistono anche dispositivi che sono frutto

della collaborazione fra Enti di ricerca e ditte private. Queste **joint-venture**, oltre che al fattore commerciale, sono interessate a valutare e testare anche l'affidabilità scientifica dei propri prodotti.

Il **problema**, che è alla base di un utilizzo sistematico di **smart sensors** per valutare la qualità dell'aria, è la **verifica della loro affidabilità**: ogni misura, infatti, deve avere un'accuratezza (la distanza dal valore "vero") e una **precisione** (la dispersione delle singole misure). Ogni misurazione, sia essa determinata con uno **smart sensor** o altro, è affetta da un certo errore di accuratezza e può essere migliorata con un periodo di calibrazione. La calibrazione deve essere ripetuta diverse volte, per evitare "derive strumentali" di misura nel tempo. I valori degli inquinanti atmosferici in Emilia-Romagna sono forniti dalla rete di qualità dell'aria di Arpa: ogni stazione ufficiale **Arpa**, infatti, fornisce **dati certificati**, rispetta precise norme in termini di qualità e calibrazione degli strumenti, secondo standard previsti dalla normativa italiana ed europea. Per utilizzare gli **smart sensors** è, quindi, sempre necessaria un'attività preventiva di confronto rispetto alle misure con strumenti certificati, al fine di calibrarli al meglio e minimizzare gli eventuali errori di precisione e accuratezza.

3. L'ATTIVITÀ DI ARPAE

Visto il crescente interesse da parte dei cittadini verso i sistemi **smart sensors** per valutare la qualità dell'aria, **Arpa**, negli ultimi anni, ha deciso di intraprendere un percorso per testare il loro funzionamento: una conoscenza più approfondita di questi dispositivi consentirebbe, infatti, un aumento del know-how interno, in modo da poter fornire risposte mirate a eventuali richieste della cittadinanza.

Uno dei primi problemi che ci si è trovati ad affrontare è stata la **scelta di un dispositivo idoneo** vista la molteplicità dell'offerta: sul mercato esiste una notevole varietà di strumenti, con un'ampia varietà di costi (da qualche decina a qualche migliaia di euro). I modelli più economici a volte non menzionano neanche l'accuratezza e la precisione degli strumenti, mentre nei modelli più avanzati (ma anche più costosi e, in alcuni casi, frutto di **joint venture** fra Enti di ricerca e ditte private) queste informazioni sono rese disponibili. Un indubbio vantaggio di questi sistemi è la **facilità di installazione**: possono essere montati all'aperto, lungo le strade su pali della luce, senza richiedere particolari permessi o occupazioni di suolo pubblico. Alcuni modelli sono dotati, anche, di pannello fotovoltaico, che fornisce l'energia necessaria e, quindi, non necessitano di connessione alla rete elettrica.

La facilità di installazione e il prezzo (a volte) contenuto consentono l'utilizzo, in contemporanea, di un elevato numero di strumenti, che possono essere disposti sul territorio in modo capillare. Avere un'alta concentrazione di dispositivi posti in porzioni di territorio limitate può essere utile per approfondire, nel dettaglio, lo studio della qualità dell'aria in un settore circoscritto, come ad esempio potrebbe essere un quartiere di una città o un particolare vincolo stradale di una provincia.

In sintesi, mettendo su una bilancia “pro e contro” dell'utilizzare i sistemi *smart sensors*, si potrebbe riassumere in questa maniera:

PRO

- FACILITÀ DI INSTALLAZIONE
- COPERTURA CAPILLARE DEL TERRITORIO CON LA POSSIBILITÀ QUINDI DI COMPRENDERE LA DISTRIBUZIONE SPAZIALE E TEMPORALE DEGLI INQUINANTI
- POSSIBILITÀ DI RIPOSIZIONAMENTO RAPIDO
- ECONOMICITÀ RISPETTO AGLI STRUMENTI CERTIFICATI

CONTRO

- NECESSITÀ DI COMPRENDERE AL MEGLIO, PER OGNI TIPOLOGIA DI STRUMENTO SI UTILIZZI, LA PRECISIONE E L'ACCURATEZZA
- CONFRONTABILITÀ CON GLI STRUMENTI DELLE STAZIONI DELLA RETE DI QUALITÀ DELL'ARIA

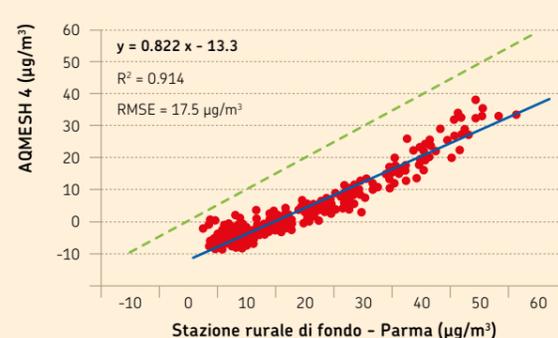
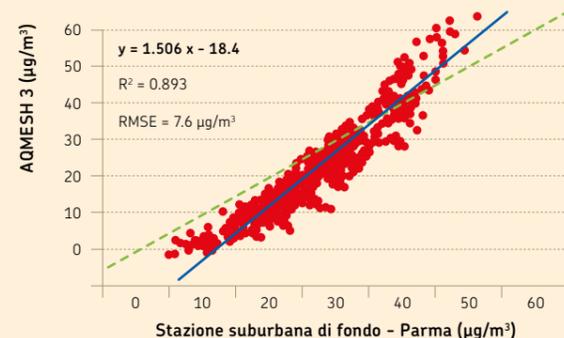
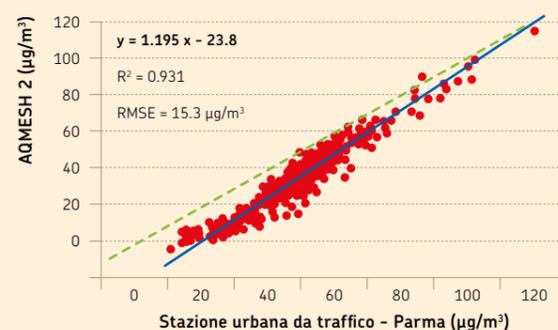
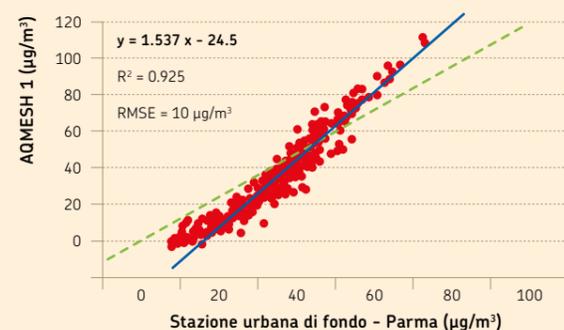
Una parte dell'attività di Arpae, negli ultimi anni, è stata proprio indirizzata in questa direzione. È importante sottolineare che alcuni di questi strumenti forniscono una misura ogni quarto d'ora, o comunque con una elevata risoluzione temporale: questi dati, moltiplicati per decine di strumenti che funzionano in contemporanea, possono fornire una grande quantità di numeri da elaborare con modelli statistici. Certamente tale aspetto potrebbe essere molto positivo, in quanto potrebbe funzionare come compensazione delle minori precisioni e accuratezze rispetto agli strumenti convenzionali, tuttavia su tali metriche è necessario porre attenzione e molti studi dovranno essere ancora svolti.

4. LAVORI IN CORSO

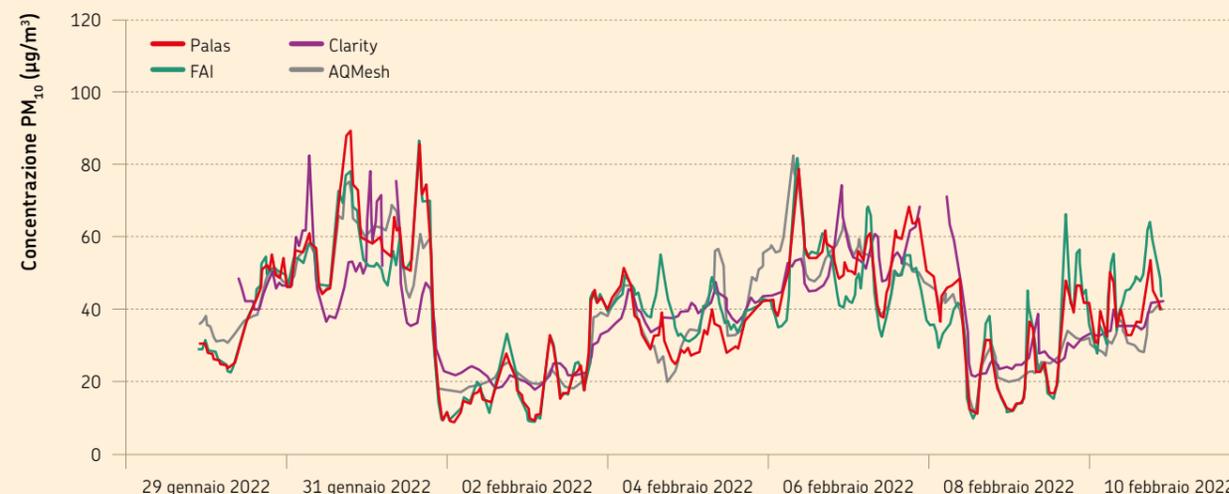
Arpae, dopo un'analisi del mercato e dell'offerta, ha **acquistato o noleggiato diversi dispositivi** e li ha **utilizzati in alcune campagne di misura**, in diverse stagioni, nel territorio dell'Emilia-Romagna.

All'inizio di ogni campagna i dispositivi sono stati collocati in prossimità di alcune stazioni della rete della qualità dell'aria di Arpae, per mettere in atto i necessari confronti e permettere, così, la loro calibrazione iniziale. I dispositivi sono stati, poi, installati nel luogo scelto per la campagna di misura (la cui durata è variata da qualche settimana a qualche mese). A fine campagna i sensori sono stati posizionati nuovamente in prossimità delle stesse cabine Arpae

Diagrammi di dispersione (punti rossi) e corrispondenti rette di regressione (linea tratteggiata verde) tra le concentrazioni di NO_2 misurate dagli "AQMesh" e le corrispondenti concentrazioni misurate dalle stazioni fisse Arpae in Provincia di Parma nel periodo invernale. Ciascun grafico riporta l'equazione della retta di regressione, il coefficiente di determinazione (R^2) e l'errore quadratico medio (RMSE). Progetto AWAIR



Andamenti temporali orari del PM_{10} misurati dai diversi strumenti presenti presso la stazione Arpae di Colorno (PR) nella seconda campagna di interconfronto. Progetto DYNAXIBILITY



usate in precedenza, per verificare l'eventuale scostamento dei valori e operare un'ulteriore calibrazione finale.

4.1 I primi risultati delle sperimentazioni

Allo stato attuale alcune campagne di misura sono terminate, altre sono in corso e i dati sono in elaborazione.

A partire dal 2019 Arpae ha utilizzato gli smart sensors nell'ambito di due Progetti europei Interreg-CE, denominati "AWAIR" il primo e "Dynaxibility" il secondo.

4.1.1 Progetto AWAIR

Per AWAIR sono stati utilizzati gli smart sensor di marca "AQMesh" (Environmental Instruments Ltd, UK). Inizialmente sono stati posizionati presso le stazioni di riferimento della rete Arpae. Da questi periodi di confronto è emersa, in modo inequivocabile, la necessità di sottoporre questi dispositivi a procedure di calibrazione, in assenza delle quali i valori forniti sono risultati sostanzialmente inutilizzabili per la valutazione della qualità dell'aria in una certa zona.

I **primi test** di comparazione hanno riguardato **ozono e biossido di azoto**, misurati con gli "AQMesh" rispetto ai valori orari di riferimento nelle stazioni fisse Arpae, durante **un periodo di interconfronto invernale (15-28/1/2019) e uno estivo (24/6-7/7/2019)**. I confronti hanno messo in evidenza che, a fronte di ottime performance per O_3 in entrambi i periodi, con valori di accuratezza e di precisione molto elevati, molto più complessa è la situazione che riguarda NO_2 , per il quale si sono osservate ottime performance nel periodo invernale (vedi figura sul lato sinistro), ma un macroscopico aumento degli errori di misura nelle campagne di interconfronto estive. La ragione risiede, probabilmente, nelle elevate temperature (spesso superiori a $40^\circ C$ in prossimità del punto di misura) e nelle basse concentrazioni di questo inquinante d'estate.

Un altro aspetto fondamentale che è stato affrontato, in questi primi test, riguarda la **stabilità nel tempo dell'accuratezza delle misure** con gli smart sensors: la situazione ricalca quella precedente, senza un significativo aumento dell'errore quadratico medio delle misure

su periodi fino a 45 giorni (più lunghi della durata media di una campagna di misura) per O_3 (estate e inverno) e NO_2 , ma in questo caso si nota un significativo aumento dell'errore all'approssimarsi della stagione calda.

4.1.2 Progetto DYNAXIBILITY

Durante il più recente Progetto DYNAXIBILITY sono stati utilizzati, oltre ai già citati "AQMesh", altri smart sensors denominati "Clarity Node-S" (Clarity Movement Co., US) per campagne di misura e di interconfronto con strumentazione di riferimento.

In questo caso, sono state realizzate tre distinte campagne di misura nella Provincia di Parma, **nell'arco di una intera stagione invernale (10/12/2021-9/1/2022; 29/1/-9/2/2022; 2-21/3/2022)**, per valutare la più ampia varietà possibile di situazioni durante la stagione caratterizzata dai valori più alti dell'inquinante.

Per effettuare quindi le necessarie calibrazioni sono state confrontate le concentrazioni di NO_2 e di particolato (PM_{10} e $PM_{2.5}$) derivati dagli smart sensors rispetto ai valori osservati da strumenti posti nella rete di monitoraggio Arpae. I risultati di queste comparazioni sono stati piuttosto soddisfacenti (vedi figura sopra, per il valore orario del PM_{10} nella seconda campagna di interconfronto) e hanno mostrato una buona concordanza degli andamenti ottenuti per il particolato sia su base giornaliera, che oraria, per entrambe le tipologie di smart sensors. Gli strumenti "AQMesh", d'altra parte, hanno messo in evidenza un'importante criticità dovuta a frequenti anomalie dei dati, in condizioni di elevata umidità relativa.

Per quanto riguarda NO_2 , gli "AQMesh" hanno mostrato un'ottima concordanza con gli strumenti di riferimento, in particolare per le stazioni collocate nell'area urbana, mentre meno soddisfacenti sono risultate le performance dei "Clarity Node-S".

Le analisi esplorative condotte sulla validità nel tempo delle calibrazioni hanno mostrato una buona stabilità dei livelli di accuratezza per un periodo di circa 30 giorni, oltre tale periodo è stato evidenziato un progressivo aumento del bias e un degrado della precisione.

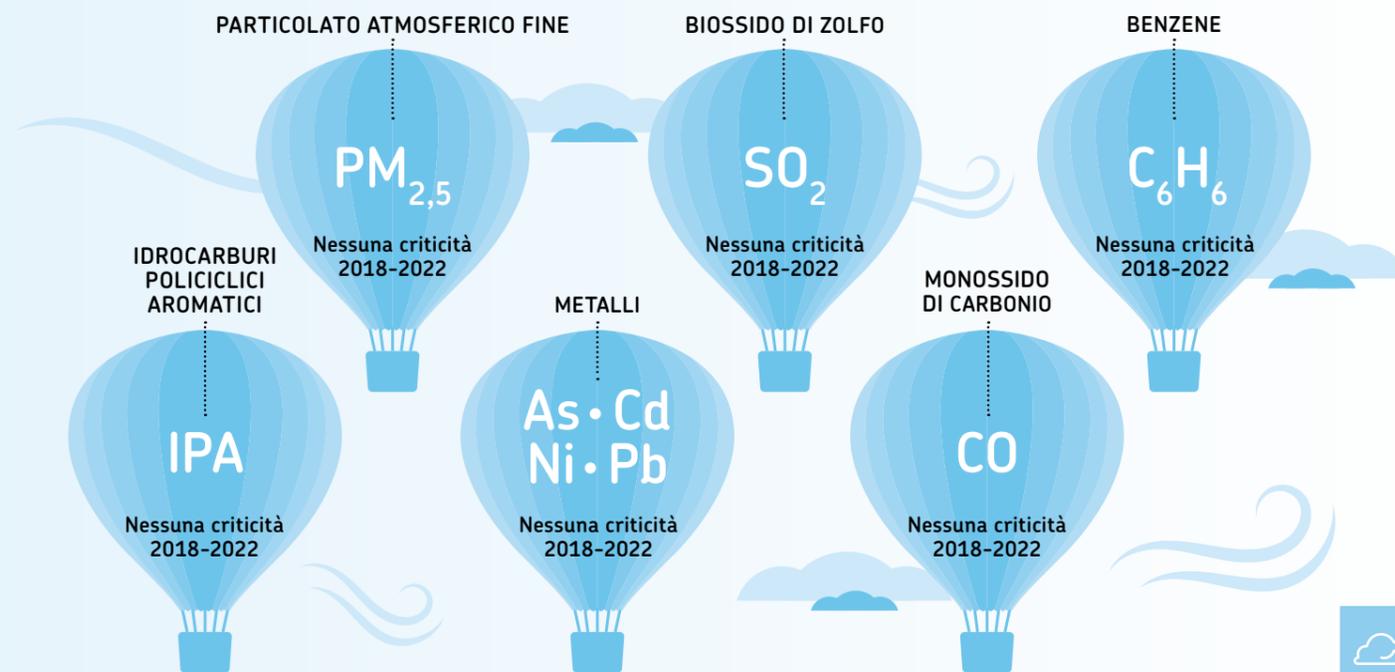
4

Inquinanti dell'aria



Pillole | "Lo stato dell'aria"

ASSENZA DI CRITICITÀ



CRITICITÀ

PARTICOLATO ATMOSFERICO GROSSOLANO



Numero stazioni con superamento del limite giornaliero

7/43



17/43



25/43



11/43



12/43



OZONO



Numero stazioni con superamento del valore obiettivo

27/28



33/33



33/34



34/34



33/34



BIOSSIDO DI AZOTO



Numero stazioni con superamento del limite annuale

2/46



4/47



0/46



1/47



0/47



LEGENDA: ● Numero di stazioni che misurano l'inquinante ● Numero di stazioni con superamento del limite/valore obiettivo

Stato della qualità dell'aria

Nella trattazione che segue è esposto lo stato di qualità dell'aria in regione, con i trend evolutivi in relazione ai diversi inquinanti, aggiornato all'anno 2022. Gli inquinanti considerati sono i seguenti: materiale particolato (PM₁₀ e PM_{2,5}), ozono (O₃), biossido di azoto (NO₂), benzo(a)pirene (BaP), ossidi di zolfo (SO_x), monossido di carbonio (CO), benzene (C₆H₆), metalli (Pb, Cd, Ni).

In **Emilia-Romagna**, analogamente a quanto accade in tutto il **Bacino Padano**, vi sono **criticità per la qualità dell'aria** che riguardano principalmente il **PM₁₀**, l'**ozono** e, in misura minore, il **biossido di azoto (NO₂)**. Il **PM₁₀** e l'**ozono** interessano pressoché l'intero territorio regionale, mentre per il **biossido d'azoto** la problematica è più localizzata, in **prossimità dei grandi centri urbani**.

Il valore limite annuale di PM_{2,5} è stato superato in alcuni anni prima del 2018.

Diversamente, inquinanti primari come il monossido di carbonio e il biossido di zolfo non costituiscono più un problema, in quanto i livelli di concentrazione in aria sono da tempo al di sotto dei valori limite. Anche alcuni degli inquinanti che in anni recenti avevano manifestato alcune criticità, come i metalli pesanti, gli idrocarburi policiclici aromatici e il benzene sono sotto controllo. Le polveri e l'ozono sono inquinanti in parte o totalmente di origine secondaria, ovvero dovuti a trasformazioni chimico-fisiche degli inquinanti primari, favorite da fattori meteorologici. Per il **PM₁₀** la componente **secondaria** è preponderante. Gli inquinanti che concorrono alla formazione della componente secondaria del particolato sono: ammoniaca (NH₃), ossidi di azoto (NO_x), biossido di zolfo (SO₂) e Composti Organici Volatili (COV). Le condizioni di inquinamento diffuso sono causate dalla elevata densità abitativa, dalla forte industrializzazione, dall'agricoltura e dagli allevamenti intensivi, dal sistema dei trasporti e dalla produzione dell'energia e sono favorite dalla particolare conformazione geografica, che determina condizioni di stagnazione dell'aria inquinata, in conseguenza della scarsa ventilazione e del basso rimescolamento degli strati bassi dell'atmosfera.



Gli inquinanti critici per la qualità dell'aria in Emilia-Romagna: PM₁₀, Ozono e, in misura minore, Biossido di azoto



Criticità sul territorio: PM₁₀ e Ozono sull'intero territorio, Biossido di azoto in prossimità dei grandi centri urbani

DOVE TROVARE GLI INQUINANTI ANALIZZATI

PARTICOLATO ATMOSFERICO

CARATTERISTICHE > pag. 82

DATI > pag. 86

OZONO

CARATTERISTICHE > pag. 82

DATI > pag. 110

BIOSSIDO D'AZOTO

CARATTERISTICHE > pag. 84

DATI > pag. 116

MONOSSIDO DI CARBONIO

CARATTERISTICHE > pag. 84

DATI > pag. 124

BIOSSIDO DI ZOLFO

CARATTERISTICHE > pag. 84

DATI > pag. 124

BENZENE

CARATTERISTICHE > pag. 84

DATI > pag. 125

METALLI PESANTI

CARATTERISTICHE > pag. 85

DATI > pag. 126

IPA

CARATTERISTICHE > pag. 85

BENZO(A)PIRENE

CARATTERISTICHE > pag. 85

DATI > pag. 121



APPROFONDIMENTO

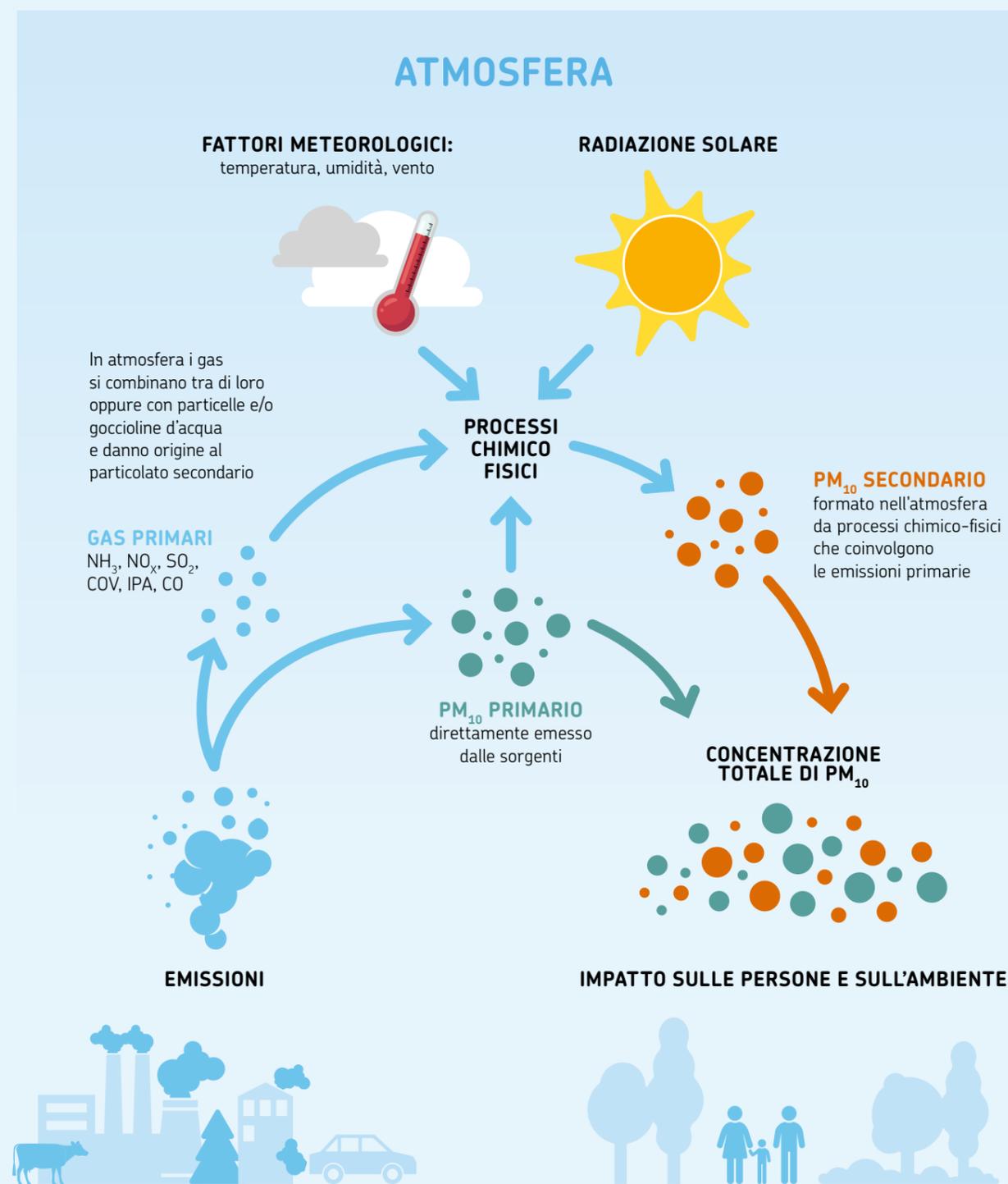
PM₁₀: un inquinante primario e secondario

LEGENDA:

● PM₁₀ primario

● PM₁₀ secondario

Il particolato atmosferico è un sistema disperso di particelle solide e liquide che si trovano in sospensione in atmosfera (aerosol). Può essere primario e/o secondario.



I principali inquinanti dell'aria

PARTICOLATO ATMOSFERICO (PM₁₀, PM_{2,5})

Le polveri in aria rappresentano la parte solida dell'aerosol atmosferico, che comprende anche particelle liquide. Entrambe le componenti sono costituite da diverse sostanze, di natura organica e inorganica, sospese nell'aria. In termini di massa, il particolato è principalmente **costituito da sali quali solfati, nitrati, cloruro di sodio, nonché da ammonio, sostanze carboniose, polvere minerale, metalli, acqua.**

Il particolato ha dimensioni da pochi nanometri fino a oltre una decina di micrometri e viene suddiviso in base al suo diametro aerodinamico:

- il **PM₁₀** è definito come il materiale particolato aerodisperso avente **diametro aerodinamico medio inferiore a 10 micrometri** (1 μm = 1 millesimo di millimetro);
- il **PM_{2,5}** è definito come il materiale particolato con un **diametro aerodinamico medio inferiore a 2,5 micrometri.**

Esso è **originato** sia per **emissione diretta (particelle primarie)**, sia per **reazione nell'atmosfera** di composti chimici quali: **ossidi di azoto e zolfo, ammoniaca e composti organici (particelle secondarie).**

Le sorgenti del particolato possono essere antropiche e naturali. Le fonti antropiche sono riconducibili

principalmente ai processi di combustione quali: emissioni da traffico veicolare, utilizzo di combustibili (carbone, oli, legno, rifiuti, rifiuti agricoli), emissioni industriali (cementifici, fonderie, aziende ceramiche). Le fonti naturali, invece, sono sostanzialmente: aerosol marino, suolo risollevato e trasportato dal vento, aerosol biogenico, incendi boschivi, emissioni vulcaniche, ecc.

Le **cause principali** delle alte concentrazioni di **polveri primarie** nelle aree urbane sono dovute, in gran parte, alla **combustione della legna e dei suoi derivati**, alla crescente intensità del **traffico veicolare** e, in particolare, alle emissioni dei motori diesel e alle **emissioni di origine industriale**. Una percentuale minore è legata all'usura degli pneumatici e dei corpi frenanti delle auto. Un ulteriore elemento, che contribuisce alle alte concentrazioni di polveri, è connesso anche al risollevamento delle frazioni depositate, per cause naturali o legate allo stesso traffico. A queste polveri di origine primaria si vanno ad aggiungere quelle di **origine secondaria**, ossia quelle che si formano per **reazione chimico-fisica in atmosfera.**

Date le dimensioni, il particolato è in grado di **penetrare nell'apparato respiratorio** e, quindi, avere effetti negativi sulla salute.

OZONO (O₃)

L'ozono troposferico è un inquinante **prettamente secondario**, cioè non emesso direttamente da sorgenti antropiche. **Si forma, infatti, nella parte più bassa dell'atmosfera (troposfera), a seguito di complesse reazioni fotochimiche**, che avvengono in presenza di forte insolazione, a partire da altri composti gassosi definiti **precursori**, quali **ossidi di azoto, composti organici volatili e monossido di carbonio**, inquinanti prodotti in particolare da processi di combustione civile e industriale, da processi che utilizzano o producono sostanze chimiche volatili, come solventi e carburanti, oltre che dal traffico veicolare. Una piccola parte proviene anche da fenomeni naturali, quali fenomeni elettrici atmosferici o dal trasporto dagli alti strati verso i bassi strati dell'atmosfera.

Il ruolo svolto dalla **radiazione solare** nei meccanismi di formazione dell'ozono troposferico spiega l'andamento temporale della sua concentrazione al suolo, caratterizzato da una **forte componente stagionale (inquinante estivo)** e da una componente giornaliera. Fondamentali, poi, sono anche altre condizioni meteorologiche quali: la temperatura e la stabilità atmosferica. Assume, quindi, valori di concentrazione più elevati in estati contrassegnate da alte temperature ed elevata insolazione.

L'aumento della sua presenza nell'aria in estate può avere effetti dannosi sull'uomo e l'ambiente. Anche la vegetazione subisce conseguenze dalla presenza di questo inquinante, provocando riduzione della crescita delle piante e anche necrosi delle foglie di specie sensibili.



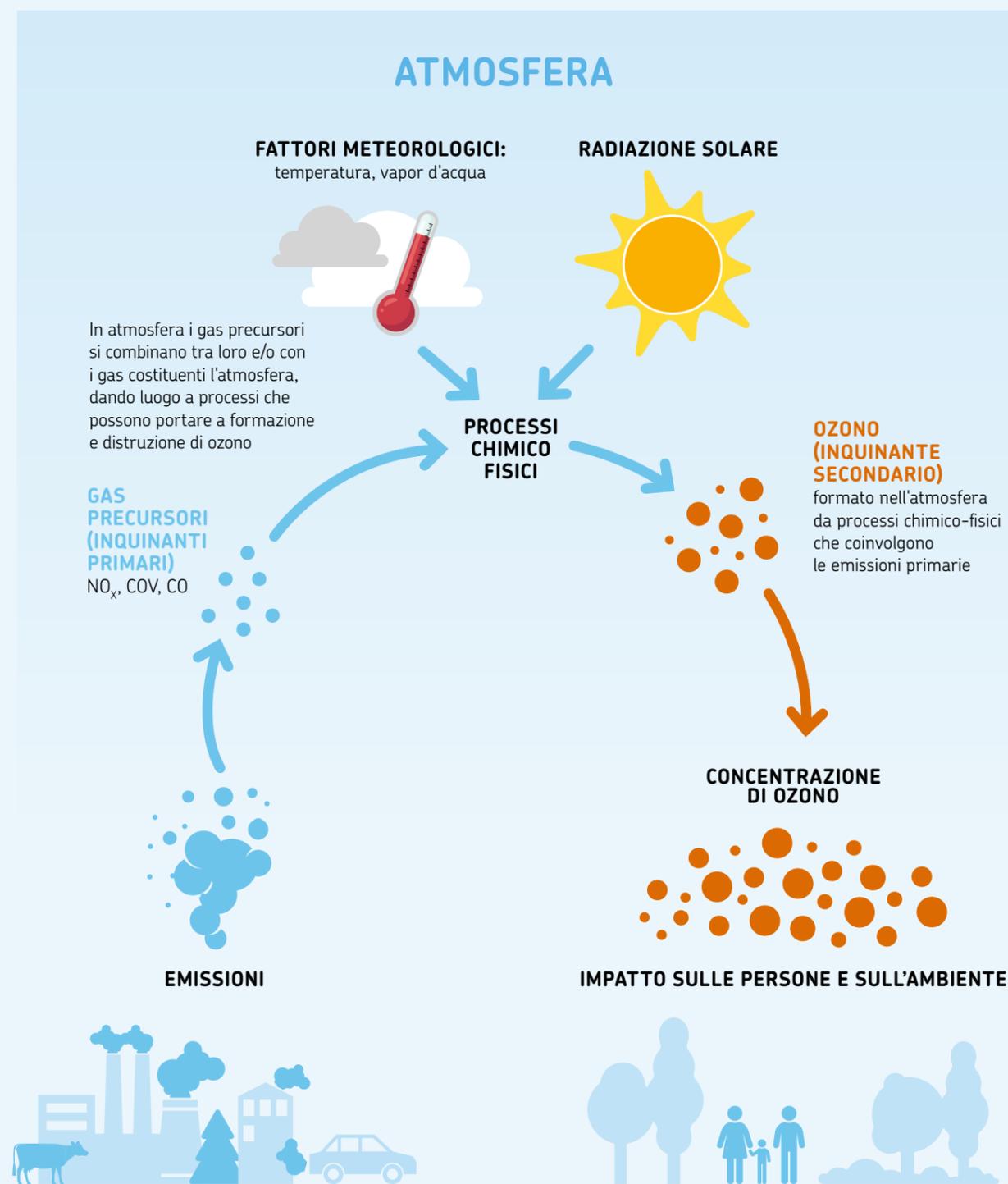
APPROFONDIMENTO

Ozono: un inquinante secondario

LEGENDA:



L'ozono troposferico è un inquinante prettamente secondario, cioè non emesso direttamente da sorgenti antropiche. Si forma, infatti, nella parte più bassa dell'atmosfera (troposfera), a seguito di complesse reazioni fotochimiche.



BIOSSIDO DI AZOTO (NO₂)

Il biossido di azoto è un gas reattivo, di colore bruno e di odore acre e pungente, ed è, assieme al monossido di azoto (NO), la **principale e più importante forma ossidata dell'azoto**. Tra gli inquinanti atmosferici è considerato uno dei più importanti sia **per gli effetti sulla salute** sia perchè dà inizio a una serie di reazioni

chimiche che portano alla **formazione di sostanze inquinanti secondarie**, come l'ozono e il particolato. Gli ossidi di azoto si formano durante i processi di combustione. Le **principali sorgenti** di NO₂ sono i **veicoli a motore**, gli **impianti di riscaldamento**, le **combustioni industriali**.

MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)

Il monossido di carbonio, incolore e inodore, è un **tipico prodotto derivante dalla combustione**. Si forma in modo consistente durante la combustione con difetto di aria, cioè quando il quantitativo di ossigeno non è sufficiente per ossidare completamente le sostanze organiche.

A bassissime dosi il monossido di carbonio non è pericoloso, ma già a livelli di concentrazione **nel sangue pari al 10-20% il soggetto avverte i primi sintomi** dovuti

all'esposizione a monossido di carbonio, quali lieve emicrania e stanchezza.

La principale sorgente di CO è rappresentata dal traffico, in particolare dai gas di scarico dei motori a benzina. La concentrazione di CO emessa dagli scarichi dei veicoli è strettamente connessa alle condizioni di funzionamento del motore: si registrano concentrazioni più elevate con motore al minimo e in fase di decelerazione, condizioni tipiche di traffico urbano intenso e rallentato.

BIOSSIDO DI ZOLFO (SO₂)

L'assenza di colore, l'odore acre e pungente e l'elevata reattività a contatto con l'acqua sono le caratteristiche principali degli ossidi di zolfo, genericamente indicati come SO_x (tra cui è compreso SO₂).

In natura tale tipo di inquinamento è causato dalle eruzioni vulcaniche. A livello antropico, le **principali fonti** di inquinamento sono riconducibili all'**utilizzo di combustibili fossili in cui lo zolfo è naturalmente presente in concentrazioni variabili**.

BENZENE (C₆H₆)

Il benzene (C₆H₆) è una sostanza chimica liquida e incolore, dal caratteristico odore aromatico pungente. È presente nell'aria in fase vapore, con tempi di permanenza che variano da alcune ore ad alcuni giorni.

La maggior parte del benzene oggi prodotto trova **impiego nella chimica**, come materia prima per numerosi composti secondari, a loro volta utilizzati per produrre plastiche, resine, detergenti, pesticidi, intermedi per

l'industria farmaceutica, vernici, collanti, ecc. Il benzene è **contenuto anche nelle benzine, in cui viene aggiunto, insieme ad altri composti aromatici, per conferire le volute proprietà antidetonanti** in sostituzione totale (benzina verde) dei composti del piombo.

Sono accertati effetti avversi: l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) classifica il benzene come **sostanza cancerogena accertata per l'uomo** (gruppo 1).

METALLI PESANTI

Nel particolato atmosferico possono essere presenti metalli di varia natura. I principali sono Cadmio (Cd), Zinco (Zn), Rame (Cu), Nichel (Ni), Piombo (Pb), Arsenico (As) e Ferro (Fe).

Tra i metalli che sono oggetto di monitoraggio, quelli a **maggiore rilevanza sotto il profilo tossicologico** sono il **nichel**, il **cadmio**, l'**arsenico** e il **piombo**. I composti inorganici del nichel, del cadmio e dell'arsenico sono classificati dalla Agenzia Internazionale di Ricerca sul Cancro come cancerogeni per l'uomo. Per il piombo è stato evidenziato un ampio spettro di effetti tossici.

I metalli presenti nel particolato atmosferico provengono da **una molteplice varietà di fonti: il cadmio e lo zinco sono originati prevalentemente da processi industriali, il rame e il nichel provengono dalla combustione, il piombo dalle emissioni autoveicolari**.

Le maggiori fonti antropogeniche dell'arsenico sono le attività estrattive, la fusione di metalli non ferrosi e la combustione di combustibili fossili. Il ferro proviene dall'erosione dei suoli, dall'utilizzo di combustibili fossili e dalla produzione di leghe ferrose.

IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI (IPA) E BENZO(A)PIRENE (B(a)P)

Gli idrocarburi policiclici aromatici costituiscono un **numero gruppo di composti organici formati da uno o più anelli benzenici**, derivanti dalla combustione incompleta di materiali organici. Gli IPA sono emessi in atmosfera **quasi totalmente adsorbiti sul materiale particolato**. Molti composti sono cancerogeni.

Il composto più studiato e rilevato è il **benzo(a)pirene**, che ha una struttura con cinque anelli aromatici condensati. È una delle prime sostanze di cui si è **accertata la cancerogenicità** (classificazione nel gruppo 1 da parte dello IARC) ed è stato quindi utilizzato come indicatore dell'intera classe di composti policiclici aromatici.

Gli IPA sono contenuti nel carbone e nei prodotti petroliferi (particolarmente nel gasolio e negli oli combustibili). Essi vengono **emessi in atmosfera come residui di combustioni**

incomplete in alcune attività industriali (cokerie, produzione e lavorazione grafite, trattamento del carbon fossile) e **nelle caldaie** (soprattutto quelle alimentate con combustibili solidi e liquidi pesanti); **inoltre**, sono **presenti nelle emissioni degli autoveicoli** (sia diesel sia benzina). La presenza di questi composti nei gas di scarico degli autoveicoli è dovuta sia alla frazione presente come tale nel carburante, sia alla frazione che per pirosintesi ha origine durante il processo di combustione.

Una sorgente significativa di IPA è la combustione di biomassa legnosa per il riscaldamento domestico. L'Agenzia europea per l'ambiente ha stimato che nel 2021, negli Stati membri della Ue, l'83% delle emissioni di benzo(a)pirene sia dovuto alla combustione da riscaldamento. In generale, **l'emissione di IPA nell'ambiente risulta molto variabile a seconda del tipo di sorgente, del tipo di combustibile e della qualità della combustione**.

Particolato atmosferico

Particolato - la normativa di riferimento



TABELLA 1
Limiti normativi, valori obiettivo e altri obiettivi ambientali per PM_{10} e $PM_{2,5}$

FRAZIONE GRANULOMETRICA	TARGET DI PROTEZIONE	OBIETTIVI AMBIENTALI	PERIODO DI MEDIAZIONE	METRICA DELL'OBIETTIVO AMBIENTALE	VALORI NUMERICI DEGLI OBIETTIVI AMBIENTALI
PM_{10}	Salute	Valore limite	Giorno	Giorni di eccedenza nell'anno civile del valore limite di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	35
		Valore limite	Anno civile	Media annua	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$
$PM_{2,5}$	Salute	Obbligo di concentrazione dell'esposizione	3 anni civili	Indicatore di Esposizione Media (IEM)	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$
		Obiettivo di riduzione dell'esposizione			Da 0 a 20% e dipendente dal IEM dell'anno di riferimento. Da raggiungere entro il 2020 (Allegato XIV, punto 2 Dlgs 155/2010)
		Valore obiettivo	Anno civile	Media annua	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (dal 2010)
		Valore limite			$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (dal 2015)

PM_{10} - lo stato e i trend

I Valori Limite (VL) annuale e giornaliero per il PM_{10} , fissati dalla Direttiva 2008/50/CE, sono stati superati nelle zone di pianura e nell'agglomerato di Bologna fin dalla loro entrata in vigore nel 2005.

Nel corso del tempo l'andamento delle concentrazioni medie annuali è migliorato, tanto che **dal 2013 non viene registrato più alcun superamento del VL annuale**.

Continuano, invece, a permanere criticità relative al superamento del VL giornaliero ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare per oltre 35 giorni in un anno). Il VL giornaliero risulta sistematicamente superato in gran parte delle stazioni di traffico e di fondo urbano e suburbano; in alcuni anni si è verificato il superamento del VL giornaliero anche nelle stazioni di fondo rurale (figura 2), collocate in diverse condizioni geografiche, dalla pianura alle zone appenniniche. **Il numero maggiore di superamenti si registra nelle stazioni da traffico.**

I grafici "box plot", riportati in figura 1 e 2, permettono di avere una visione d'insieme dell'andamento pluriennale.

“
Valore limite annuale PM_{10} :
entro i limiti normativi dal 2013

“
Valore limite giornaliero PM_{10} :
superato continuativamente
in particolare nelle stazioni
da traffico

FIGURA 1
Andamento della concentrazione media annuale di PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), dal 2013 al 2022

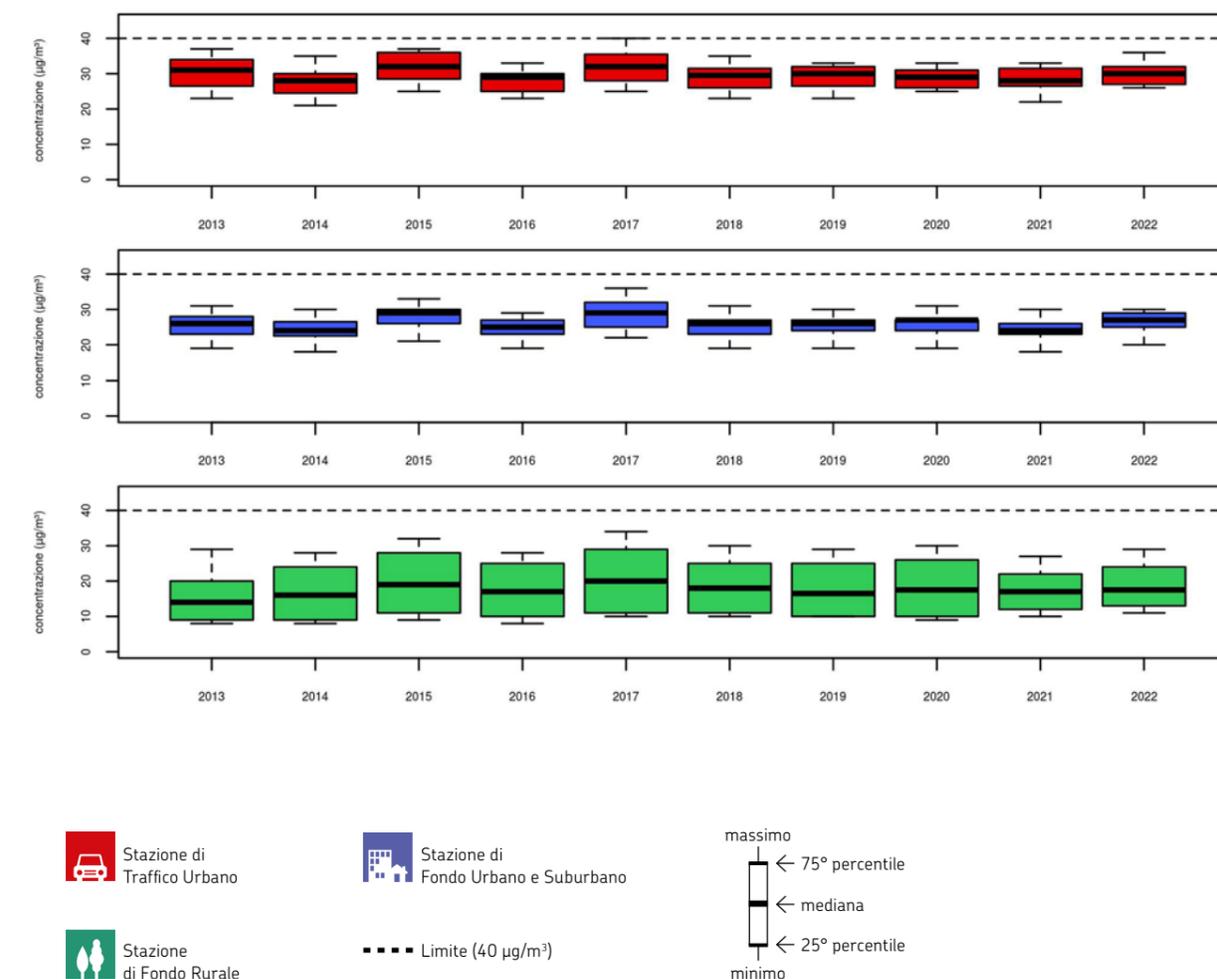
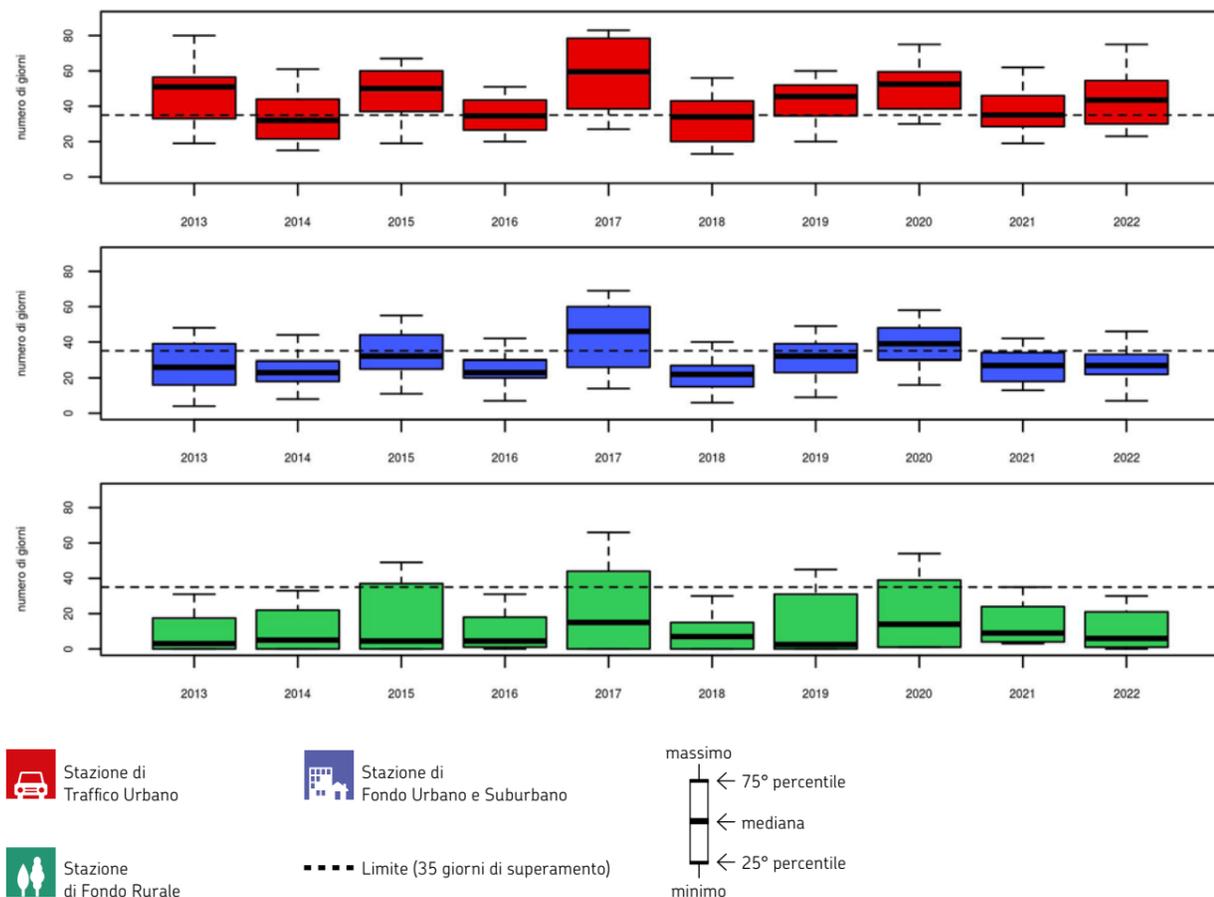


FIGURA 2
Andamento del numero di superamenti (giorni) del valore limite giornaliero per il PM_{10} , dal 2013 al 2022



La **variabilità intra-annuale** risulta **maggiore nelle stazioni di fondo rurale**, caratterizzate da situazioni geografiche diverse tra loro, ed è diversa negli anni.

In **tutte le tipologie di stazioni** si osserva una **variazione interannuale** nella distribuzione dei valori medi annuali e, in misura maggiore, del numero di superamenti del valore limite giornaliero; variazione legata all'andamento meteorologico, così come descritto nel [capitolo 1](#). L'ultimo quinquennio ha visto il superamento del VL giornaliero, nelle stazioni rurali, solamente nel 2019 e 2020.

La valutazione è completata dalle **mappe riferite alle concentrazioni di fondo** (medie annue e numero di giorni di superamento) ottenute mediante l'impiego della catena modellistica ([figure 3 e 4](#)).



La variabilità del PM_{10} all'interno di un anno: risulta maggiore nelle stazioni di fondo rurale

FIGURA 3
Stima della distribuzione territoriale della concentrazione media annuale di fondo del PM_{10} in Emilia-Romagna (2018-2022)

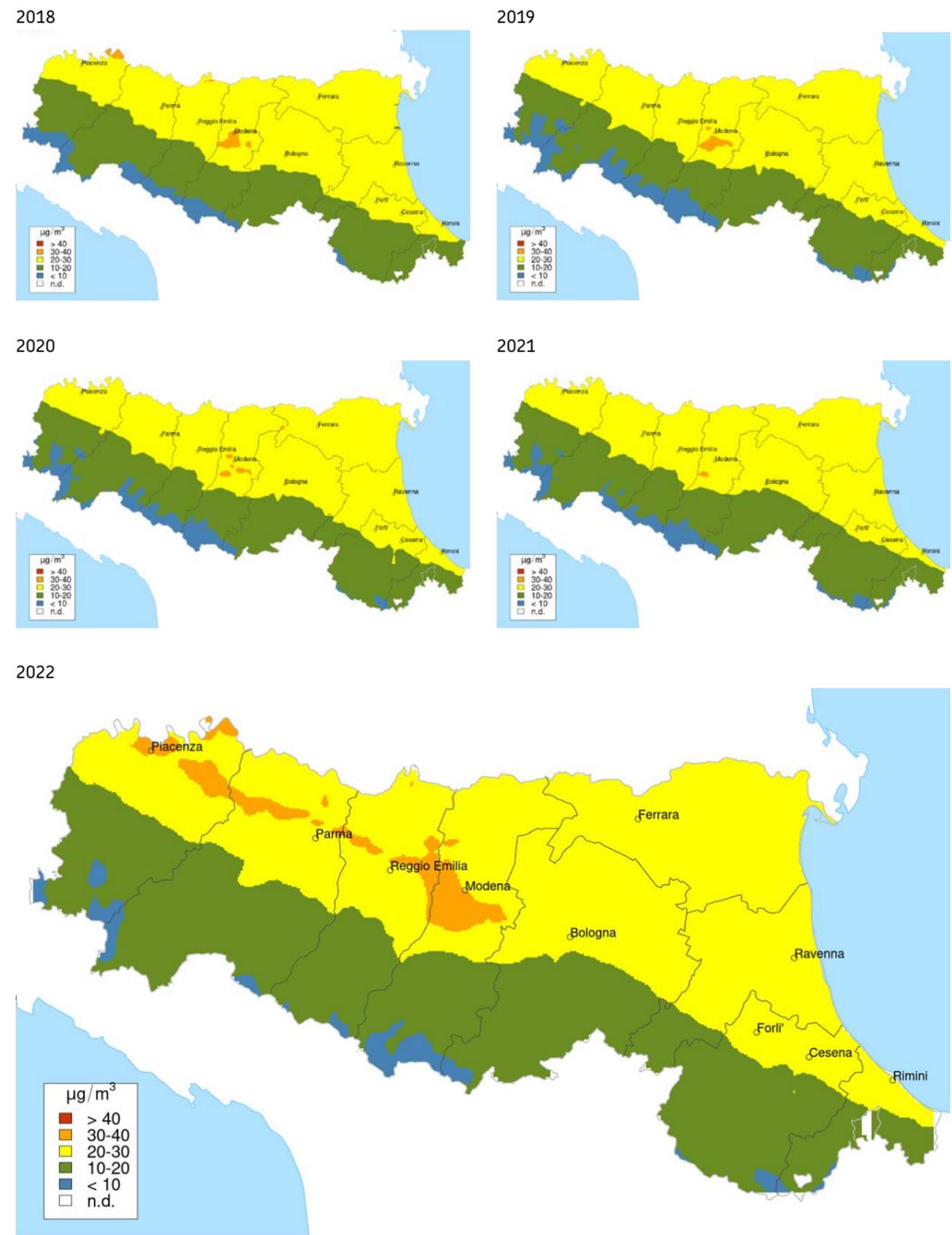
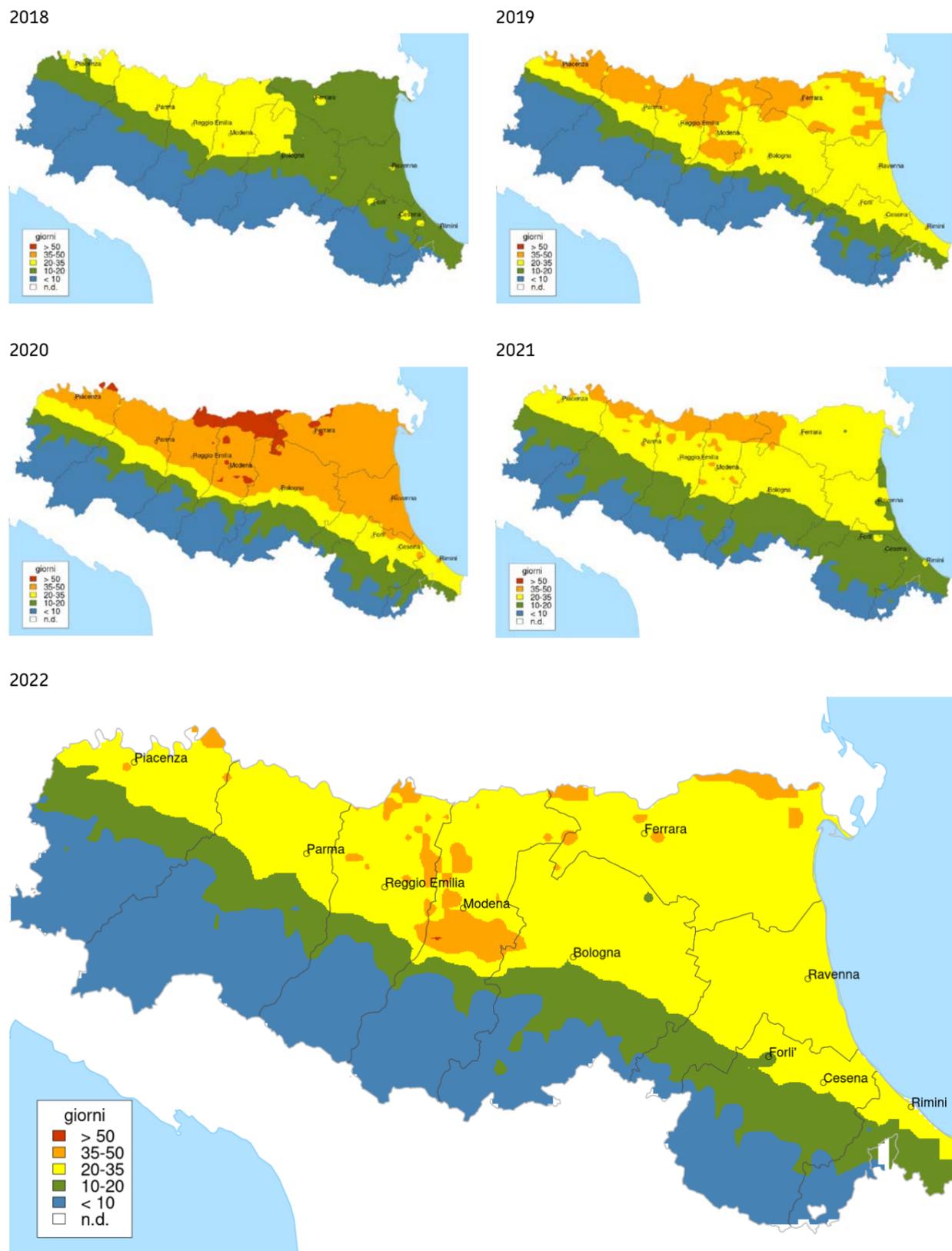


FIGURA 4
Stima della distribuzione territoriale del numero di superamenti del valore limite giornaliero del PM₁₀ in Emilia-Romagna (2018-2022)



Il trend descrive, in modo sintetico e in forma aggregata per tipologia di stazione, la qualità dell'aria in regione, ed è finalizzato a valutarne la **tendenza sul lungo periodo**.

L'analisi del trend, realizzata attraverso il metodo di Theil-Sen, è stata effettuata sulle medie mensili a partire dai dati giornalieri, per singola stazione, ed è rappresentata in [appendice](#).

I risultati sono stati espressi suddividendo le stazioni disponibili in 4 classi in base al tipo: da traffico, di fondo urbano/suburbano, di fondo rurale in pianura, di fondo rurale in Appennino.

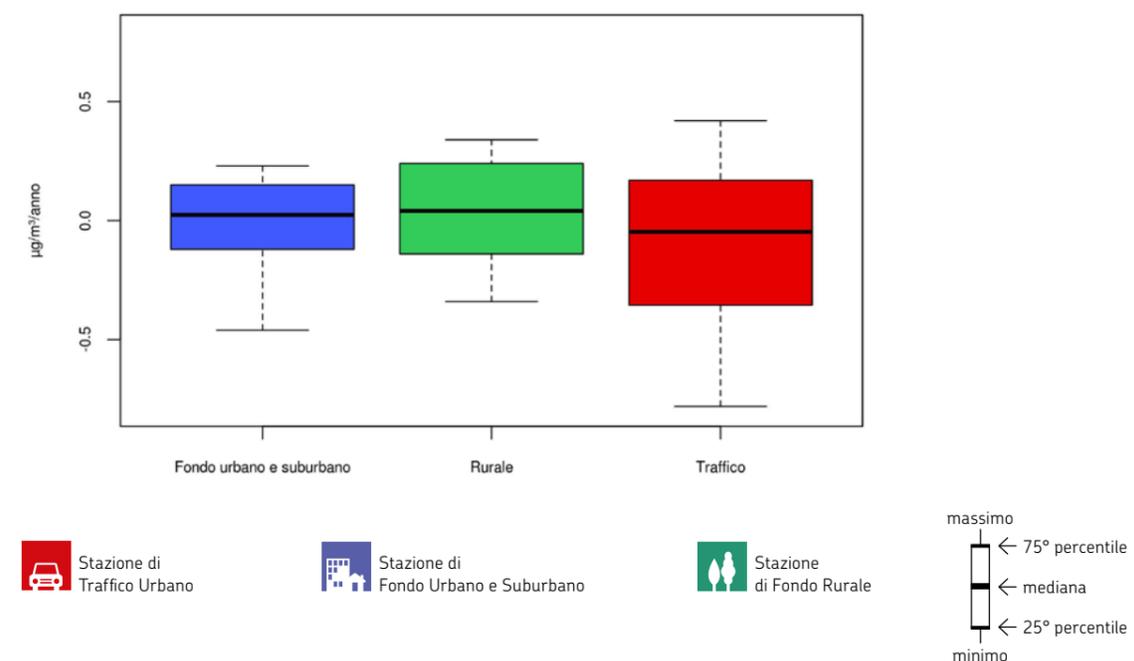
In [figura 5](#) sono riportate le stime dei trend raggruppate per tipologia di stazione di misura, calcolate sui dati delle stazioni di monitoraggio selezionate disponibili nel periodo 2013-2022.

L'analisi per tipo di stazione mostra una sostanziale stazionarietà (lieve diminuzione per le stazioni di traffico con trend mediano pari a $-0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{anno}$).

Come mostrato in [appendice](#), alla variabilità dovuta alle condizioni meteorologiche si sovrappone una tendenza alla diminuzione, visibile in circa la metà delle stazioni e statisticamente significativa in sei di esse.

”
Trend PM₁₀: sostanziale stazionarietà nelle diverse tipologie di stazione

FIGURA 5
Distribuzione del tasso di variazione annuale (trend) di PM₁₀ per tipologia di stazione (2013-2022)



PM_{2,5} – lo stato e i trend

Le misure sistematiche di questo inquinante sono disponibili a partire dal 2008, mentre dal 2005 al 2007 sono disponibili i dati da una sola stazione. I dati di monitoraggio e le stime modellistiche mostrano come la concentrazione media annuale di PM_{2,5} presenti una **distribuzione relativamente uniforme sul territorio**. Questa relativa omogeneità è conseguenza dell'origine prevalentemente secondaria di questo inquinante; la **forte componente secondaria** si riflette anche nella marcata componente di fondo, evidenziata dall'analisi PMF (Positive Matrix Factorization) descritta nelle pagine seguenti.

Il **valore limite della concentrazione media annuale per il PM_{2,5} (25 µg/m³) è stato superato solo sporadicamente, in alcune stazioni di fondo rurale, nel 2011, 2012, 2015 e 2017, anni meteorologicamente favorevoli all'accumulo di polveri**. L'andamento complessivamente presenta una **lieve tendenza alla diminuzione** nella concentrazione di questo inquinante (figura 6), confermata dall'analisi del trend. In riferimento al periodo 2018-2022, come mostrato in figura 7, la **concentrazione annua di fondo di PM_{2,5} è sempre rimasta al di sotto del limite di legge di 25 µg/m³**.



PM_{2,5}:
inquinante dall'origine
prevalentemente secondaria



Valore limite annuale PM_{2,5}:
superato sporadicamente
in alcune stazioni di fondo rurale
non negli ultimi 5 anni

FIGURA 6 Andamento della concentrazione media annuale di PM_{2,5} (µg/m³), dal 2013 al 2022 in alto stazioni di traffico urbano, in mezzo stazioni di fondo urbano e suburbano, in basso stazioni di fondo rurale

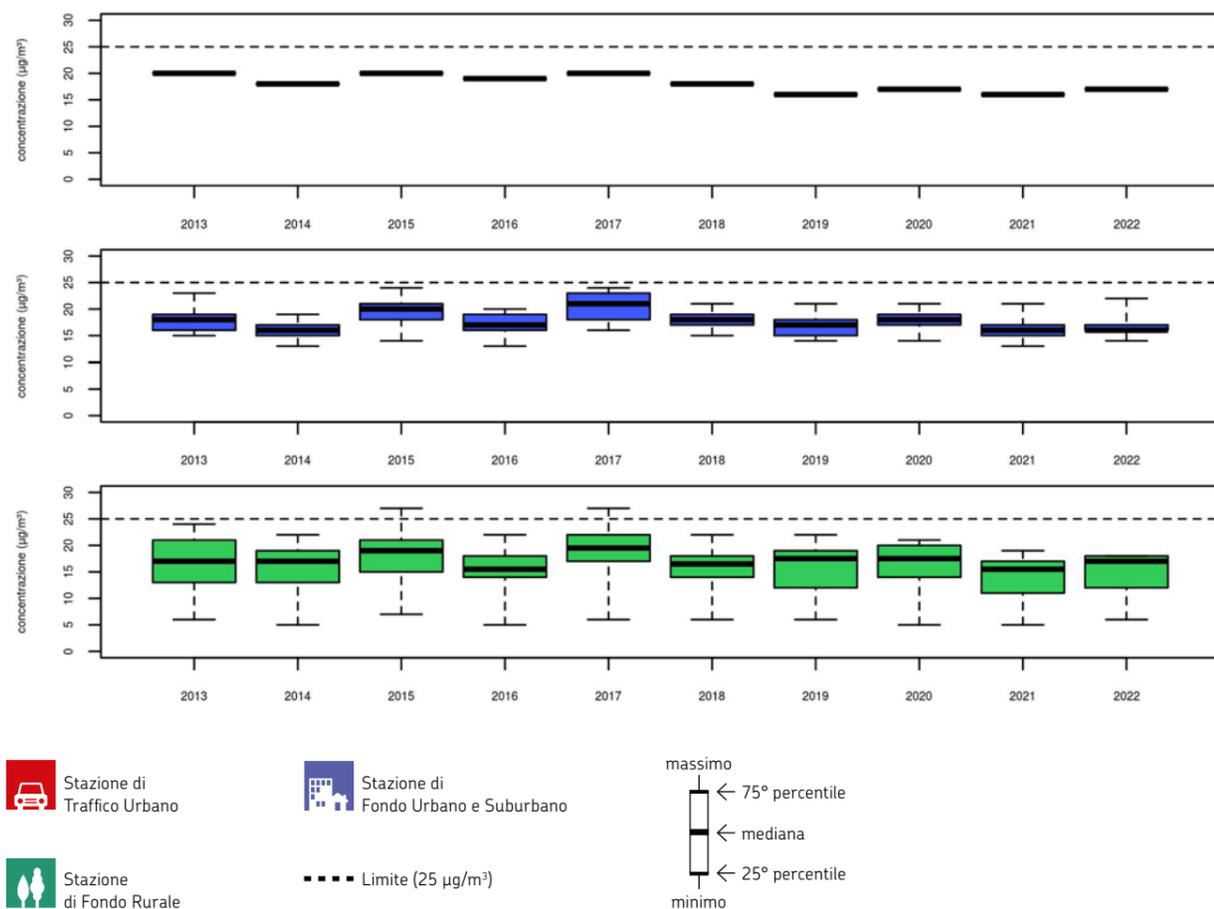
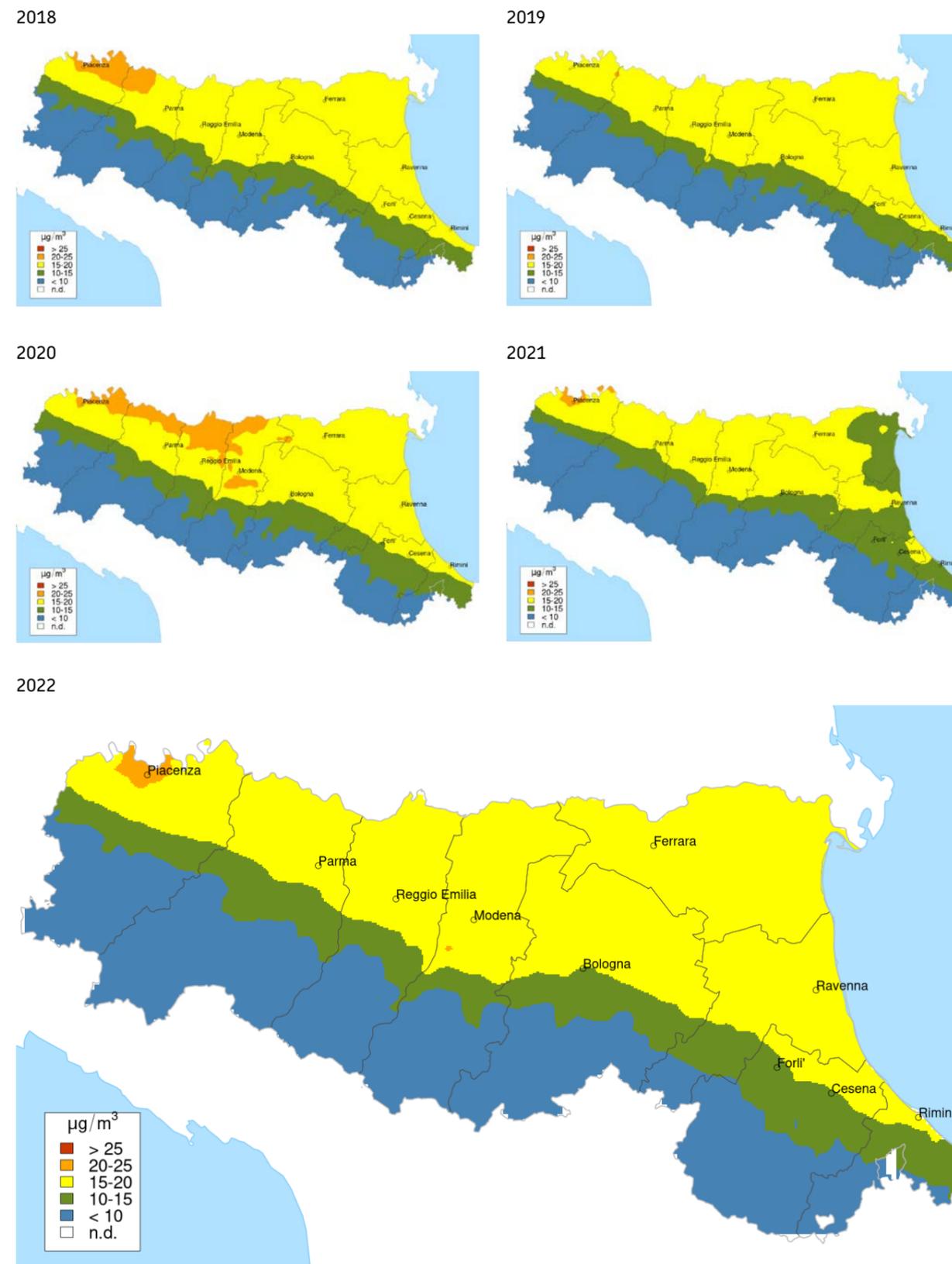


FIGURA 7

Stima della distribuzione territoriale della concentrazione media annuale di fondo di PM_{2,5} in Emilia-Romagna (2018-2022)



Il trend descrive, in modo sintetico e in forma aggregata per tipologia di stazione, la qualità dell'aria in regione, ed è finalizzato a valutarne la **tendenza sul lungo periodo**. L'analisi statistica è stata svolta col metodo di Theil-Sen.

I risultati sono stati espressi suddividendo le stazioni disponibili in 4 classi in base al tipo: da traffico, di fondo urbano/suburbano, di fondo rurale in pianura, di fondo rurale in Appennino.

Le stime dei trend nel periodo 2013-2022, raggruppate per tipologia stazione di misura e riportate in **figura 8**, **mostrano una diminuzione, sia nelle aree di fondo sia in aree rurali**. Tuttavia il numero delle stazioni di monitoraggio selezionabili risulta esiguo e, dunque, il risultato non è del tutto generalizzabile.

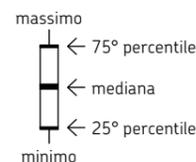
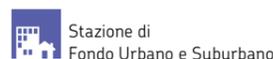
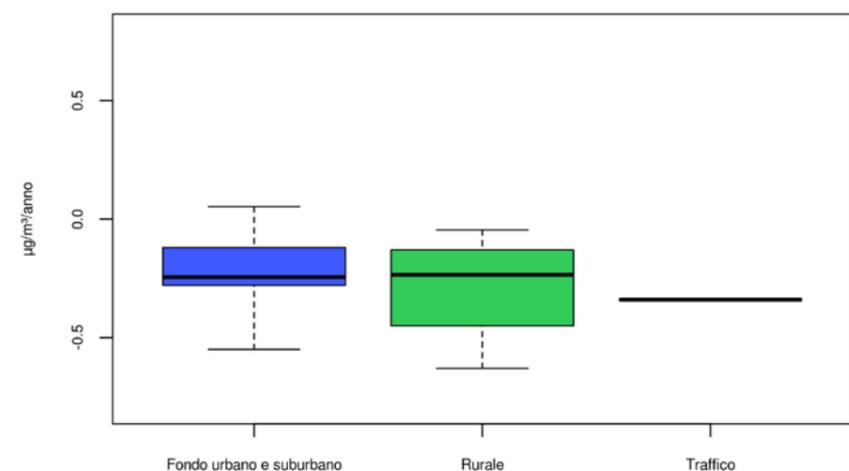
Castelluccio è l'unica stazione rurale nell'Appennino, il cui valore del trend corrisponde a $-0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ all'anno; Porta San Felice è la sola stazione da traffico con trend di $-0,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ all'anno.

L'analisi del trend è stata effettuata sulle medie mensili a partire dai dati giornalieri, per singola stazione, ed è rappresentata in **appendice**. I risultati mostrano per il $\text{PM}_{2,5}$ una tendenza alla diminuzione nella pressoché totalità delle stazioni, con un intervallo statisticamente significativo in 13 di queste (**vedi appendice**).



Analisi trend $\text{PM}_{2,5}$:
tendenza alla diminuzione sia nelle aree di fondo sia in quelle rurali

FIGURA 8
Distribuzione del tasso di variazione annuale (trend) di $\text{PM}_{2,5}$ per tipologia di stazione (2013-2022)



Composizione chimica del $\text{PM}_{2,5}$ e del PM_{10}

Il termine **materiale particolato (Particulate Matter: PM)** comprende particelle liquide e solide in atmosfera, la cui dimensione e composizione chimica può variare a seconda di origine, tempo di permanenza in atmosfera e condizioni meteorologiche (come l'umidità, la radiazione solare o la capacità di rimescolamento degli strati d'aria).

Alcune sostanze sono presenti in quantità relativamente alta e concorrono in modo importante alla composizione della massa totale del PM e possono essere raggruppate principalmente in una frazione carboniosa e una inorganica. **L'aerosol è inoltre composto da numerosissime specie in tracce che, pur non incidendo singolarmente in modo significativo sulla composizione della massa**, possono avere una importanza rilevante, ad esempio, **perché indicative della provenienza da specifiche sorgenti, o perché nocive per salute o ambiente**. Queste specie in tracce si trovano spesso in concentrazioni di pochi nanogrammi (cioè milionesimi di grammo), o frazioni di essi, per metro cubo di aria campionata e quindi, a volte, in concentrazioni troppo basse per poter essere identificate o quantificate.

La **frazione carboniosa** è la parte di massa collegata a uno degli elementi maggiormente presenti nel particolato, **il carbonio**. Esso può essere legato solo a se stesso come nella fuliggine, che comunemente viene rappresentato con buona approssimazione dal **carbonio elementare** (Elemental Carbon: EC) o dal **Black Carbon** (BC). La maggior parte del carbonio presente nel particolato si trova però legato ad altri elementi per comporre una grande varietà di molecole organiche che possono essere sia primarie che secondarie, come ad esempio il benzo-a-pirene (B(a)P), il cui monitoraggio è stabilito per legge, o il levoglucosano che è un marker specifico della combustione della biomassa legnosa. Nella pratica analitica è impossibile distinguere e quantificare singolarmente tutte le specie organiche presenti nell'aerosol, quindi spesso si esprime il totale del carbonio legato a queste molecole definito **carbonio organico** (Organic Carbon: OC).

La quantificazione di OC presente nel PM però non rappresenta l'esatta quantità di massa di particolato espressa dalla somma delle sostanze organiche. Quella quantità, definita **materia organica** (Organic Matter: OM), deve infatti tenere conto, oltre che degli atomi di carbonio, anche degli altri atomi presenti nelle molecole organiche. La stima dell'apporto totale delle sostanze organiche alla massa del particolato si può ottenere moltiplicando la quantità OC per un valore che può essere misurato sperimentalmente con alcune tecniche avanzate o, più comunemente, stimato o ricavato dalle pubblicazioni scientifiche internazionali.

La **frazione ionica** (atomi o molecole che hanno una carica elettrica positiva o negativa) inorganica del PM comprende alcune delle sostanze che concorrono a comporre una parte importante della massa, e poi altre specie in concentrazione minore. Gli ioni principali (nitrate, solfato e ammonio) hanno tutti origine secondaria, derivano cioè da gas precursori che reagiscono in atmosfera.

La somma di questi tre ioni viene spesso definita come aerosol secondario inorganico (SIA: Secondary Inorganic Aerosol).

Le diverse specie si trovano su particelle a dimensioni differenti in funzione delle loro origini quindi, analizzando diversi tagli dimensionali, si potranno individuare varie caratteristiche dell'aerosol, ad esempio la



Le particelle in atmosfera:
hanno dimensioni e composizione chimica che può variare a seconda di: origine, permanenza in aria, meteorologia



Le specie chimiche che compongono l'aerosol:
possono essere indicative di specifiche sorgenti

parte superiore a 2.5 µm di diametro contiene spray marino o materiale crostale che si trovano a concentrazioni molto basse a diametri inferiori.

Arpae, grazie al progetto Supersito, studia dal 2011 la composizione chimica giornaliera del PM_{2,5} in 4 siti della regione: 3 fondi urbani (Bologna, Parma e Rimini) e un fondo rurale, S.Pietro Capofiume (BO). A questa serie storica, dal 2018, si è affiancata la composizione chimica del PM₁₀ in un fondo urbano di Bologna, grazie al progetto Life-Prepair (<https://www.life-prepair.eu/>).

Tale progetto Life-Prepair, attivo dal 2017, è nato con l'obiettivo di realizzare strumenti e azioni per il miglioramento della qualità dell'aria nel Bacino Padano, implementando le misure previste dai piani regionali e dall'Accordo di Bacino su scala maggiore e rafforzando la sostenibilità e la durabilità dei risultati: il progetto copre la valle del Po e le regioni e le città che influenzano maggiormente la qualità dell'aria nel bacino. Le azioni di progetto si estendono anche alla Slovenia con lo scopo di valutare e ridurre il trasporto di inquinanti anche oltre il mare Adriatico.

Le informazioni sulla composizione del particolato permettono di capire da cosa esso è realmente formato e rendono possibile anche eseguire analisi che aiutino a comprendere il ruolo delle diverse sorgenti che concorrono a crearlo, come approfondito in seguito. La disponibilità di una serie storica corposa consente di verificare l'eventuale presenza di trend delle specie che compongono il particolato anche in confronto all'andamento della massa totale.

Il carbonio elementare mostra un trend in diminuzione superiore a quello della massa del particolato stesso, **indice di un progressivo calo dell'importanza relativa delle sorgenti da combustione** (che restano comunque la sorgente primaria più rilevante dell'aerosol), mentre i componenti secondari, in particolare inorganici, non danno indicazioni di contrarsi altrettanto.

I dati di composizione del PM_{2,5} ottenuti nei siti della regione sono pubblicati periodicamente sul sito di Arpae (Report della speciazione chimica). Le misure sul PM₁₀ sono invece raccolte nei report di LIFE Prepair e presenti sul sito di progetto (Report LIFE Prepair).



La composizione del particolato: permette di risalire al ruolo delle sorgenti generatrici

FIGURA 9
Composizione media di PM₁₀ e PM_{2,5} a Bologna tra aprile 2018 e marzo 2021 sia sull'intero periodo che considerando solo i mesi caldi (aprile-settembre) o solo i mesi freddi (ottobre-marzo)

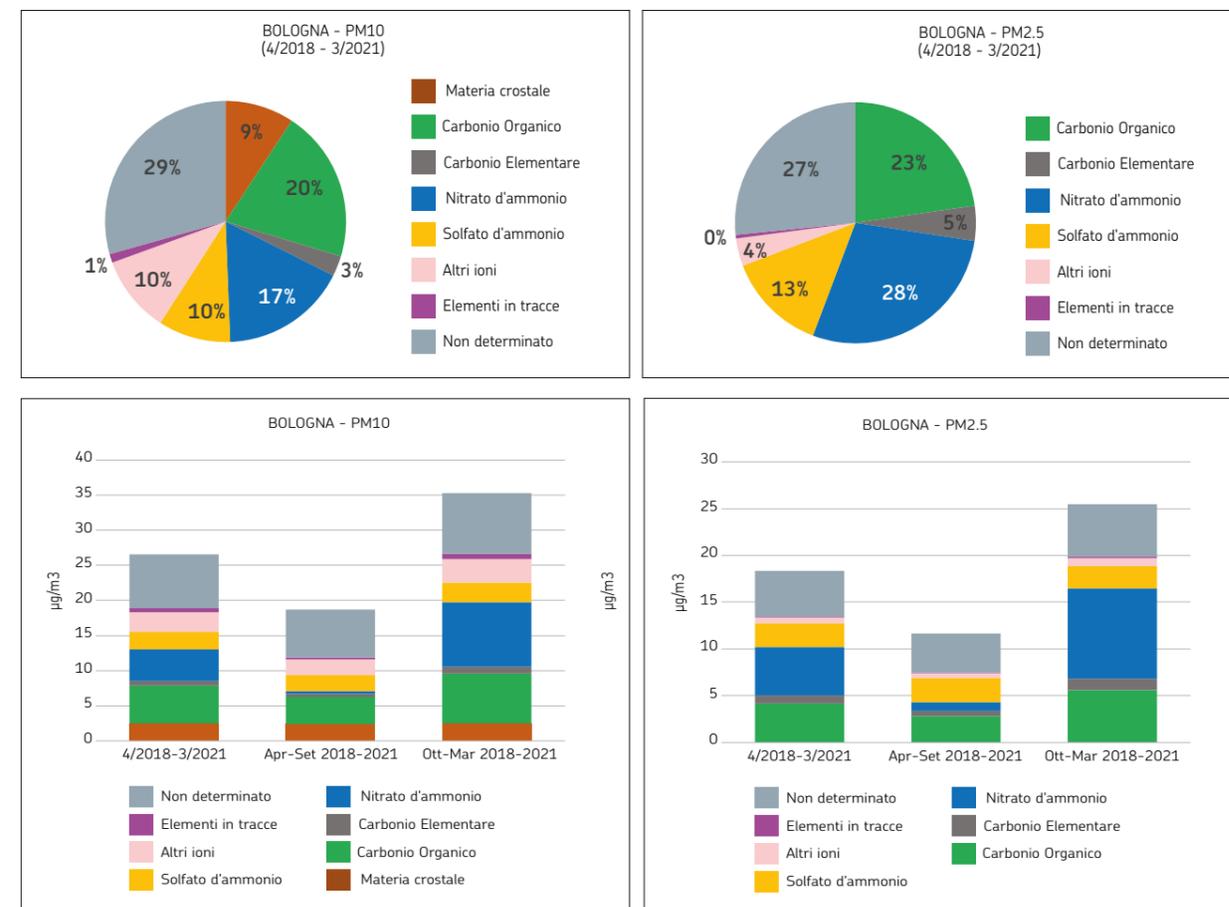
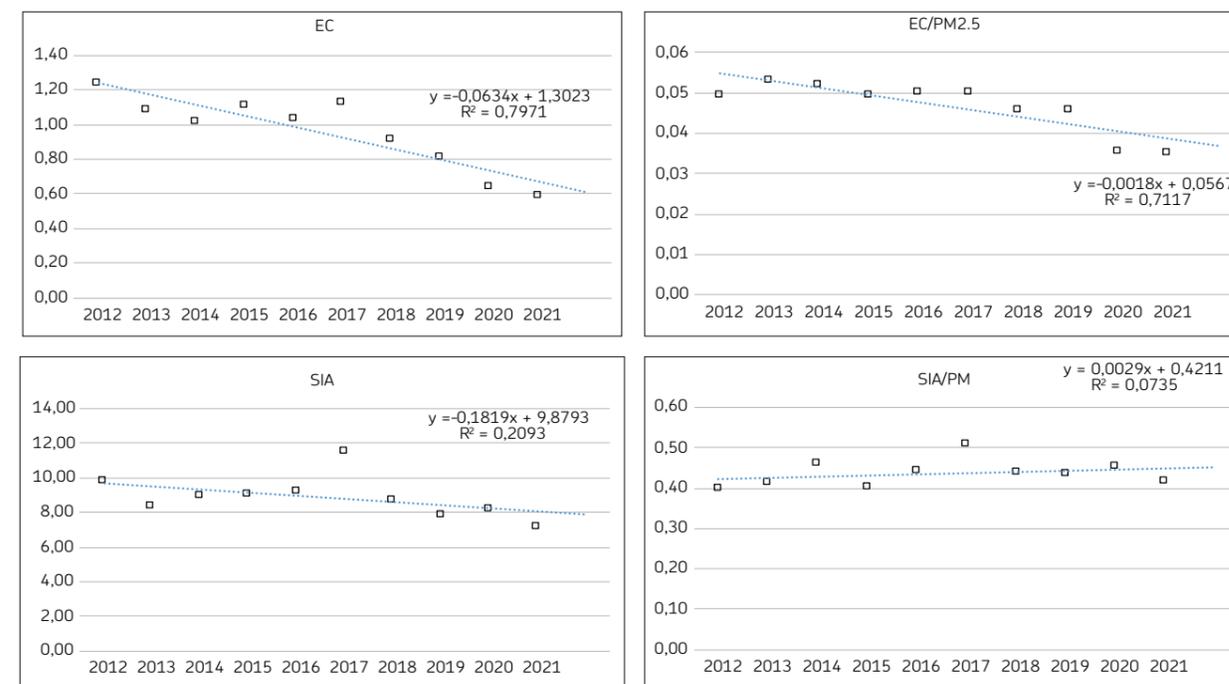


FIGURA 10
Concentrazione media annua nel PM_{2,5} dei siti dell'Emilia-Romagna di alcuni componenti del particolato, carbonio elementare (in alto) e frazione secondaria inorganica (in basso), sia in valore assoluto (a sinistra) che in rapporto alla massa del PM_{2,5} (a destra)



Ripartizione fra le sorgenti (Source apportionment)

Introduzione

Il termine "source apportionment" indica lo studio della ripartizione del particolato atmosferico fra le sorgenti che ne sono responsabili. Tale ripartizione può essere effettuata sia a partire dalla conoscenza delle emissioni delle diverse sorgenti inquinanti, sia a partire dall'analisi della composizione chimica del particolato campionato in un sito detto "recettore" (mediante tecniche chiamate appunto "modelli al recettore").

L'origine geografica dell'inquinamento da PM₁₀ e PM_{2,5}

Seguendo uno schema adottato in ambito europeo, le concentrazioni medie annue di inquinanti su un territorio possono essere rappresentate come la somma di tre contributi geograficamente distinti tra loro: **fondo a larga scala**, **fondo urbano** e **contributo locale**, dove il contributo a grande scala determina le concentrazioni rilevate dalle stazioni di fondo rurale, poste lontano dall'influenza diretta delle aree urbane e industriali. La componente a grande scala può essere ulteriormente distinta in una parte dovuta al contributo emissivo della sola regione Emilia-Romagna. Nelle aree urbane e suburbane lontane da importanti fonti emissive il contributo urbano determina le concentrazioni rilevate nelle stazioni di fondo urbano. Localmente inoltre, a bordo strada o laddove si determinano condizioni di forte accumulo (hot spot) degli inquinanti emessi da sorgenti vicine, il contributo a scala locale determina il raggiungimento dei livelli misurati dalle stazioni di traffico e industriali.

L'analisi dell'origine geografica dell'inquinamento da PM₁₀ in Emilia-Romagna è stata condotta utilizzando i dati delle stazioni della rete fissa e le valutazioni prodotte dalla suite modellistica NINFA (descritta in Appendice) ed è riferita alla zonizzazione regionale ai sensi del Dlgs 155/2010.

I risultati di [figura 12](#) mostrano che:

- la componente a grande scala (barre verdi chiare e scure) è decisamente preponderante; di tale componente la quota ascrivibile alle emissioni regionali (barre verdi scure) è circa un terzo nelle zone di pianura più vicine ai confini regionali e quasi metà nell'agglomerato di Bologna; una parte di tale contributo è da imputare anche al trasporto di polvere (*dust*) e ai processi di erosione/risospensione che normalmente coinvolgono la frazione più grossolana del particolato;
- il contributo dovuto al fondo urbano (barre blu) incrementa la concentrazione media con contributi percentuali attorno al 10%;
- nelle aree di pianura e nell'agglomerato di Bologna la componente locale (barra arancione) contribuisce a circa il 20% delle concentrazioni misurate.



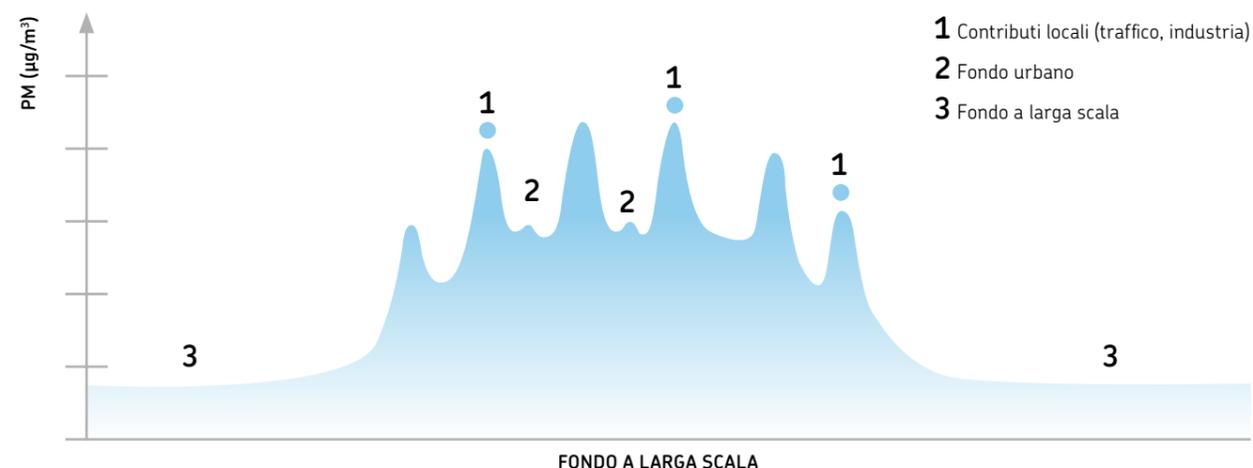
La "ripartizione fra sorgenti" può essere effettuata:

- o partendo dalle emissioni delle sorgenti inquinanti
- o partendo dall'analisi chimica del particolato campionato con modelli "al recettore"



FIGURA 11

Le principali componenti spaziali che contribuiscono al valore di concentrazione di un inquinante in area urbana

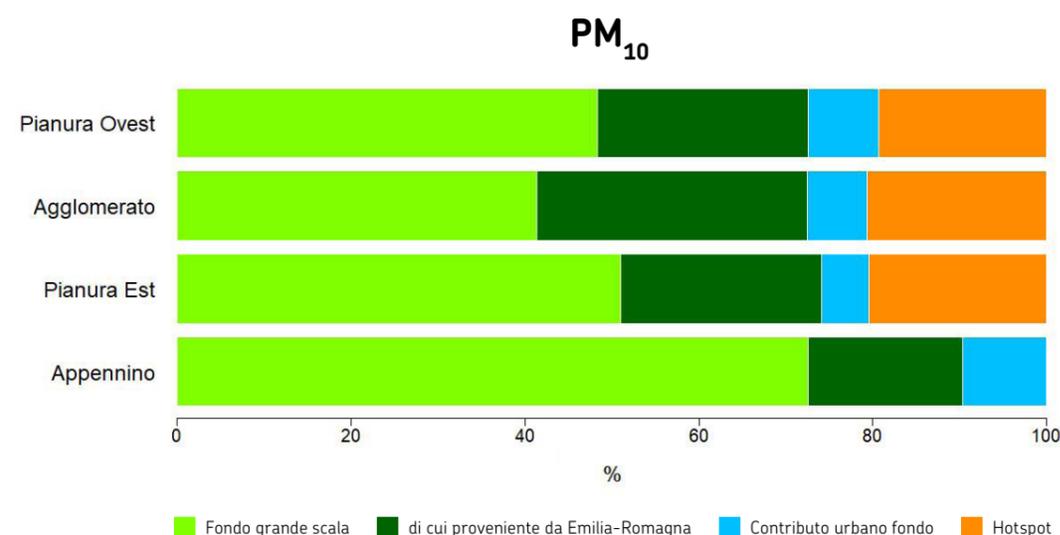


Fonte: Frank de Leeuw, PM workshop, June 2012



FIGURA 12

PM₁₀, ripartizione percentuale per aree geografiche dell'origine dell'inquinamento



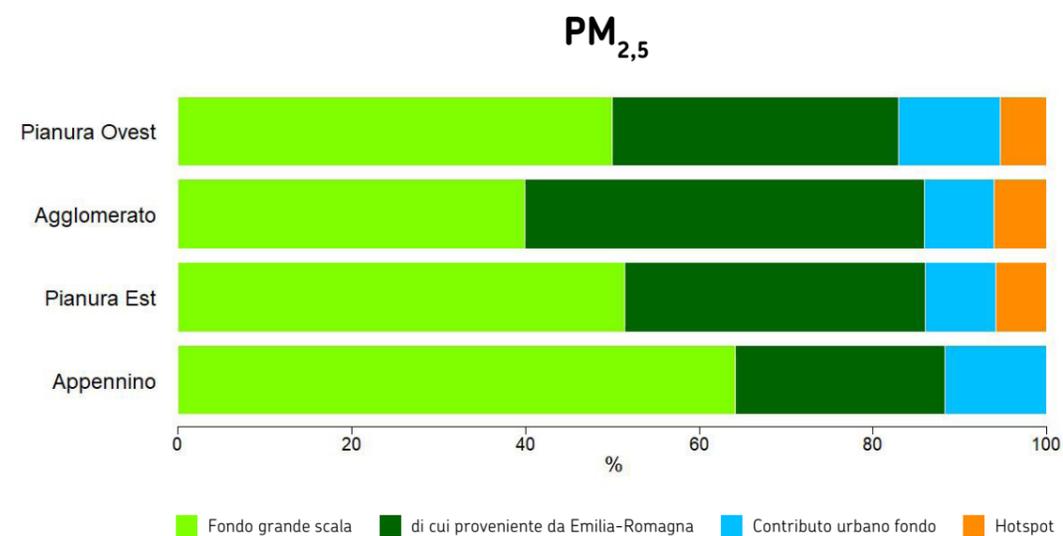
La concentrazione media di fondo di PM_{10} in Emilia-Romagna dipende quindi in buona parte dall'inquinamento a grande scala tipico della Pianura Padana. **Le azioni di riduzione delle emissioni inquinanti applicate sul solo territorio dell'Emilia-Romagna, anche se fondamentali per ridurre i livelli di PM_{10} nelle nostre città, possono agire solo in parte sul fondo a grande scala, rendendo indispensabile, per il rispetto dei limiti di qualità dell'aria, l'individuazione di azioni coordinate tra le varie regioni del Bacino Padano che portino a una riduzione complessiva delle emissioni inquinanti.**

Per quanto riguarda il $PM_{2,5}$, la stima dell'origine geografica dell'inquinamento (figura 13) mostra la **predominanza della componente attribuibile al fondo a grande scala** (barre verde chiaro e scuro) e un contributo meno rilevante da parte delle componenti di fondo urbano (barre azzurre) e locale (barre arancioni), conseguenza dell'origine in gran parte secondaria di questo inquinante. Questo è confermato anche dall'analisi delle concentrazioni misurate dalla rete di monitoraggio, che evidenzia concentrazioni medie annuali di $PM_{2,5}$ relativamente uniformi sul territorio regionale.



Le azioni di riduzione delle emissioni degli inquinanti: devono essere coordinate fra tutte le regioni del Bacino Padano per avere efficacia

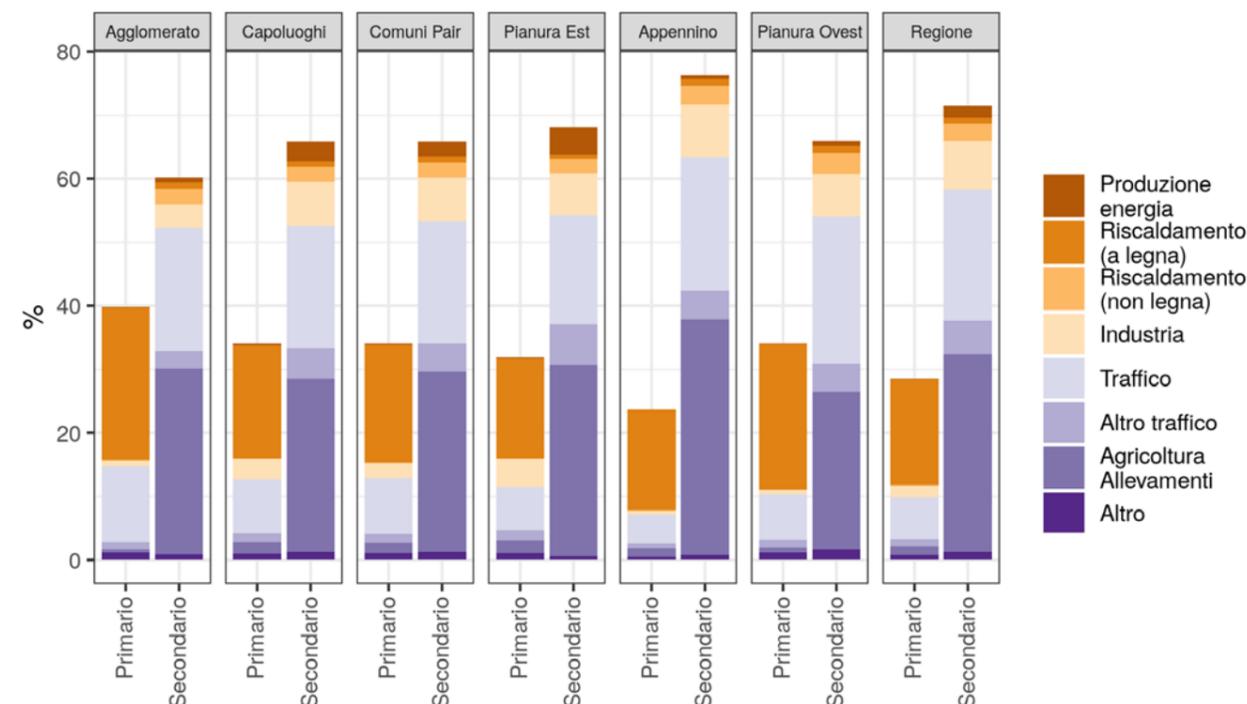
FIGURA 13
 $PM_{2,5}$, ripartizione percentuale per aree geografiche dell'origine dell'inquinamento



L'origine settoriale delle concentrazioni di PM_{10}

Tra diversi approcci utilizzabili, il **source apportionment modellistico** consiste nell'applicazione di tecniche specialistiche ai modelli di chimica e trasporto degli inquinanti (CTM) che consentono di individuare il contributo alle concentrazioni degli inquinanti - primari e secondari - da parte delle diverse sorgenti, identificate sia sulla base dei comparti emissivi sia su base geografica. Il metodo, chiamato **Brute Force Method (BFM)**, prevede l'esecuzione di simulazioni modellistiche utilizzando modelli fotochimici (CTM) variando di volta in volta le emissioni di inquinanti o di settori emissivi. Il contributo di ciascun settore emissivo viene quindi calcolato analizzando le differenze tra i risultati delle diverse simulazioni ottenute variando le emissioni e quelli della simulazione di riferimento. Uno dei limiti di questo approccio è la necessità di effettuare diverse simulazioni con un modello CTM con notevole utilizzo di tempo di calcolo. Per la valutazione in Emilia-Romagna è stata impiegata la nuova versione del tool **RIAT+** in modalità "scenario aggregato" che permette all'utente di variare le emissioni per area geografica, per macrosettore e per inquinante e di stimare

FIGURA 14
Ripartizione percentuale per aree geografiche dell'origine settoriale delle concentrazioni di PM_{10} dovute dalle emissioni regionali



(Traffico è riferito al contributo del trasporto su strada, Altro traffico è riferito ai mezzi aerei, marittimi e agricoli, Altro raggruppa i restanti settori emissivi)

la variazione corrispondente nelle medie annuali di PM_{10} senza dover effettuare simulazioni esplicite con un modello fotochimico. La valutazione è stata effettuata applicando le funzioni sorgente/recettore stimate con il modello fotochimico utilizzato da Arpa (NINFA). Per ogni comparto emissivo considerato sono state ridotte le emissioni del 20% in regione Emilia-Romagna lasciando inalterate quelle esterne. I comparti emissivi considerati sono: agricoltura, energia, industria, allevamenti, riscaldamento a legna, riscaldamento non a legna, altre sorgenti mobili, trasporto di veicoli pesanti (camion e autobus), trasporto di mezzi leggeri (autoveicoli, veicoli commerciali, moto).

L'impatto per ogni comparto è stato valutato come il rapporto tra la variazione percentuale delle concentrazioni calcolate come media pesata sulla popolazione e la variazione delle emissioni del comparto stesso. Lo scopo di tale valutazione è di stimare l'impatto delle sole emissioni regionali alle concentrazioni del PM_{10} ; per questo motivo la somma di tutti gli impatti è stata normalizzata a 1.

Per ogni area di interesse (comuni capoluogo, 30 comuni PAIR, zone e agglomerato, regione) è stato anche stimato il contributo in primario e secondario tenendo conto dell'inventario utilizzato nella versione di RIAT+ presente nel progetto PREPAIR. In questo modo (vedi [figura 14](#)) l'attribuzione delle sorgenti focalizzata alle sole emissioni della regione Emilia-Romagna ci consente di distinguere il contributo primario/secondario e delle diverse attività emissive.

Questa valutazione sull'impatto dei comparti emissivi focalizzata alle emissioni della sola regione Emilia-Romagna si intende complementare alla analisi geografica descritta nel paragrafo precedentemente riportato e in generale evidenzia che il contributo del traffico, delle pratiche agricole, allevamenti compresi, del riscaldamento domestico sono sostanzialmente equivalenti.

Più in dettaglio:

- la frazione primaria in media contribuisce al 30% delle concentrazioni con il contributo maggiore nell'agglomerato bolognese;
- le pratiche agricole e di allevamenti danno il loro contributo maggiore nella frazione secondaria per un valore complessivo di circa il 30% del totale con un minimo relativo nella pianura occidentale;
- il riscaldamento domestico a biomassa contribuisce quasi esclusivamente alla parte primaria con peso totale di circa il 20% e un massimo di circa il 25% sulla pianura occidentale;
- il traffico su strada è equamente suddiviso tra traffico pesante e mezzi leggeri con un contributo medio di circa il 30% di cui il 20% è nella frazione secondaria; il contributo maggiore del settore traffico è nelle zone urbane e nell'agglomerato dove raggiunge circa il 40%.

Modelli al recettore

In questo paragrafo si descrive la **ripartizione del particolato ($PM_{2,5}$ e PM_{10}) tra le sorgenti che lo hanno generato**, sulla base di un approccio "al recettore", complementare a quello visto nel paragrafo precedente per il PM_{10} . Questo approccio ricostruisce le sorgenti emissive che hanno contribuito a determinare il PM campionato in un sito, detto appunto "recettore", a partire dall'analisi della composizione chimica del particolato. Le sorgenti emissive sono infatti caratterizzate da una specifica combinazione di elementi chimici e questo fa sì che dal variare della composizione del particolato rilevato si possa ricostruire il variare del contributo delle diverse sorgenti.

La tecnica utilizzata, nota come **Positive Matrix Factorization (PMF)**, è

stata applicata su un sito di background urbano di Bologna nel periodo aprile 2018 - marzo 2022. I dati di speciazione chimica del PM_{10} sono raccolti nell'ambito del già citato progetto Prepair, mentre la speciazione chimica del $PM_{2,5}$ è cominciata nel 2011 grazie al progetto Supersito che va avanti tuttora anche dopo la conclusione del progetto (2016).

In entrambi i tagli dimensionali **la componente secondaria del particolato spiega una buona parte della massa**: circa i due terzi per il $PM_{2,5}$ e la metà per il PM_{10} . Per il restante particolato sono stati individuati alcuni fattori antropici e naturali: *traffico (con risollevarimento di materiale crostale)*, *combustione di biomassa*, *mix di attività produttive e di servizio*, *combustione di oli pesanti* (probabilmente imputabile al traffico navale), *suolo e sale marino*.

Per quel che riguarda i due **fattori di origine naturale, suolo e sale marino**, essi si trovano solo nel PM_{10} , per il fatto che si tratta di particelle più grossolane, distribuite principalmente nella frazione 2,5-10 μm . Il **fattore sale marino** è caratterizzato in particolare modo dal cloruro di sodio e spiega poche unità percentuali della massa di PM_{10} . I grafici che mostrano la provenienza di questo fattore ne confermano l'origine marina.

Il **fattore suolo**, responsabile di più del 10% del PM_{10} totale, è invece composto da elementi terrigeni che notoriamente compongono la crosta terrestre: Al, Si, Ca e Fe soprattutto e, in maniera secondaria, Ti, K, Mg, Mn e altri ancora; la serie storica dei contributi presenta alcuni picchi, alcuni dei quali corrispondenti a giorni di trasporto delle sabbie sahariane. Il contributo di questo fattore è leggermente superiore durante la stagione calda (da maggio a settembre), nonostante le maggiori capacità dispersive dell'atmosfera in questo periodo: ciò è dovuto in parte proprio alla stagionalità dei contributi sahariani, in parte al fatto che un terreno più secco si sgretola e risollewa più facilmente.

Per quanto riguarda i **fattori antropici**, su entrambi i tagli dimensionali il **traffico veicolare** risulta la sorgente con il maggiore impatto in termini percentuali, spiegando circa un quinto della massa totale del PM. La composizione chimica di questo fattore è caratterizzata dal carbonio elementare e organico (relativi allo scarico del motore), elementi emessi dalla abrasione di componenti del veicolo come freni, copertoni e frizioni (Sn, Sb, Fe, Zn, Cu,...) ed elementi terrigeni legati alla risospensione dovuta allo scorrimento sulla strada. Questa sorgente non presenta una particolare stagionalità: in estate il contributo in termini assoluti diminuisce, probabilmente sia per la maggiore capacità dispersiva dell'atmosfera sia per la riduzione del traffico in città, mentre il contributo aumenta in termini percentuali, principalmente per la notevole contrazione di altre fonti, come descritto in seguito. **Durante la primavera 2020 si è osservato un calo in corrispondenza del lockdown** e concentrazioni più basse si sono rilevate per tutto il 2020 e 2021.

La **combustione di biomassa** legnosa contribuisce mediamente per un 10%-15% circa al PM medio annuo. È identificata con chiarezza dal levoglucosano, che costituisce un tracciante per questa sorgente, in quanto emesso esclusivamente dalla combustione di cellulosa. Il levoglucosano tuttavia non è il solo né il principale elemento emesso da questa sorgente, che spiega circa un quarto del carbonio rilevato e circa il 15% del Cd. Il maggiore impatto di questa sorgente è ovviamente legato alla stagione fredda, con un contributo medio pari a circa un quinto della massa del PM nei mesi da novembre a marzo.

Il **mix di attività produttive e di servizio** presenta un profilo emissivo caratterizzato soprattutto dalla presenza di metalli pesanti e As. Sebbene sia responsabile di meno di un microgrammo in termini di massa



L'analisi modellistica stima che la componente secondaria del particolato costituisce buona parte del PM



Durante il lockdown nella primavera 2020: si è osservato un calo dell'apporto del fattore "traffico veicolare"

di particolato, questo fattore risulta responsabile di più di metà delle concentrazioni rilevate per Cd e Pb e di più del 40% per Zn, As e Ni.

La **combustione di oli pesanti** è una sorgente identificata solo nel $PM_{2,5}$, probabilmente per motivi analitici: le tecniche analitiche utilizzate per il PM_{10} hanno un limite di rilevabilità del V troppo alto per riuscire a identificare questo metallo, che risulta il principale tracciante di questa sorgente. Essa identifica potenzialmente raffinerie e navi ed è responsabile di una percentuale trascurabile della massa del $PM_{2,5}$, ma spiega circa i due terzi del Ni e il 90% del V rilevati. È un fattore con contributi discontinui che si osservano soprattutto dalla primavera all'autunno, in controtendenza con la stagionalità tipica del particolato. L'analisi delle masse d'aria legate alla presenza di questo fattore ne indica una provenienza extraregionale, legata probabilmente alle emissioni navali. Questa sorgente mostra valori nettamente più bassi durante tutto il 2020 e il 2021, con concentrazioni medie inferiori alla metà di quelle osservate nei due anni precedenti. Il contributo di questi fattori identificato dalla PMF è da intendersi come un contributo minimo, in quanto i fattori antropici di cui si è parlato, oltre a emettere direttamente particelle di particolato, producono anche dei gas (come ad esempio gli ossidi di azoto per il traffico) che possono essere responsabili del cosiddetto particolato secondario, che si forma in atmosfera a partire dai precursori gassosi.

I fattori di origine secondaria, come si è detto precedentemente, **costituiscono circa i due terzi della massa del $PM_{2,5}$ e metà della massa del PM_{10}** . Risulta perciò particolarmente importante cercare di riattribuire tale componente alle sorgenti che sono responsabili della sua formazione in atmosfera: questa operazione presenta purtroppo notevoli difficoltà e non è di competenza dei modelli al recettore. La PMF non riesce a identificare le sorgenti che producono la componente secondaria, ma scompone quest'ultima in due fattori con peculiari caratteristiche chimiche e andamento temporale: *nitrato d'ammonio* e *solfo d'ammonio con specie organiche*. Il *nitrato d'ammonio* impatta per circa un terzo sulla massa di $PM_{2,5}$ e per circa un quinto sulla massa del PM_{10} . Presenta una stagionalità molto marcata, essendo presente quasi esclusivamente durante la stagione fredda; la forte stagionalità di questo fattore è imputabile alle condizioni meteorologiche, in quanto le alte temperature sfavoriscono la presenza del nitrato d'ammonio sulla particella. Il secondo fattore di origine secondaria risulta caratterizzato principalmente da *solfo d'ammonio e specie organiche*. Esso spiega circa un terzo della massa di PM in entrambi i tagli dimensionali; è composto principalmente da solfo d'ammonio ma contribuisce anche a circa un terzo del carbonio organico rilevato. Presenta concentrazioni assolute lievemente superiori durante la stagione calda (probabilmente a causa delle trasformazioni fotochimiche favorite dalle condizioni meteorologiche estive) che, a fronte di un livello di particolato che invece diminuisce, danno luogo a contributi percentuali molto importanti: intorno ai 2/3 circa del $PM_{2,5}$ e al 40% circa del PM_{10} .

Dall'analisi dell'**inventario regionale delle emissioni** (vedi capitolo 2), è inoltre possibile ricavare alcune informazioni che possono dare indicazioni sulle sorgenti dei gas precursori del particolato secondario: **ammoniaca** (per entrambi i fattori identificati), **ossidi di azoto** (per il nitrato d'ammonio) ed **SO₂** (per il solfo d'ammonio). Gli ossidi di azoto sono emessi soprattutto dalle sorgenti di combustione (come traffico, riscaldamento, industria), mentre l'**SO₂** è derivante per circa l'80% dalle attività produttive. Una buona parte del fattore *solfo*

d'ammonio e specie organiche ha però origini extraregionali (in particolare dall'Est Europa), in base a quanto noto in letteratura e a quanto confermano le analisi delle retrotraiettorie delle masse d'aria ricche di questa componente, per cui anche in questo caso non è semplice capire quanta parte del solfato d'ammonio sia imputabile ai gas precursori emessi dalle attività produttive locali. Discorso diverso riguarda invece l'ammoniaca. Questo gas, infatti, secondo l'inventario deriva in forma quasi esclusiva (> 95%) dalle attività agricole e zootecniche. Emerge dunque una quinta sorgente di origine antropica che non viene identificata in maniera diretta dai modelli al recettore ma che sicuramente ha un impatto importante sul particolato rilevato.

Conclusioni

La ripartizione del PM tra le fonti che lo hanno generato è stata calcolata con **due** metodologie opposte e complementari. **Un approccio**, che impiega il Brute Force Method, **calcola l'apporto di ogni settore a partire dagli inquinanti da esso emessi**, mediante simulazioni modellistiche che utilizzano modelli fotochimici. L'altro approccio, che utilizza un modello al recettore, **ricostruisce i fattori emissivi a partire dall'analisi della composizione chimica del particolato campionato**. Le metodologie prendono in considerazione aree geografiche diverse (l'ambito urbano per quel che riguarda i modelli al recettore e aggregazioni per comuni, zone e agglomerato e regione per il Brute Force Method); solo il modello al recettore è stato applicato su entrambe le frazioni del PM (PM_{10} e $PM_{2,5}$); inoltre **un'ampia incertezza** caratterizza le tecniche utilizzate. Non ci si attende dunque che le informazioni derivanti dai due approcci siano perfettamente sovrapponibili: i metodi sono anzi complementari (per esempio il modello al recettore non riesce a ripartire la componente secondaria tra le sorgenti, mentre il Brute Force Method in questa configurazione non prende in considerazione le emissioni di origine naturale), ma forniscono anche informazioni comuni (fattori emissivi antropici sulla componente primaria) per le quali si può avere un doppio riscontro.

Innanzitutto **emerge una grande importanza della componente secondaria del PM**: da più dei due terzi stimati dal Brute Force Method a metà circa (o più) stimata dal modello al recettore. Ciò spiega la **grande difficoltà a ridurre le concentrazioni di questo inquinante**, anche in occasione di **cali emissivi straordinari come quelli che si sono verificati durante il lockdown 2020** (vedi approfondimento "Effetti delle misure contro la pandemia da Covid19 sulla qualità dell'aria").

Traffico e combustione di biomassa risultano i due fattori antropici che hanno il maggiore impatto sulla componente primaria di PM, seguiti dal mix di attività produttive che ha un impatto di poche unità percentuali. **Le pratiche agricole e gli allevamenti** emergono solo indirettamente dal modello al recettore, il quale non riesce a dare una quantificazione dell'impatto, ma il Brute Force Method indica come **queste attività siano responsabili di circa il 30% della massa di PM_{10} e di circa il 50% della componente secondaria**.

Il segnale di un fattore long range (probabilmente emissioni navali) emerge dal modello al recettore applicato al $PM_{2,5}$: si tratta di un fattore che ha un apporto trascurabile sulla massa totale, ma responsabile quasi esclusivamente del V rilevato e per buona parte del Ni. La PMF indica inoltre un **15% circa di massa di PM_{10} imputabile ai due fattori di origine naturale: risospensione del suolo e sale marino**. Questi fattori sono identificati solo nella frazione grossolana, in quanto composti da particelle con diametro maggiore.

”

Lo studio della ripartizione del particolato tra le fonti utilizza due metodologie:

- Brute Force Method
- Modello al Recettore

”

Da questi studi emerge: l'importanza delle trasformazioni che portano alla formazione del PM secondario

”

Traffico, combustione di biomassa: i due fattori che impattano maggiormente nella formazione di PM primario



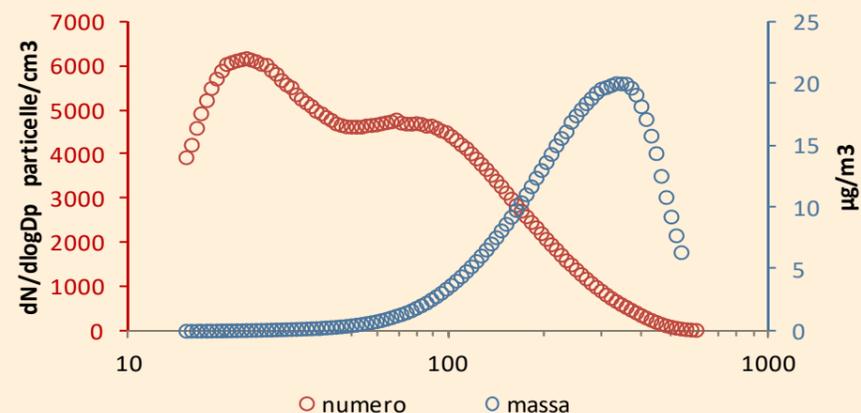
APPROFONDIMENTO

La concentrazione numerica e la distribuzione dimensionale delle particelle in atmosfera

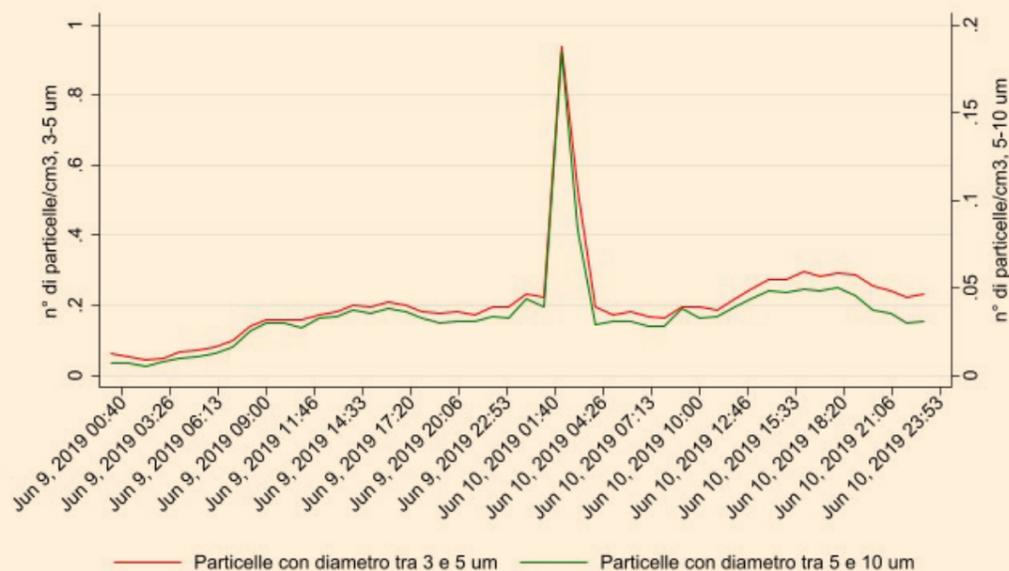
Siamo abituati a pensare al particolato in atmosfera come a qualcosa di misurabile tramite la sua massa, ma l'insieme eterogeneo di particelle presenti in aria può anche essere misurato in numero. Ci sono moltissime particelle attorno a noi che hanno **importanza dal punto di vista numerico** e che danno invece un apporto trascurabile a quel

particolato in massa comunemente utilizzato nell'analisi della qualità dell'aria ($PM_{2,5}$ e PM_{10}). La **concentrazione misurata in numero, d'ora in poi PNC** (Particle Number Concentration), proviene da molteplici sorgenti, molte delle quali sono le stesse del PMx: il traffico, la combustione di legna e derivati, le industrie, la cottura dei cibi, l'aerosol

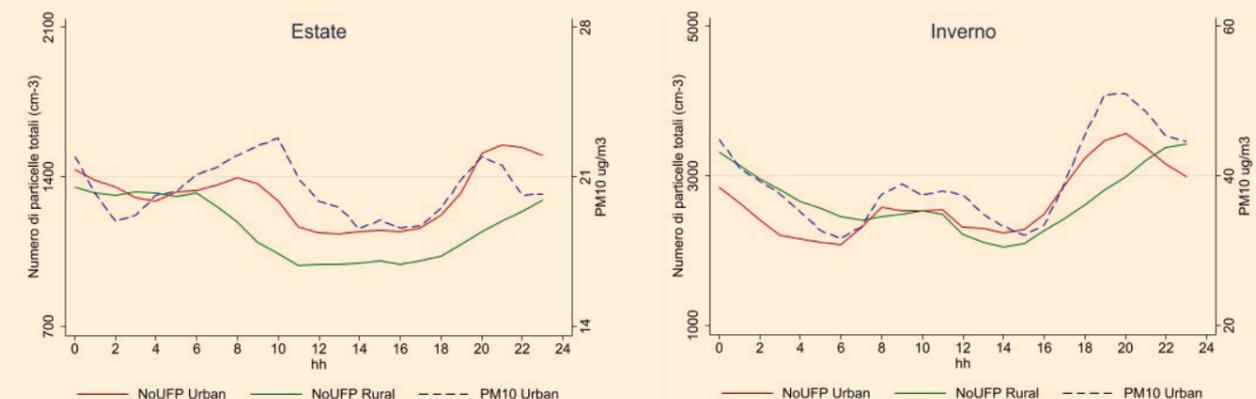
Confronto tra la distribuzione in numero (colore rosso) e quella in massa (colore blu) nel sito urbano di Bologna (RR Arpae, febbraio 2014)



Crescita delle particelle più grandi nelle giornata del 9 giugno 2019 a seguito del trasporto di polveri dal deserto del Sahara, stazione di Bologna - RR Arpae



Andamento orario del giorno medio delle particelle NoUFP (100 - 600 nm) nel sito urbano (linea rossa) e rurale (linea verde) di Bologna (RR Arpae) tramite un SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) e della concentrazione del PM_{10} stimato (linea blu tratteggiata) da un FIDAS (sito urbano di Reggio Emilia), differenziato in inverno ed estate. Il grafico sarebbe simile se si usassero i dati delle particelle misurate otticamente da un OPC (Optical Particle Counter, 280 µm -10 µm). Si noti la diversa scala per le due stagioni



marino, il trasporto tramite i movimenti delle masse d'aria e la nucleazione. Quelle preponderanti per la formazione di particelle con **diametro inferiore ai 100 nm, d'ora in poi UFP** (Ultrafine Particle), sono il traffico, gli eventi di nucleazione e il riscaldamento.

Anche il trasporto della polvere dal Sahara è una sorgente e può portare un aumento di particelle in atmosfera, ma solo per quelle che hanno un diametro elevato, maggiore di circa 300 nm: in diverse occasioni di eventi di trasporto di polvere gli strumenti delle stazioni Arpae hanno rilevato il passaggio di particelle.

L'ordine di grandezza della PNC dipende dal diametro delle particelle considerate. Particelle con diametro maggiore, da 300 nm circa, si trovano nell'ordine delle centinaia per centimetro cubo mentre sono presenti anche migliaia di UFP per centimetro cubo.

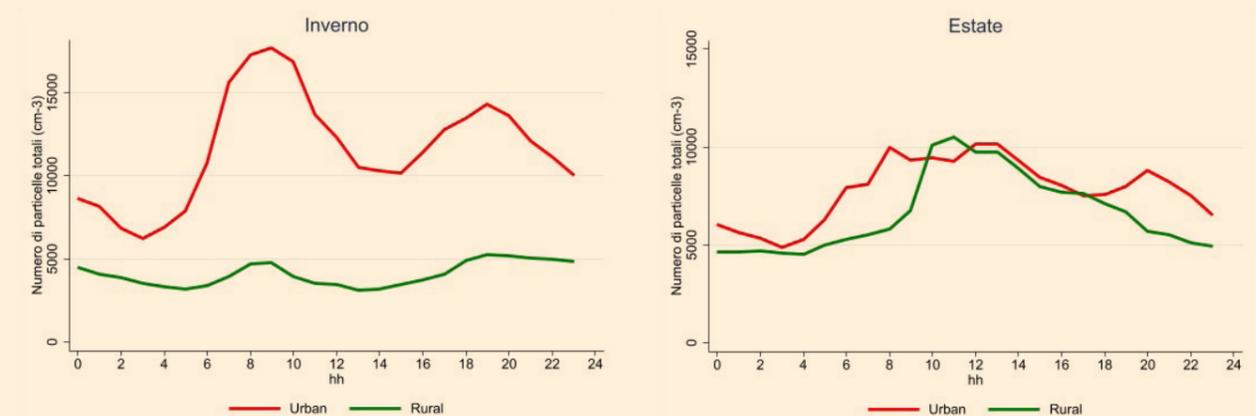
Grazie al progetto Supersito è disponibile una serie storica, seppur non sempre continua, di particelle con diametro da circa 300 nm, dalla fine del 2011, e da 3 nm, da metà del 2012, in due siti di misura: uno nell'area urbana di Bologna e un fondo rurale (a S. Pietro Capofiume - BO). Nei due siti del progetto si può osservare l'andamento del giorno medio stagionale che risulta simile a

quello che ritroviamo per il particolato in massa orario: le particelle "grandi" correlano infatti con la massa di PMx, mostrando una stagionalità simile e un comportamento analogo dipendente dalle variabili meteorologiche. Nel grafico si tenga in considerazione che i mesi non sono gli stessi, i siti sono diversi e i dati sono ottenuti mediando anni di misura differenti.

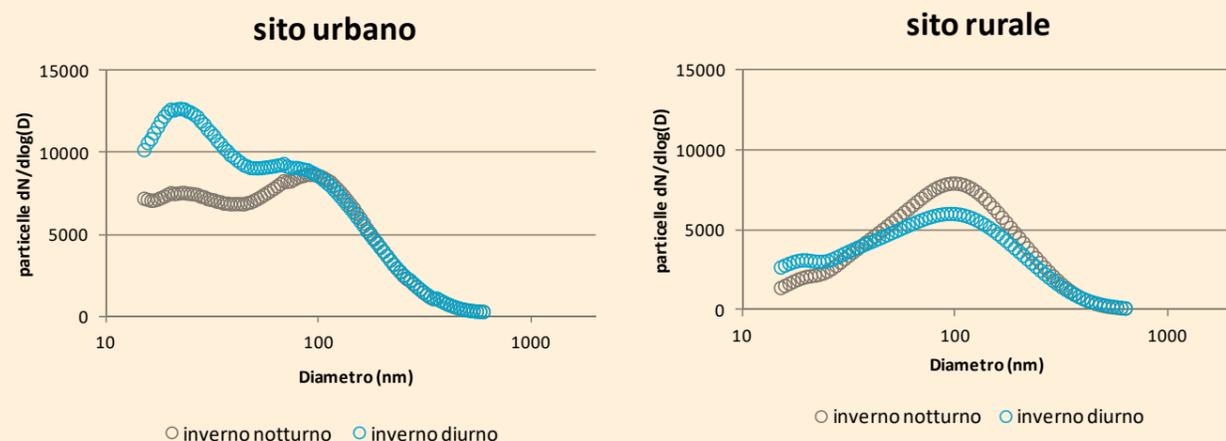
Mentre le particelle più grandi mostrano un andamento orario e stagionale simile a quello della massa del particolato (PMx), il comportamento delle particelle UFP cambia radicalmente, sia a seconda del sito che a seconda del periodo dell'anno: le UFP non dipendono in modo lineare dalle variabili meteorologiche e non mostrano una vera e propria stagionalità, o meglio non come quella del PMx.

In estate e in primavera si può notare per esempio un incremento nel sito rurale della concentrazione di UFP con valori paragonabili, se non a volte superiori, a quelli del sito urbano: tale aumento è causato dai frequenti eventi di nucleazione, cioè dalla formazione di nuove particelle con diametri ampiamente inferiori ai 100 nm. **Nel sito urbano sono invece evidenti i picchi legati al traffico** e anche, nei periodi più freddi, al riscaldamento. **Nella stazione urbana di Bologna l'80 % delle PNC è**

Andamento orario del giorno medio delle particelle UFP (<100nm) nel sito urbano e rurale di Bologna (RR Arpae) tramite un SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), differenziato per le due stagioni



⬇️ **Distribuzione dimensionale media in inverno nel sito urbano: il colore grigio rappresenta le ore durante la notte (dalle 22:00 alle 5:00) quello azzurro le ore diurne (dalle 6:00 alle 21:00). Media da novembre a marzo di diversi anni**



derivante dalle UFP, in linea con quanto riportato in letteratura per altre città e per range dimensionali simili. Le particelle con diametro più piccolo permettono di vedere facilmente la variazione di concentrazione durante la settimana tra i giorni feriali e il fine settimana: nel week end, seppur l'andamento rimane simile, è presente sia un calo di concentrazione sia una assenza di picco nelle ore mattutine e serali. A Bologna è infatti presente una riduzione percentuale media delle UFP di circa il 29% in una domenica invernale.

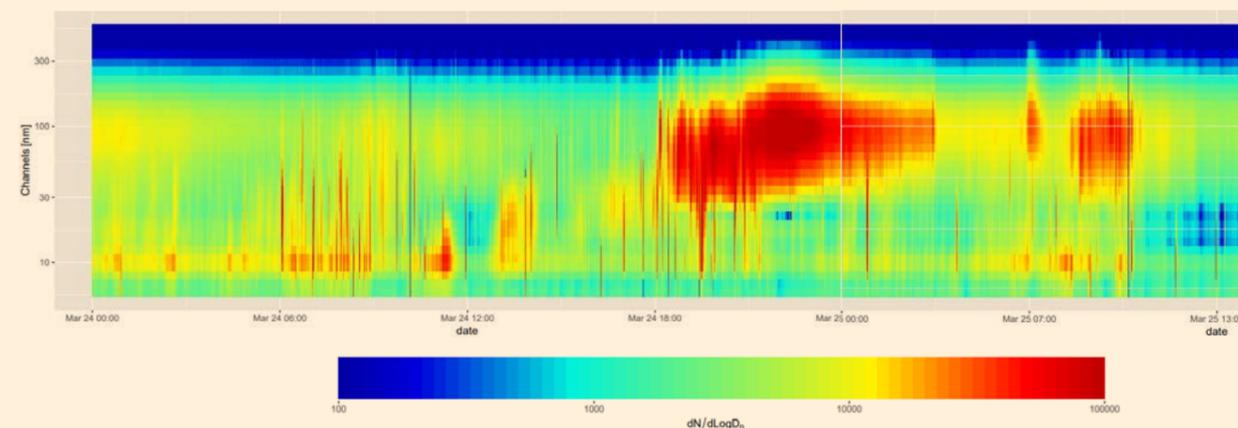
Le PNC hanno una **distribuzione dimensionale** (ASD, Aerosol Size Distribution) che può avere uno o più picchi caratteristici dei diversi tipi di particelle (moda dei nuclei, di Aitken, ecc.) e dipendono dall'area di misura, dal periodo dell'anno e dall'ora. Osservando i due siti disponibili si vedono chiaramente le variazioni dell'ASD, sia come forma che come valori di concentrazione. **Nel periodo invernale è presente un maggior quantitativo di particelle, soprattutto quelle con diametro più piccolo**, attribuibile a una sorgente fresca, non presente "direttamente" nel sito rurale, come il traffico. Le particelle provenienti da questa fonte raggiungono il sito di campagna invecchiate: vi arrivano dopo aver subito diversi fenomeni come quelli di condensazione e coagulazione ed essersi accresciute di diametro. **In estate invece, le ASD si assomigliano mostrando entrambe una moda principale attorno a 20-30 nm** e presumibilmente un'altra, sottesa e molto più piccola, attorno alla moda di accumulo. Questo è dovuto al fatto che nel periodo più caldo a Bologna diminuiscono le fonti emittive (mancando completamente la sorgente derivante dal riscaldamento), aumentano i fenomeni di dispersione e parallelamente a San Pietro Capofiume aumentano notevolmente le particelle più piccole grazie agli eventi di nucleazione (che generano particelle con diametri inferiori a 10 nm e con picchi intorno ai 3-25 nm). L'analisi è differenziata anche in ore diurne e notturne: la

distribuzione permette di vedere come la concentrazione numerica delle UFP cresce notevolmente soprattutto nei diametri più piccoli (< 50 nm, che rappresentano particelle "fresche", appena emesse o formatesi da poco). La stessa analisi fatta nel sito rurale evidenzia due curve con forme quasi identiche: la ASD che rappresenta le particelle durante le ore notturne mostra concentrazioni un po' più basse nella moda attorno ai 20 nm, e concentrazioni un poco più alte nell'intorno dell'accumulo (le particelle "invecchiate" hanno tempo di permanenza maggiore e diametri più grandi); questo aumento probabilmente deriva da fenomeni di condensazione e coagulazione amplificati nell'area rurale rispetto a quella urbana, derivanti dalla maggiore umidità e minor temperatura (vedi figura soprastante).

La distribuzione dimensionale è utile anche per l'identificazione di sorgenti come la combustione da biomassa. Durante una campagna di misura nell'area riminese (campagna invernale effettuata nell'ambito di uno studio di approfondimento nell'area riminese per caratterizzare l'impatto della combustione della biomassa e verificare la presenza di sale marino) si è misurata, nell'arco di qualche ora, la variazione di concentrazione e diametro delle particelle derivante dai diversi fuochi accesi per la festa San Giuseppe (i fuochi derivano da diversi cumuli di sterpaglie raccolte alla fine della stagione invernale). L'andamento delle particelle al minuto mostra chiaramente nel grafico in alto la crescita evidente della concentrazione legata all'accensione dei fuochi e il successivo calo che evidenzia la fine dell'evento. Il grafico denominato "banana plot" (vedi figura seguente) ci dà qualche informazione in più mostrando sia la crescita in numero (l'area in rosso) sia il cambiamento del diametro delle particelle.

La rapidità con cui le UFP variano nel tempo e nello spazio è evidente anche da studi che mettono in relazione

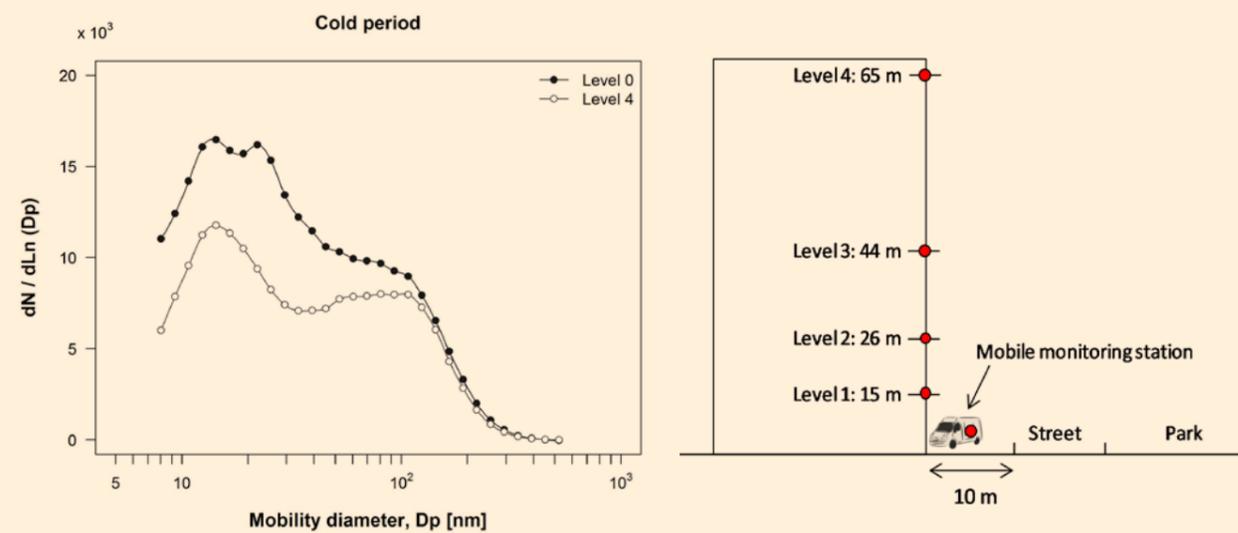
⬇️ **Variazione della distribuzione dimensionale delle particelle dal 24/3 al 25/3 nel sito di Orsoletto (RN): in ascissa il tempo (risoluzione al minuto), in ordinata il diametro delle particelle; la scala cromatica rappresenta la concentrazione numerica. Il colore rosso al centro rappresenta i fuochi della festa**



il numero e la distribuzione delle particelle in siti differenti ma a distanza ravvicinata (da pochi chilometri a decine di metri). Questo poiché causa di vari processi come la condensazione, la coagulazione, l'evaporazione e la deposizione, le UFP hanno una vita piuttosto breve: **già a 300 m di distanza dall'emissione stradale sembra esserci una riduzione significativa delle particelle sotto i 20 nm**. Sempre dal progetto Supersito si è potuto infatti evidenziare come le UFP mostrassero un numero di particelle più elevato e una moda più centrata su diametri minori, sia in un sito posto nel retro di un edificio, rispetto a uno posto a fronte strada, sia in uno sito ad alto traffico

rispetto a uno a basso traffico. La cosa più evidente è il drastico calo della concentrazione numerica nel range delle nanoparticelle (diametro < 50 nm): a dimensioni così ridotte avvengono trasformazioni importanti sia a livello spaziale che temporale (anche nell'ordine di pochi minuti). Un altro **studio effettuato in verticale** (posizionando gli strumenti a diversi piani nei balconi di un edificio) **ha permesso di evidenziare valori più alti delle PNC sia in inverno che in estate, nel piano stradale rispetto a un piano posizionato a una quota di circa 60 m**: la riduzione, di circa un 30%, è legata quasi esclusivamente alle UFP.

⬇️ **Distribuzione delle particelle nel periodo freddo e grafico relativo ai diversi punti di misura. Il livello 0 è il piano stradale, il livello 4 è il piano alto.**



Ozono

Ozono - la normativa di riferimento



TABELLA 2
Limiti normativi, valori obiettivo e altri obiettivi ambientali per l'ozono

INQUINANTE	TARGET DI PROTEZIONE	OBIETTIVI AMBIENTALI	PERIODO DI MEDIAZIONE	METRICA DELL'OBIETTIVO AMBIENTALE	VALORI NUMERICI DEGLI OBIETTIVI AMBIENTALI
O ₃	Salute	Valore obiettivo	Massimo giornaliero media mobile su 8 ore	Giorni in cui il massimo della media mobile su 8 ore eccede il valore obiettivo (120 µg/m ³) come media sui 3 anni	25
		Obiettivo a lungo termine	Massimo giornaliero media mobile su 8 ore	Giorni in cui il massimo della media mobile su 8 ore eccede il valore obiettivo nell'anno civile (120 µg/m ³)	0
		Soglia di informazione	ora	Ore in eccedenza rispetto alla soglia di informazione nell'anno civile (180 µg/m ³)	0
		Soglia di allarme	ora	Ore in eccedenza nell'anno civile rispetto alla soglia di allarme (240 µg/m ³)	0
	Vegetazione	Valore obiettivo	1 Maggio – 31 Luglio	AOT40 come media sui 5 anni	18000 µg/m ³
		Obiettivo a lungo termine	1 Maggio – 31 Luglio	AOT40 come media su 1 anno	6000 µg/m ³

Ozono - lo stato e i trend

L'andamento dell'ozono si mostra pressoché stazionario nell'ultimo decennio, con fluttuazioni dovute alla variabilità meteorologica della stagione estiva.

Questo inquinante viene prodotto in atmosfera per effetto delle reazioni fotochimiche, catalizzate dalla radiazione solare, dei principali precursori, COV e NO_x, trasportati e diffusi dai venti e dalla turbolenza atmosferica. Ne consegue che si osservano concentrazioni elevate anche a distanza dalle sorgenti primarie.

Le concentrazioni rilevate e il numero di superamenti delle soglie continuano a superare gli obiettivi previsti dalla legge. La situazione risulta abbastanza critica sul territorio regionale con superamenti dell'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana (120 µg/m³) generalizzati pressoché all'intera regione, con l'eccezione dell'alto Appennino (figura 15).

Il numero di superamenti della soglia di informazione alla popolazione (concentrazione media oraria uguale a 180 µg/m³) non mostra andamenti evidenti su scala regionale (figura 16).

La soglia di allarme per la popolazione (concentrazione media oraria uguale a 240 µg/m³) non è mai stata superata.



L'andamento dell'ozono: si mostra stazionario nell'ultimo decennio

FIGURA 15 Andamento del numero di superamenti (giorni) dell'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana per l'ozono (massimo giornaliero della media mobile su 8 ore) dal 2013 al 2022

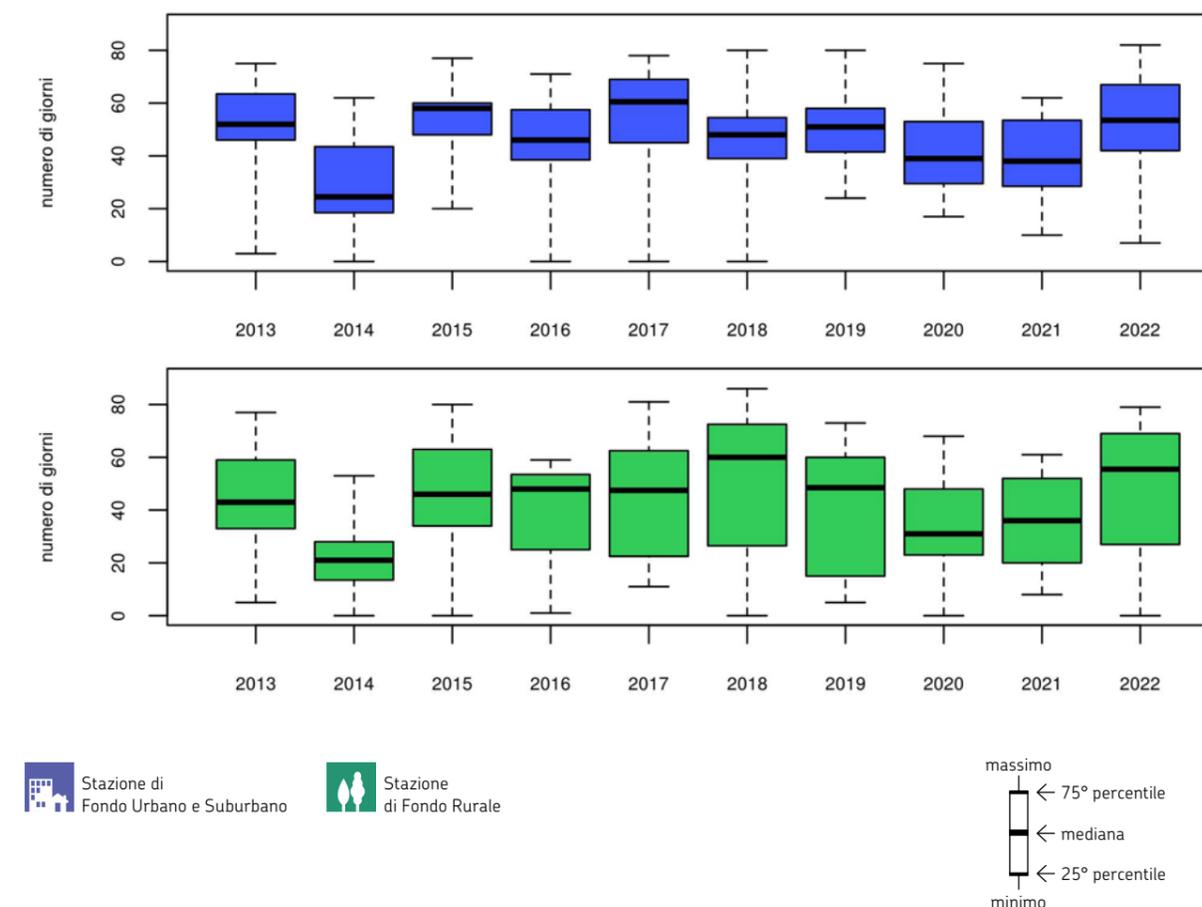
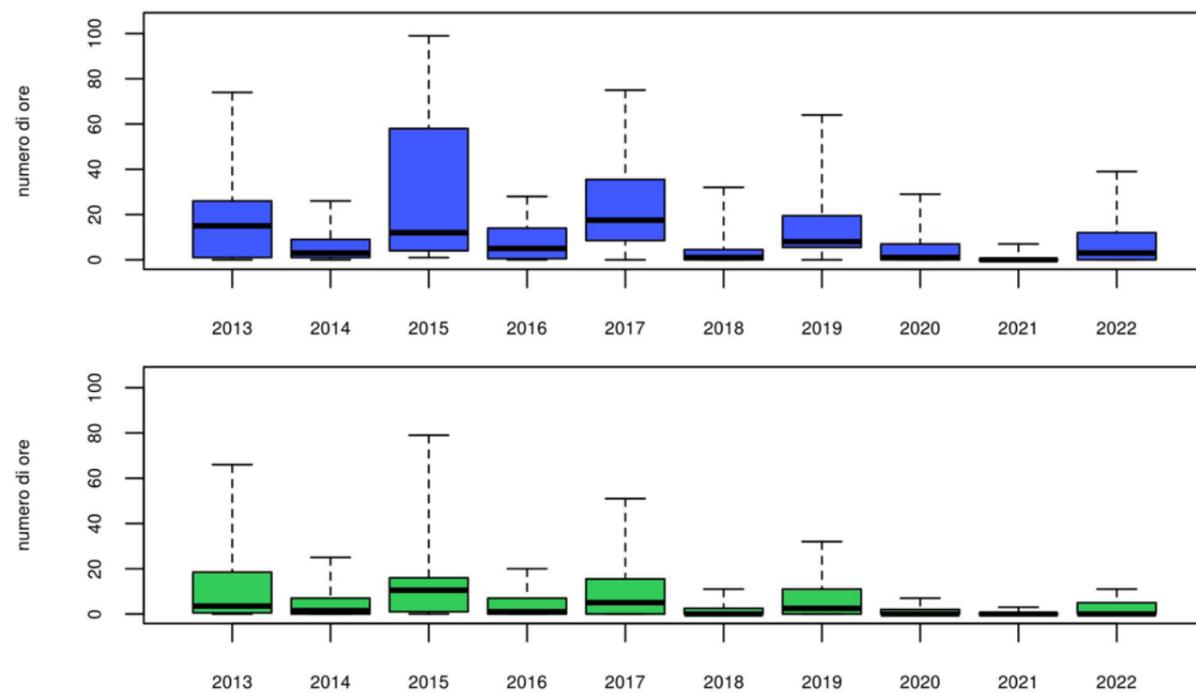


FIGURA 16
Andamento del numero di superamenti (ore) della soglia di informazione per l'ozono dal 2013 al 2022



Stazione di Fondo Urbano e Suburbano Stazione di Fondo Rurale

massimo
← 75° percentile
— mediana
← 25° percentile
minimo

Le mappe del numero di giorni in cui il massimo della media mobile sulle 8 ore della concentrazione ha superato il valore di $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, rappresentate in **figura 17**, mostrano che nel periodo 2018-2022 si sono avute ampie zone di superamento dell'obiettivo a lungo termine, con particolare riferimento agli anni più caldi, meteorologicamente favorevoli alla formazione di ozono.

L'ozono risulta essere potenzialmente dannoso anche per la vegetazione. La modalità di azione dell'ozono sulle piante si esplica mediante una serie di processi biochimici e fisiologici che portano ad alterazioni nel metabolismo delle stesse. Gli effetti indotti dall'ozono sono cumulativi, e comportano la riduzione netta del processo di fotosintesi, cambiamenti nell'allocazione dei carboidrati e la senescenza precoce delle foglie, con conseguente riduzione della formazione di biomassa e della resa colturale. **Più la pianta assorbe ozono e maggiore è la riduzione della produzione di biomassa e della resa.** Dato l'effetto cumulativo dovuto a esposizione all'ozono, a livello europeo, per misurare gli effetti dello stesso sulla vegetazione, è stato implementato un indice che valuta appunto l'esposizione cumulata al di sopra di una soglia. Tale soglia è stata fissata a 40 parti per miliardo ($40 \text{ ppb} = 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ed è stata scelta sulla base di studi condotti in Europa. L'indice viene indicato con il termine AOT40, ed è calcolato come la somma delle eccedenze orarie del valore di 40 ppb, nel periodo in cui gli stomi sono aperti, e cioè durante il periodo della crescita (Maggio-Luglio per la vegetazione o Aprile-Settembre per le foreste) nelle ore diurne del giorno (tra le 8 e le 20), quando, quindi, l'esposizione è maggiore.

Ozono:
potenzialmente dannoso per la vegetazione

FIGURA 17 Stima della distribuzione territoriale del numero di superamenti dell'obiettivo a lungo termine di ozono per la protezione della salute umana in Emilia Romagna (2018 – 2022)

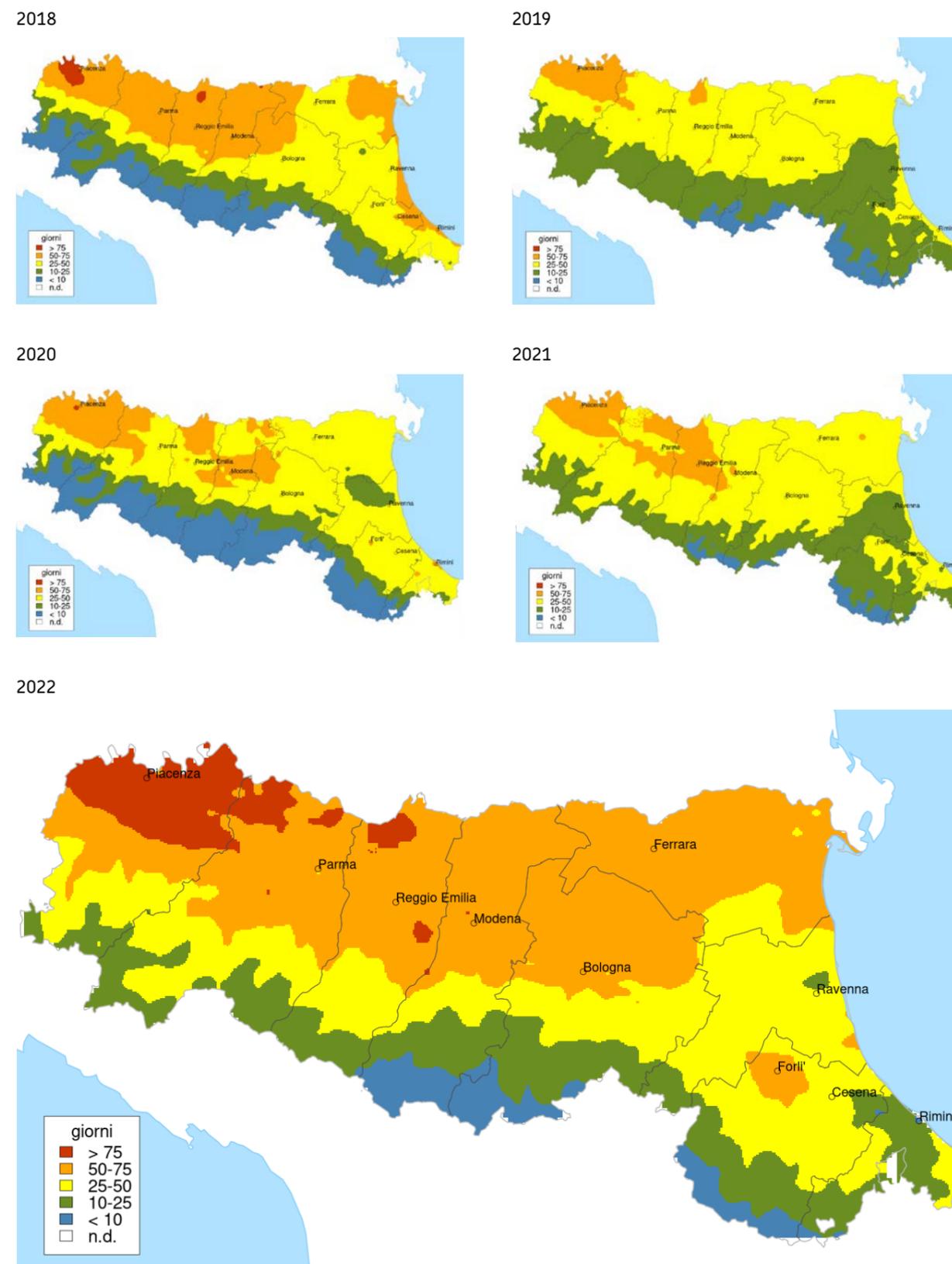
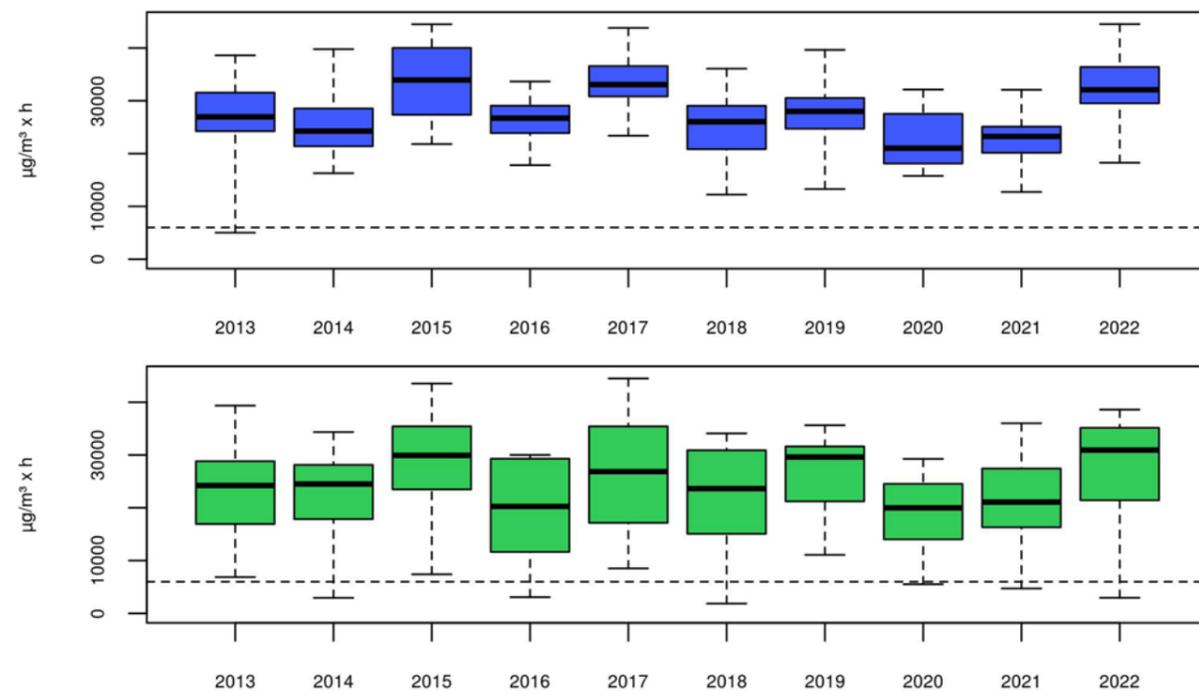


FIGURA 18 Andamento delle concentrazioni AOT40 per l'obiettivo a lungo termine relativo alla protezione della vegetazione per l'ozono dal 2013 al 2022



Stazione di Fondo Urbano e Suburbano Stazione di Fondo Rurale - - - - Limite (6.000 µg/m³)

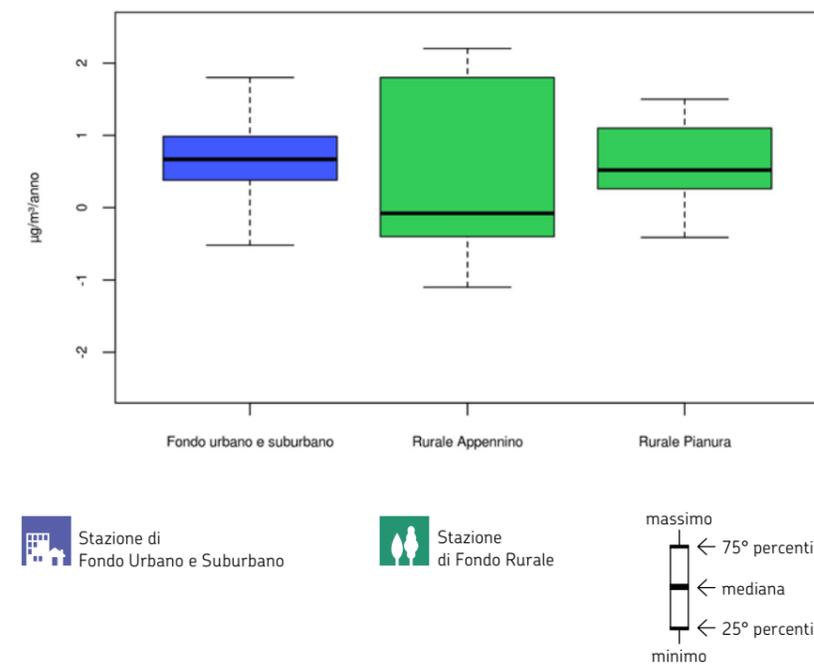
massimo
← 75° percentile
← mediana
← 25° percentile
minimo

L'obiettivo a lungo termine AOT40 per la protezione della vegetazione risulta ampiamente al di sopra del valore di riferimento (6.000 µg/m³ x h) in tutte le stazioni della regione. I valori tendono a rimanere costanti.

Il trend descrive, in modo sintetico e in forma aggregata per tipologia di stazione, la qualità dell'aria in regione, ed è finalizzato a valutarne la **tendenza sul lungo periodo**. L'analisi del trend realizzata attraverso il metodo di Theil-Sen è stata effettuata sulle medie mensili a partire dai dati giornalieri per singola stazione ed è rappresentata in Appendice. I risultati sono stati espressi suddividendo le stazioni disponibili in 3 classi in base al tipo: di fondo urbano/suburbano, di fondo rurale in pianura, di fondo rurale in Appennino.

L'analisi, effettuata sull'intero anno, mostra una **tendenza al rialzo nella maggior parte delle stazioni** (figura 19), ma gli intervalli di confidenza sono ampi e quasi tutti non significativi, con l'eccezione di 7 stazioni.

FIGURA 19 Distribuzione del tasso di variazione annuale (trend) dell'ozono per tipologia di stazione (2013 - 2022)



Stazione di Fondo Urbano e Suburbano

Stazione di Fondo Rurale

massimo
← 75° percentile
← mediana
← 25° percentile
minimo

Biossido di Azoto

Biossido di azoto - la normativa di riferimento



TABELLA 3
Limiti normativi, valori obiettivo e altri obiettivi ambientali per il biossido di azoto

INQUINANTE	TARGET DI PROTEZIONE	OBIETTIVI AMBIENTALI	PERIODO DI MEDIAZIONE	METRICA DELL'OBIETTIVO AMBIENTALE	VALORI NUMERICI DEGLI OBIETTIVI AMBIENTALI
NO ₂	Salute	Valore limite	ora	Ore di eccedenza nell'anno civile e valore limite di 200 µg/m ³	18
		Valore limite	Anno civile	Media annua	40 µg/m ³
		Soglia di allarme	ora	Ore in eccedenza nell'anno civile rispetto alla soglia di allarme registrata per 3 ore consecutive (400 µg/m ³)	0
NO _x	Vegetazione	Livello critico	Anno civile	Media annua	30 µg/m ³

Biossido di azoto - lo stato e i trend

Il valore medio annuale per il biossido di azoto ha visto un **progressivo miglioramento**.

Il numero di stazioni superiori al limite si è ridotto nel trascorrere degli anni. A partire dal 2011 tutte le stazioni di fondo sono risultate inferiori al limite, mentre sono rimaste alcune **criticità locali**, in prossimità di importanti fonti di emissione di ossidi di azoto (traffico) (figura 20). Nel 2020 la media annuale di biossido di azoto (NO₂) ha fortemente risentito dell'effetto del lockdown; i valori medi annuali sono risultati inferiori all'anno precedente e per la prima volta in tutte le stazioni è stato rispettato il valore limite annuale di 40 µg/m³ (nel 2019 è stato superato in 4 stazioni, nel 2021 in 1 sola). Nel 2022, per il secondo anno, le medie annuali di tutte le stazioni sono rimaste al di sotto del valore limite. Questo è un risultato significativo in quanto non erano più in essere le limitazioni dovute alla pandemia.

Negli anni recenti in nessuna stazione si è avuto il superamento del valore limite orario di 200 µg/m³, del resto mai superato per più di 18 volte a partire dalla sua entrata in vigore.



Il valore medio annuale di biossido di azoto ha visto un progressivo miglioramento



Nel 2022: le medie annuali di biossido di azoto di tutte le stazioni sono state sotto il valore limite

FIGURA 20
Andamento della concentrazione media annuale di NO₂ dal 2013 al 2022 (µg/m³)

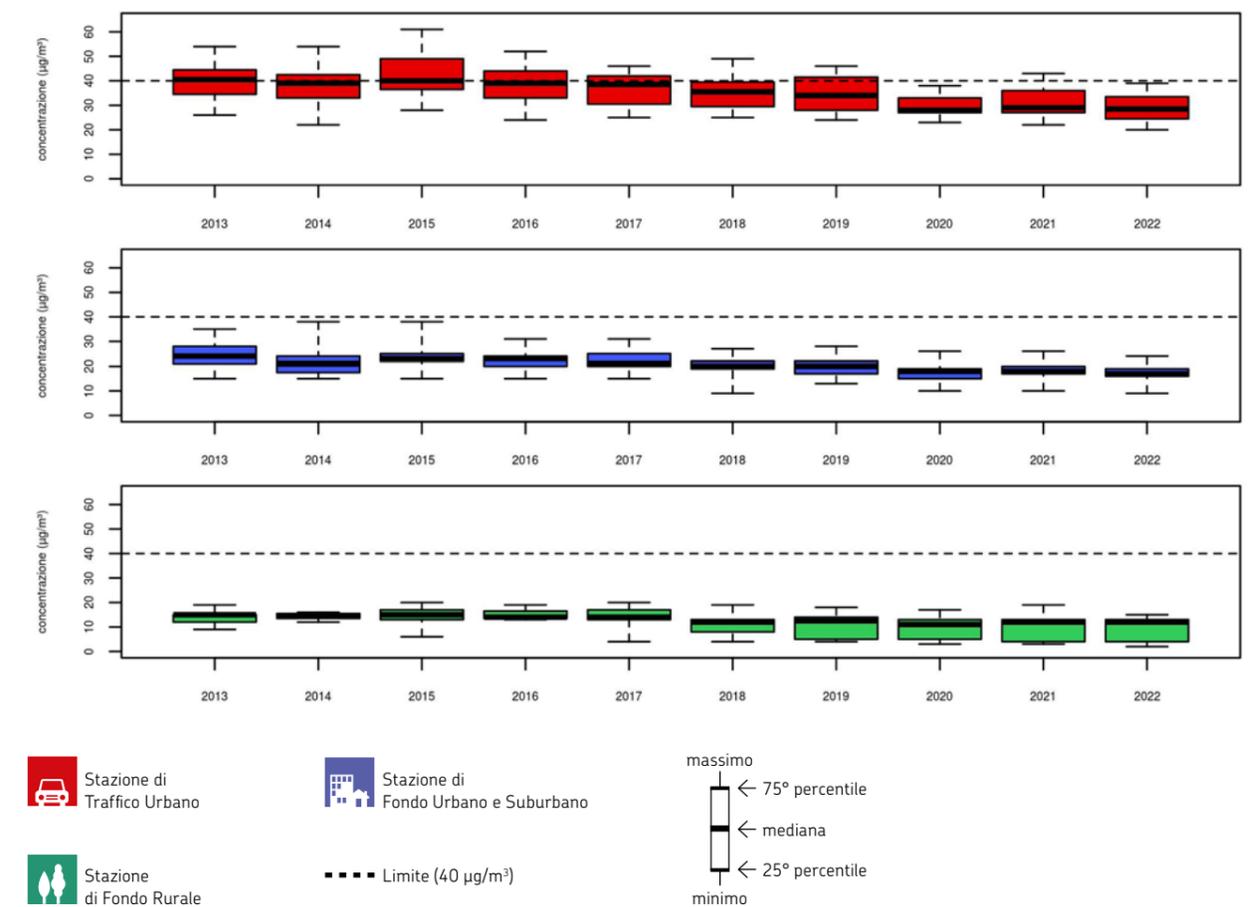
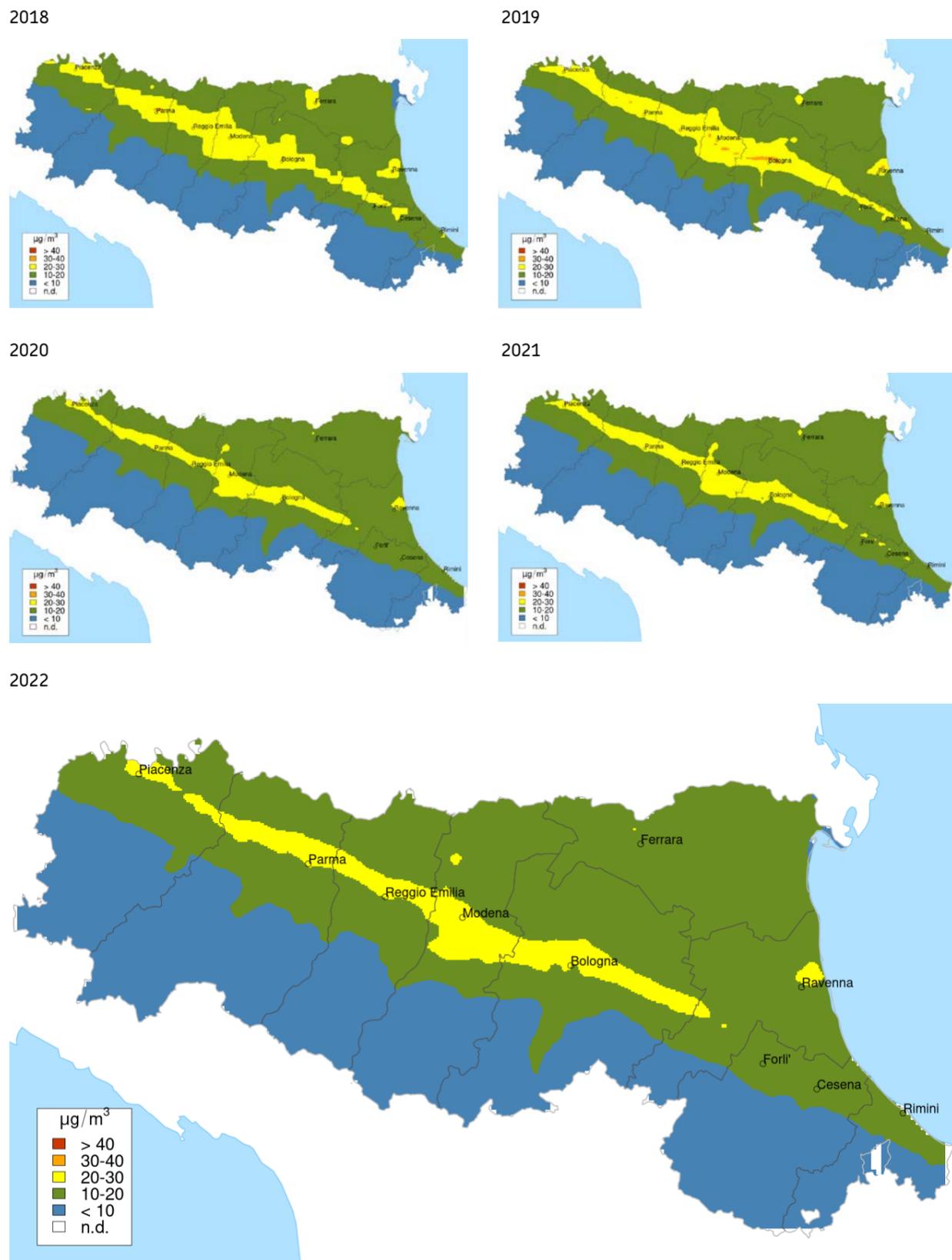


FIGURA 21
Stima della distribuzione territoriale della concentrazione media annuale di NO₂ in Emilia Romagna (2018 – 2022)



Nel periodo 2018-2022 non si sono evidenziate zone di superamento del VL annuale di 40 µg/m³ della concentrazione di fondo di biossido di azoto. La valutazione a livello regionale si riferisce alle concentrazioni di fondo a larga scala e non rappresenta indicazione delle concentrazioni nei pressi di sorgenti localizzate. Le mappe regionali sono rappresentate in **figura 21**.

Dall'analisi della distribuzione territoriale della **concentrazione di fondo** si rileva come questa risulti generalmente **più elevata in prossimità degli agglomerati urbani e delle principali arterie stradali**.

Il trend descrive, in modo sintetico e in forma aggregata per tipologia di stazione, la qualità dell'aria in regione, ed è finalizzato a valutarne la **tendenza sul lungo periodo**. Per l'analisi statistica è stato impiegato il metodo di Theil-Sen.

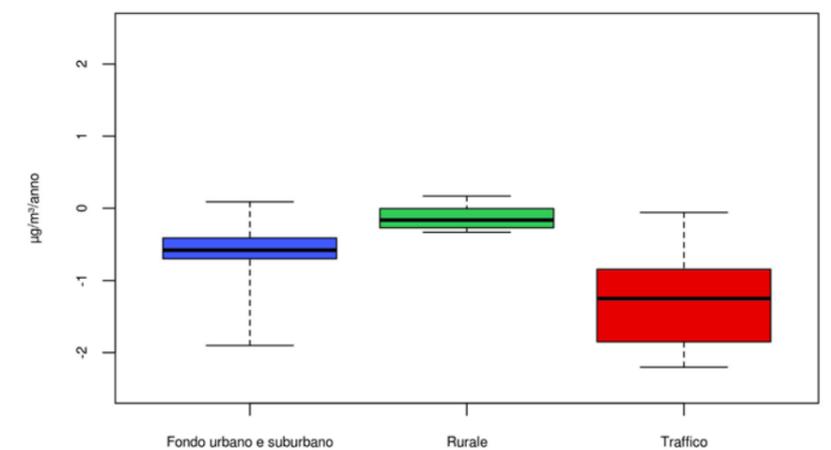
I risultati sono stati espressi suddividendo le stazioni disponibili in 4 classi in base al tipo: da traffico, di fondo urbano/suburbano, di fondo rurale in pianura, di fondo rurale in Appennino.

Le stime dei trend raggruppate per tipologia di stazione di misura, calcolate sui dati delle stazioni di monitoraggio selezionate disponibili nel periodo 2013-2022 e riportate in **figura 22** rivelano una tendenza alla **diminuzione generale delle concentrazioni nella maggior parte delle stazioni**.



La concentrazione di fondo di biossido di azoto: è maggiore vicino ad agglomerati urbani e arterie stradali

FIGURA 22
Distribuzione del tasso di variazione annuale (trend) del biossido di azoto per tipologia di stazione (2013 – 2022)



Stazione di Traffico Urbano
 Stazione di Fondo Urbano e Suburbano
 Stazione di Fondo Rurale

massimo
 ← 75° percentile
 ← mediana
 ← 25° percentile
 minimo

Le **stazioni di traffico e di fondo urbano/suburbano mostrano una maggiore tendenza al calo** (valori medi del trend di $-1.25 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{anno}$ per le stazioni da traffico, $-0.58 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{anno}$ per quelle di fondo urbano e suburbano); **analogo trend**, seppur minore, **mostrano le stazioni di fondo rurale**.

Pur considerando l'influenza che il lockdown del 2020 e le misure di contenimento adottate per l'emergenza sanitaria nel periodo successivo hanno avuto sulle concentrazioni di ossidi di azoto, l'analisi dei dati NO_2 fino al 2019 mostrava già una **tendenza significativa alla riduzione**.

L'analisi del trend è stata effettuata sulle medie mensili a partire dai dati orari per singola stazione ed è rappresentata in Appendice.

Come mostrato nell'*appendice*, la riduzione risulta statisticamente significativa nella maggior parte delle stazioni.



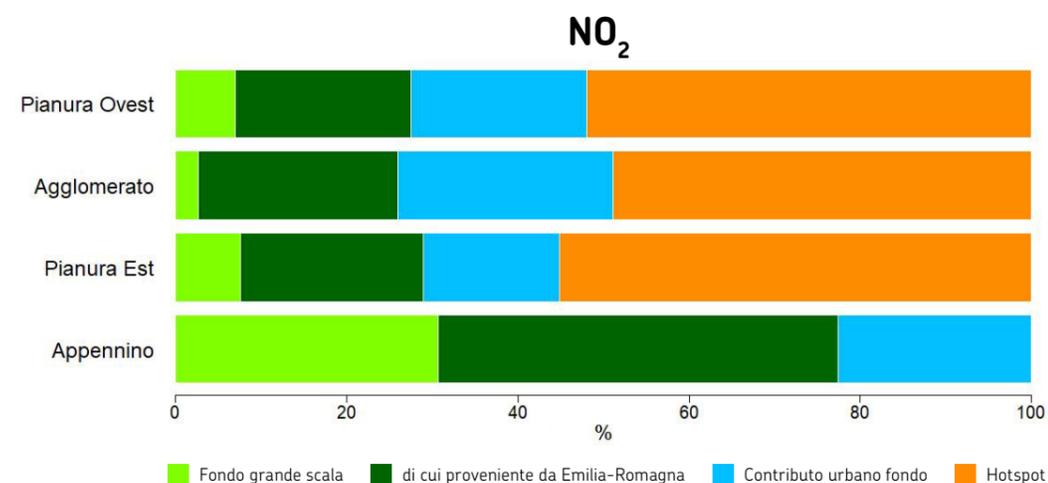
Dalle stime dei trend:

- calo della concentrazione del biossido di azoto nelle stazioni di traffico e urbane
- in misura minore anche nelle stazioni di fondo rurale

L'origine geografica dell'inquinamento da biossido d'azoto

L'analisi dell'origine geografica dell'inquinamento da NO_2 (*figura 23*) evidenzia in questo caso un **notevole contributo della componente locale** (barre arancioni) che contribuisce per circa il 50% alle concentrazioni in prossimità delle principali sorgenti di emissione, in particolare le **strade ad intenso traffico**. Significativa è anche la componente della concentrazione attribuibile al fondo urbano (barre azzurre) e della componente prevalentemente originata all'interno della regione (barre verde scuro), mentre è del tutto **trascurabile il contributo della componente a larga scala attribuibile all'esterno della regione** (barre verde chiara). Fa eccezione la zona appenninica dove le componenti di fondo sono in proporzione predominanti a causa delle ridotte emissioni locali.

FIGURA 23
 NO_2 , ripartizione percentuale per aree geografiche dell'origine dell'inquinamento



Benzo(a)Pirene

Benzo(a)Pirene - la normativa di riferimento



TABELLA 4
Limiti normativi per il benzo(a)pirene

INQUINANTE	TARGET DI PROTEZIONE	OBIETTIVI AMBIENTALI	PERIODO DI MEDIAZIONE	METRICA DELL'OBIETTIVO AMBIENTALE	VALORI NUMERICI DEGLI OBIETTIVI AMBIENTALI
B(a)P	Salute	Valore obiettivo	Anno civile	Media annua	1 ng/m ³

Benzo(a)Pirene - lo stato e i trend

Il valore medio annuale di **benzo(a)pirene B(a)P**, rilevato nelle 5 stazioni della rete regionale dedicate, è **pienamente rispettato in tutta la regione** Emilia-Romagna.

Questo parametro ha una forte **variabilità stagionale**, essendo fortemente legato alla combustione della legna, cosicché le concentrazioni più elevate si riscontrano in dicembre e in gennaio. I valori riscontrati in Emilia-Romagna rimangono comunque di **gran lunga inferiori rispetto a quelli riscontrati nelle regioni del nord Italia** dove, per la maggior prevalenza di territorio montano, si riscontrano diversi superamenti del valore obiettivo.

Proprio in relazione al maggior uso di biomassa per il riscaldamento domestico, la valutazione delle concentrazioni di B(a)P è effettuata anche in Appennino. Anche qui il valore obiettivo è ampiamente rispettato.

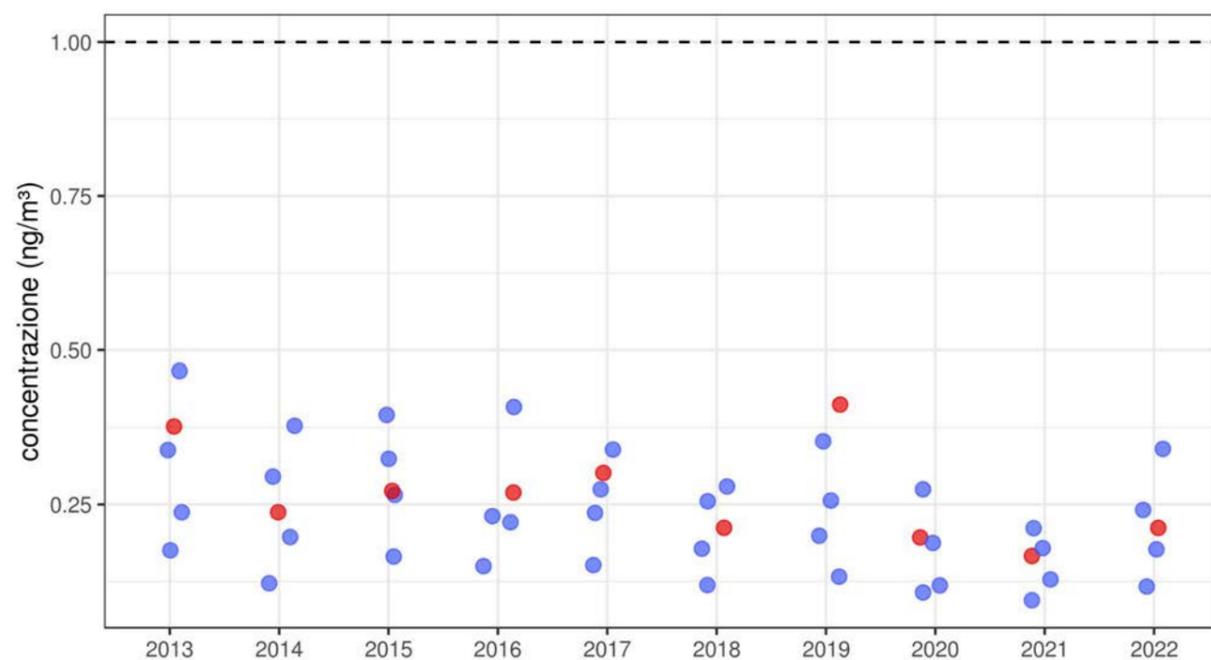


Il valore medio annuale di Benzo(a)Pirene: è rispettato in tutta la regione



I valori riscontrati in Emilia-Romagna: sono inferiori a quelli delle regioni del Nord Italia

FIGURA 24 Andamento della concentrazione media annuale di benzo(a)pirene (ng/m³) dal 2013 al 2022



Stazione di Traffico Urbano

Stazione di Fondo Urbano e Suburbano

Altri Inquinanti

Altri inquinanti - la normativa di riferimento

TABELLA 5 Limiti normativi, valori obiettivo e altri obiettivi ambientali per biossido di zolfo, monossido di carbonio, benzene, piombo, cadmio, arsenico, nichel

INQUINANTE	TARGET DI PROTEZIONE	OBIETTIVI AMBIENTALI	PERIODO DI MEDIAZIONE	METRICA DELL'OBIETTIVO AMBIENTALE	VALORI NUMERICI DEGLI OBIETTIVI AMBIENTALI
SO ₂	Salute	Valore limite	ora	Ore di eccedenza nell'anno civile del valore limite di 350 µg/m ³	24
			giorno	Ore di eccedenza nell'anno civile del valore limite di 125 µg/m ³	3
			Soglia di allarme	ora	Ore in eccedenza nell'anno civile rispetto alla soglia di allarme (500 µg/m ³)
	Vegetazione	Livello critico	Anno civile	Media annua	20 µg/m ³
Inverno			Media sui valori orari invernali, 1 Ottobre – 31 Marzo	20 µg/m ³	
CO	Salute	Valore limite	Massimo giornaliero media mobile su 8 ore	Giorni in cui il massimo della media mobile su 8 ore eccede il valore limite (10 mg/m ³)	0
Benzene	Salute	Valore limite	Anno civile	Media annua	5 µg/m ³
Pb	Salute	Valore limite	Anno civile	Media annua	0.5 µg/m ³
Cd	Salute	Valore obiettivo	Anno civile	Media annua	5 ng/m ³
As	Salute	Valore obiettivo	Anno civile	Media annua	6 ng/m ³
Ni	Salute	Valore obiettivo	Anno civile	Media annua	20 ng/m ³

Altri inquinanti - lo stato e i trend

I risultati dei monitoraggi hanno evidenziato situazioni in progressivo miglioramento per gli inquinanti **monossido di carbonio (CO)**, **biossido di zolfo (SO₂)**, **benzene** e **metalli**, per i quali non si registrano situazioni critiche.

BIOSSIDO DI ZOLFO (SO₂) E MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)

La concentrazione in aria di biossido di zolfo e monossido di carbonio si è progressivamente ridotta nel tempo, assumendo negli ultimi anni valori di gran lunga inferiori ai valori limite e, per quanto riguarda SO₂, prossimi al limite di rilevabilità strumentale.

Anche per questi inquinanti la normativa vigente fissa valori limite e l'obbligo di valutazione e gestione della qualità dell'aria su tutto il territorio regionale.

Per quanto concerne il **biossido di zolfo**, negli ultimi anni non si sono mai verificati superamenti dei valori limite, orario e giornaliero. Per questa ragione il numero di stazioni che misurano l'SO₂ è stato progressivamente ridotto nell'ambito della rete regionale, fino a una sola stazione di monitoraggio attiva dal 2012, localizzata a Ravenna, dove sono presenti le sorgenti più significative di questo inquinante.

La stazione di "Rocca Brancaleone" (Ravenna) fornisce la serie storica più estesa di SO₂: come mostrato in **figura 25** le concentrazioni sono drasticamente calate fino alla metà degli anni 90, per poi diminuire ancora fino a oggi.

Allo stato attuale il biossido di zolfo non è più un inquinante critico; si rileva tuttavia che esso può risultare un importante precursore della formazione di particolato secondario, anche alle basse concentrazioni attuali.

Gli ossidi di zolfo sono inoltre riconosciuti come potenzialmente dannosi per la vegetazione ed inoltre su materiali e beni culturali a causa delle proprietà chimico-fisiche dello stesso SO₂ e dei suoi prodotti di ossidazione.

Le concentrazioni in aria di monossido di carbonio si sono progressivamente ridotte, rimanendo ben al di sotto dei limiti di legge da lungo tempo. Da oltre 10 anni, infatti, il valore limite (massimo giornaliero media mobile su 8 ore = 10 mg/m³) non è mai stato superato in alcuna stazione di monitoraggio e in tutte le stazioni si misurano spesso concentrazioni orarie al di sotto del limite di quantificazione. Considerate le concentrazioni estremamente contenute, nell'ultimo Programma di valutazione si è proceduto alla razionalizzazione sull'intero territorio regionale dei sensori che misurano questo inquinante che, pertanto, a partire dal 2020 passano da 11 a 5.

La stazione di traffico "Timavo" di Reggio Emilia mostra la serie storica più lunga di CO in Regione (**figura 26**). Il monossido di carbonio era in crescita in un passato recente per l'aumento dei processi di combustione, soprattutto nelle aree urbane. **A partire dagli anni '80 le concentrazioni in aria sono progressivamente diminuite** grazie al miglioramento dell'efficienza di combustione, all'impiego di idrocarburi più semplici rispetto a combustibili di struttura più complessa, all'introduzione di marmitte catalitiche nei veicoli alimentati a benzina, azioni che hanno comportato la riduzione delle emissioni dei prodotti di combustione incompleta ed il crollo delle concentrazioni di CO, ora molto al di sotto delle soglie di pericolosità.



La concentrazione di biossido di zolfo e monossido di carbonio: si è ridotta nel tempo



Il biossido di zolfo: non è più un inquinante critico



Il monossido di carbonio: è al di sotto dei limiti di legge da oltre 10 anni



FIGURA 25

Andamento della media annua di biossido di zolfo nella stazione di Ravenna "Rocca Brancaleone"

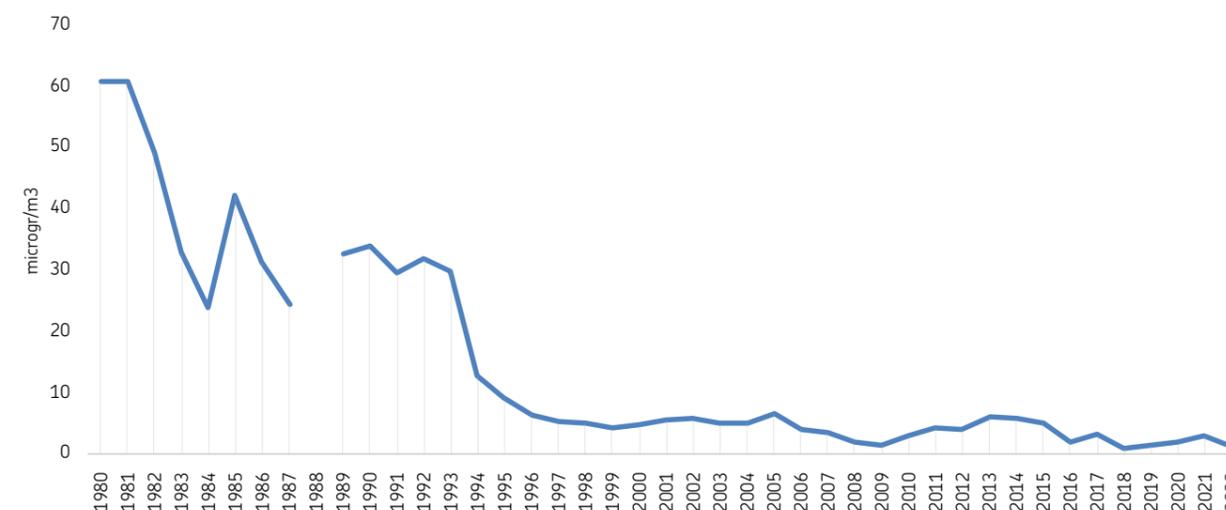
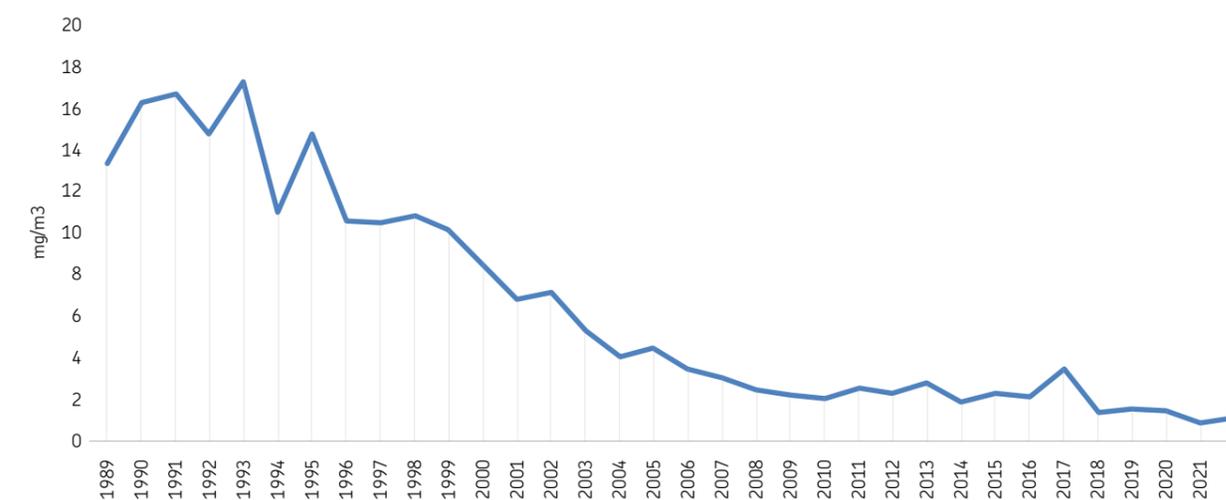


FIGURA 26 Andamento dei massimi per ogni anno della media mobile su 8 ore di monossido di carbonio nella stazione di Reggio Emilia "Timavo"



BENZENE

Analogamente a quanto riscontrato in Italia e in Europa da diversi anni, in Emilia-Romagna la **concentrazione di benzene è notevolmente diminuita nel tempo e risulta ampiamente inferiore al valore limite di protezione della salute umana (5 µg/m³)**. L'andamento pluriennale nel periodo 2013-2022 **evidenzia una sostanziale stazionarietà dei livelli di questo inquinante (figura 27)**.

Tale inquinante, dunque, non costituisce più un rilevante problema di inquinamento atmosferico; tuttavia, in considerazione delle particolari ricadute che può avere sulla salute umana, la concentrazione in aria di benzene viene rilevata ove risulta presente in quantità maggiori ovvero nelle **stazioni di traffico**, razionalizzate a 9 a partire dal 2020.



Il benzene: è diminuito nel tempo ed è inferiore al valore limite

FIGURA 27
Andamento della concentrazione media annuale di benzene dal 2013 al 2022

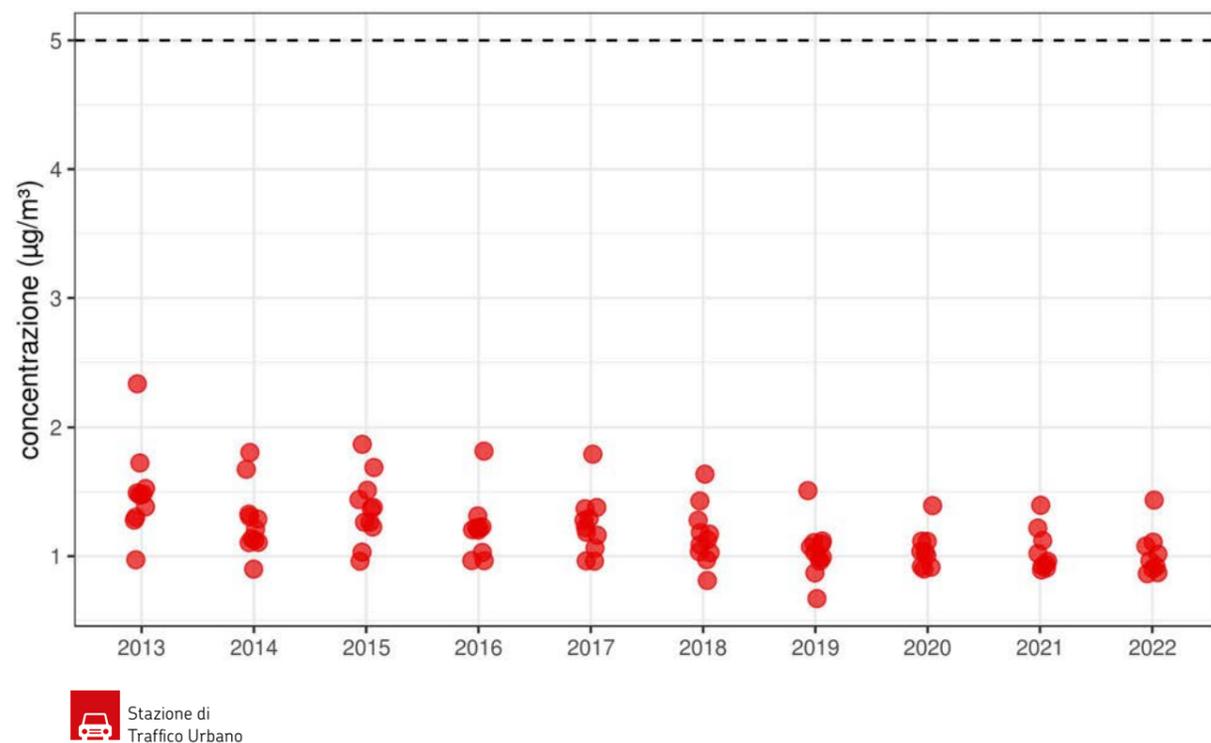
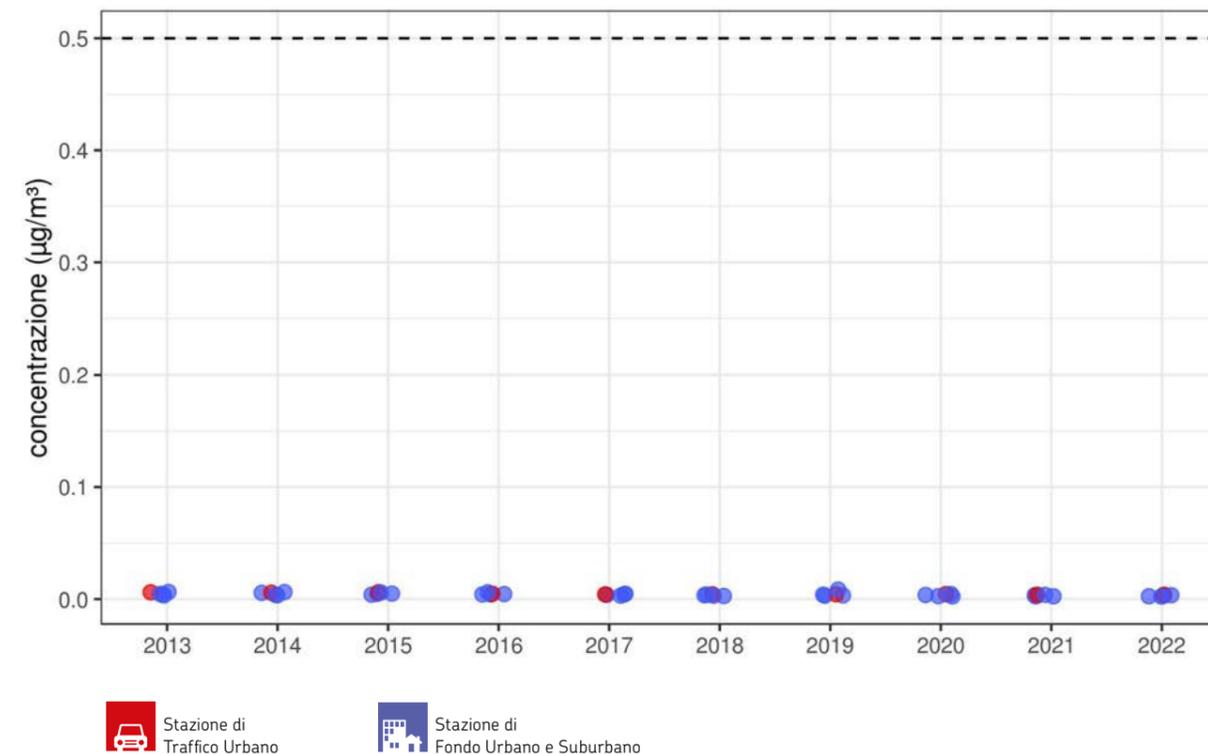


FIGURA 28
Andamento della concentrazione media annuale di piombo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dal 2013 al 2022



METALLI

I metalli, i semimetalli e i loro composti sono immessi nell'atmosfera sia da **sorgenti antropiche** (quali i processi di combustione da sorgenti stazionarie, l'industria del ferro e dell'acciaio, l'industria dei metalli non ferrosi, le combustioni da sorgenti mobili), che da **sorgenti naturali** (quali eruzioni vulcaniche, risollevarimento dal suolo, trasporto a lunga distanza di sabbie sahariane). Essi si ritrovano essenzialmente distribuiti nella massa delle varie frazioni dimensionali del materiale particolato nell'atmosfera. Tra i metalli e i semimetalli che possono essere liberati in atmosfera, particolare rilevanza assumono **piombo, cadmio, nichel e arsenico**.

Il valore limite e i valori obiettivo per i metalli pesanti, calcolati sulla base della media annuale delle concentrazioni mensili, rilevati nelle 5 stazioni della rete regionale dedicate (di traffico e di fondo), **sono pienamente rispettati in tutta la regione Emilia-Romagna, nell'intero periodo preso in considerazione (2013-2022)**.

Per tutti e quattro i metalli, sia le variazioni interannuali, che intrannuali risultano minime. Le concentrazioni di **piombo**, rilevate in 5 stazioni, sono **inferiori** di ben 2 ordini di grandezza al **valore limite** (figura 28). Per quanto riguarda **cadmio, arsenico e nichel** le concentrazioni mensili sono sempre **inferiori** al **valore obiettivo** di quasi un ordine di grandezza (Figure 29, 30, 31).

“
Metalli pesanti:
valori limite e valori obiettivo
sono rispettati in tutta la regione

FIGURA 29
Andamento della concentrazione media annuale di arsenico (ng/m^3) dal 2013 al 2022

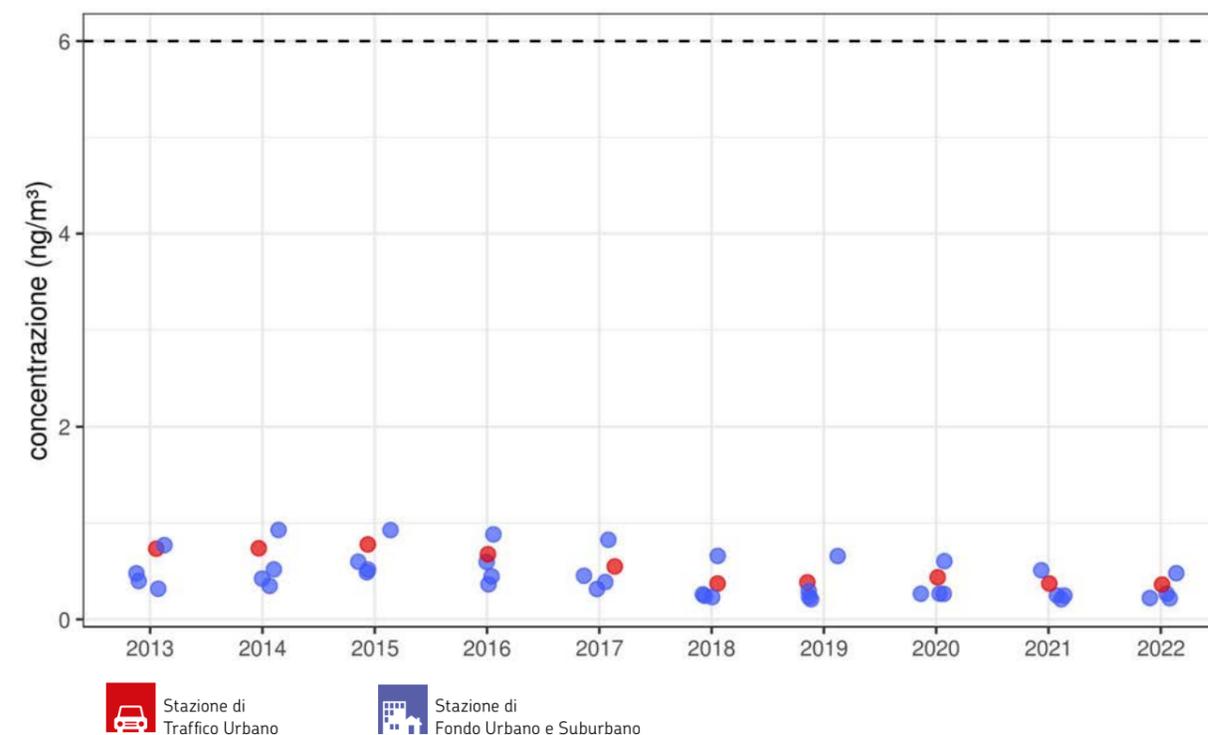


FIGURA 30
Andamento della concentrazione media annuale di cadmio (ng/m³) dal 2013 al 2022

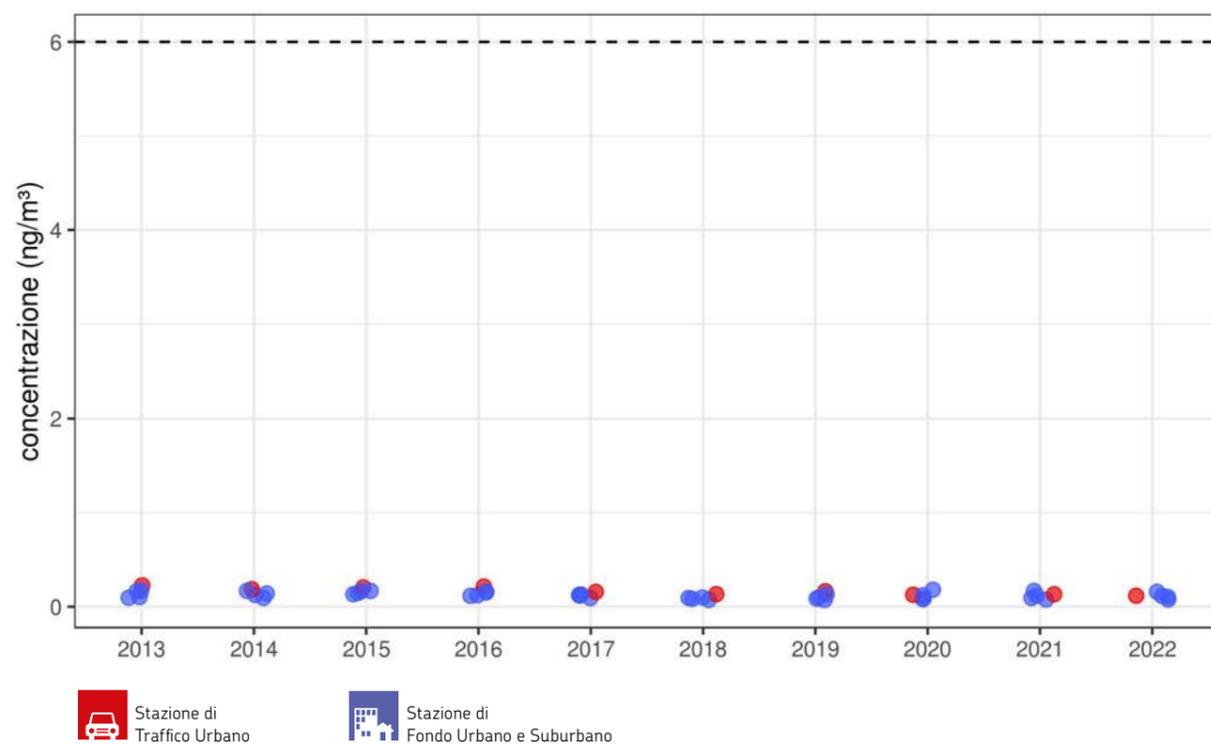
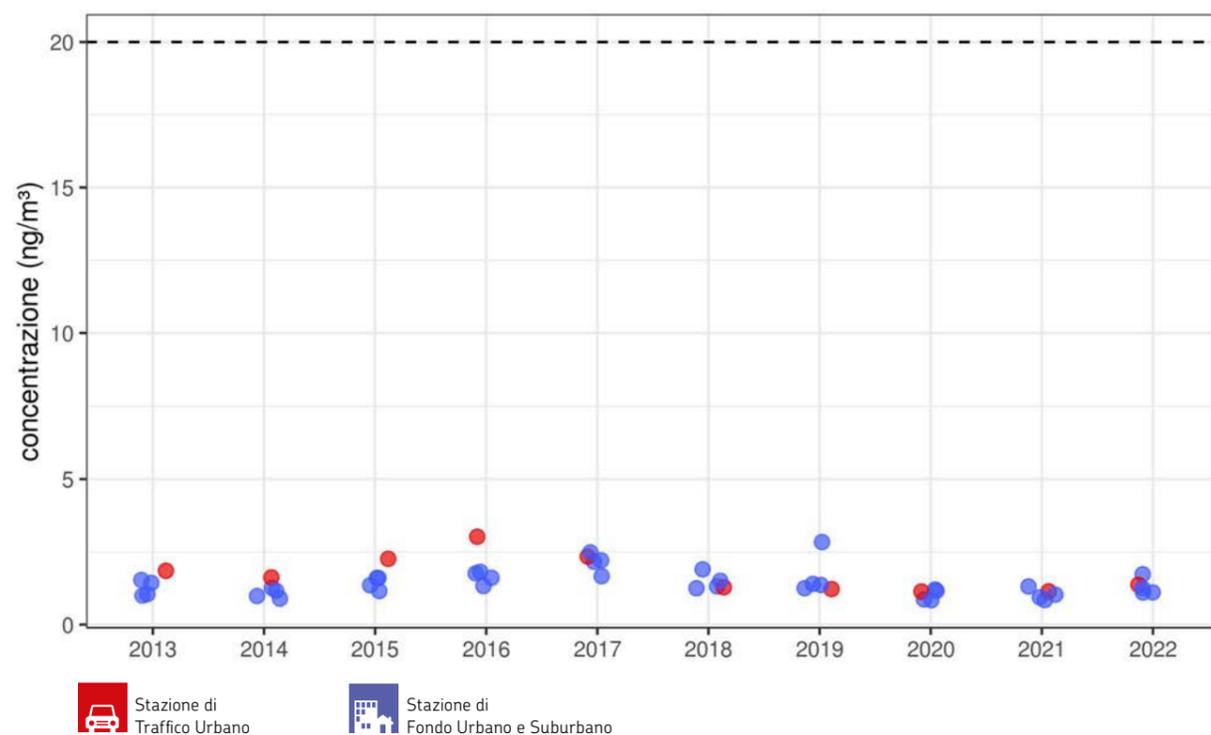


FIGURA 31
Andamento della concentrazione media annuale di nichel (ng/m³) dal 2013 al 2022



Black carbon

Nel particolato atmosferico, oltre a essere presente materiale inorganico (nitrati, solfati, ammonio), specie organiche, minerali di origine cristallina e particelle di aerosol biologico, vi sono quantità a volte importanti di black carbon (BC).

Le particelle contenenti black carbon sono agglomerati di atomi di carbonio, approssimativamente di forma sferica, che si originano dalla combustione incompleta dei combustibili fossili. La sua formazione avviene in condizioni di scarsa presenza di ossigeno. La dimensione originaria è di circa 20-30 nm, quindi, subito dopo l'emissione, si formano dei cluster, delle catene lineari o ramificate (aggregati e agglomerati) che raggiungono dimensioni dell'ordine delle centinaia di nanometri. Quasi tutto il BC presente in atmosfera si viene a trovare nel particolato sub-micrometrico (PM₁).

Le emissioni di BC sono quindi principalmente associate alle **combustioni incomplete di biomasse legnose** (riscaldamento domestico, combustione di sfalci agricoli, ma anche incendi di foreste e vegetazione), al **traffico veicolare**, soprattutto quello con combustibile diesel, e alla **produzione di energia**.

Le emissioni globali di black carbon sono aumentate costantemente nel periodo 1850-2000 con un cambiamento nel tipo di fonti. Nel periodo preindustriale, le emissioni di BC erano dominate dalla combustione della biomassa per il riscaldamento e la cottura dei cibi. A partire dal 1850 le emissioni globali di BC hanno mostrato un aumento generale a causa dell'utilizzo di consumo di carbone e biomasse nel settore residenziale. Dalla metà del '900 l'emissione di BC è accelerata a causa dell'aumento dei consumi di combustibili nel settore dei trasporti e industriali.

Il black carbon svolge un **ruolo importante all'interno del sistema climatico**. L'IPCC lo pone come una specie inquinante emergente dal punto di vista dell'effetto riscaldante sull'atmosfera, a causa della sua capacità di assorbire fortemente la radiazione solare e **provocando quindi il riscaldamento della troposfera**, sotto forma di cambiamenti nelle nuvole, nella circolazione, nella temperatura superficiale e nelle precipitazioni.

Le tecniche per misurare la quantità di BC presente in un campione d'aria sono basate sulle diverse proprietà dell'aerosol. I dati riportati nel presente studio sono stati ottenuti mediante il metodo ottico, attraverso l'utilizzo dell'etalmetro MetOne Instrument, modello BC1054, acquistato al fine di soddisfare gli obiettivi del Progetto Prepair (<http://www.lifeprepare.eu/>).



Le particelle di Black Carbon: si originano dalla combustione incompleta dei combustibili fossili



Le emissioni di Black Carbon sono associate:

- alla combustione di biomasse legnose
- al traffico veicolare
- alla produzione di energia



Il Black Carbon: svolge un ruolo importante nel sistema climatico

Nel presente report si è valutato anche il contributo del BC derivante dalla combustione della legna (BCbb) o derivante dal contributo del traffico (BCff), secondo il “modello dell’Etalometro” in cui la lunghezza d’onda di riferimento per la misura del BC totale è stata definita a 470 nm.

Il punto di campionamento del BC si trova nell’area urbana bolognese, nella stazione di misura posta all’interno dell’Area della Ricerca del CNR di Bologna. Il sito dista 700 m dall’asse tangenziale-autostradale e circa 3 Km dall’aeroporto, le due più vicine fonti di maggior impatto.

Di seguito vengono riportati e commentati gli andamenti temporali - medie mensili e medie annuali - ottenuti dalle osservazioni effettuate da maggio 2018 a marzo 2023.

FIGURA 32 Andamento della concentrazione mensile di BC totale per il periodo di studio da maggio 2018 a marzo 2023

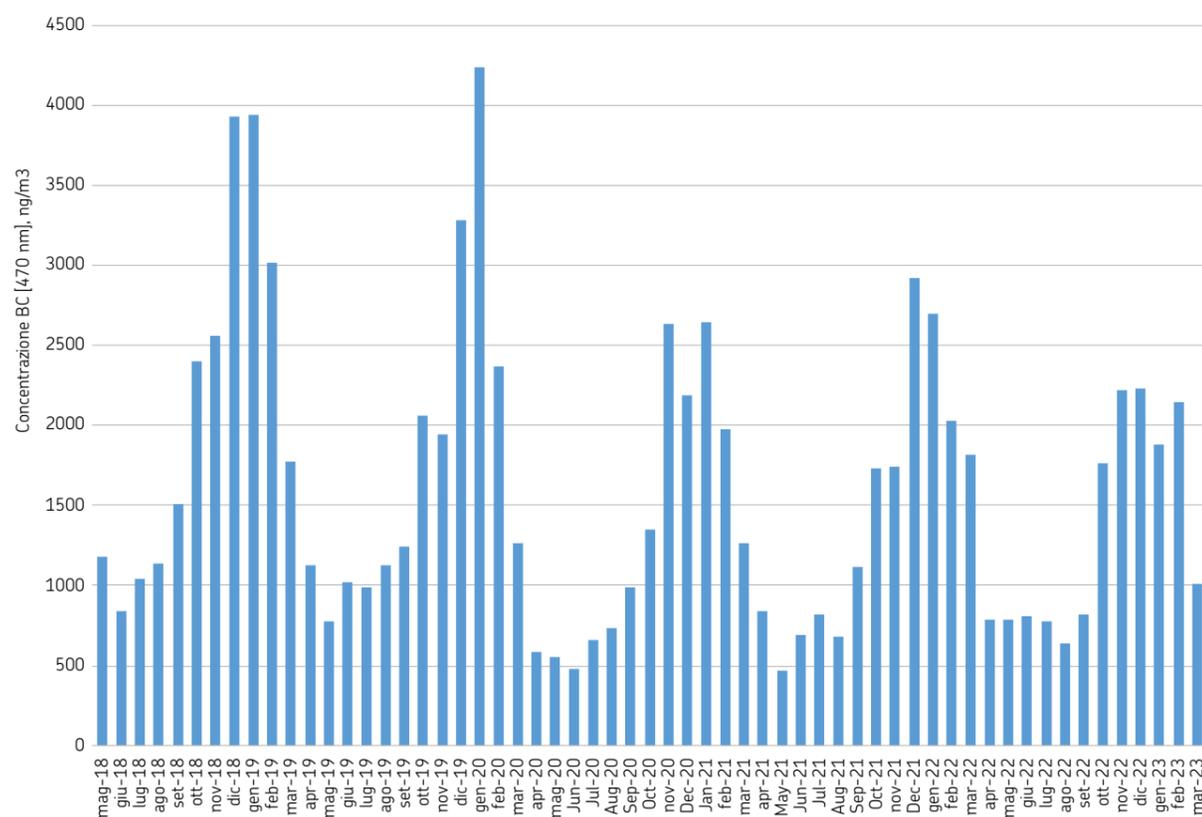


FIGURA 33 Andamento della concentrazione mensile di BC dovuto al traffico (BCff) per il periodo di studio da maggio 2018 a marzo 2023

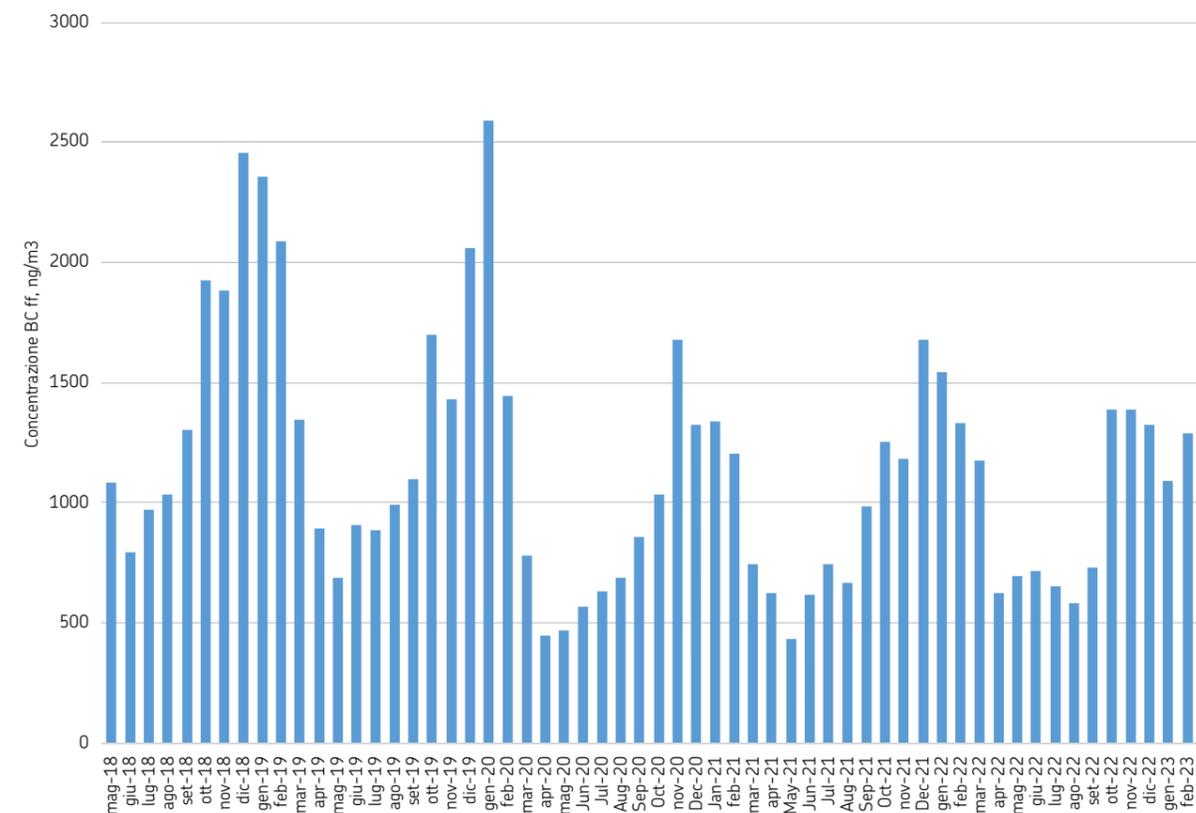


FIGURA 34 Andamento della concentrazione mensile di BC dovuta alla combustione della biomassa (BCbb) per il periodo di studio da maggio 2018 a marzo 2023

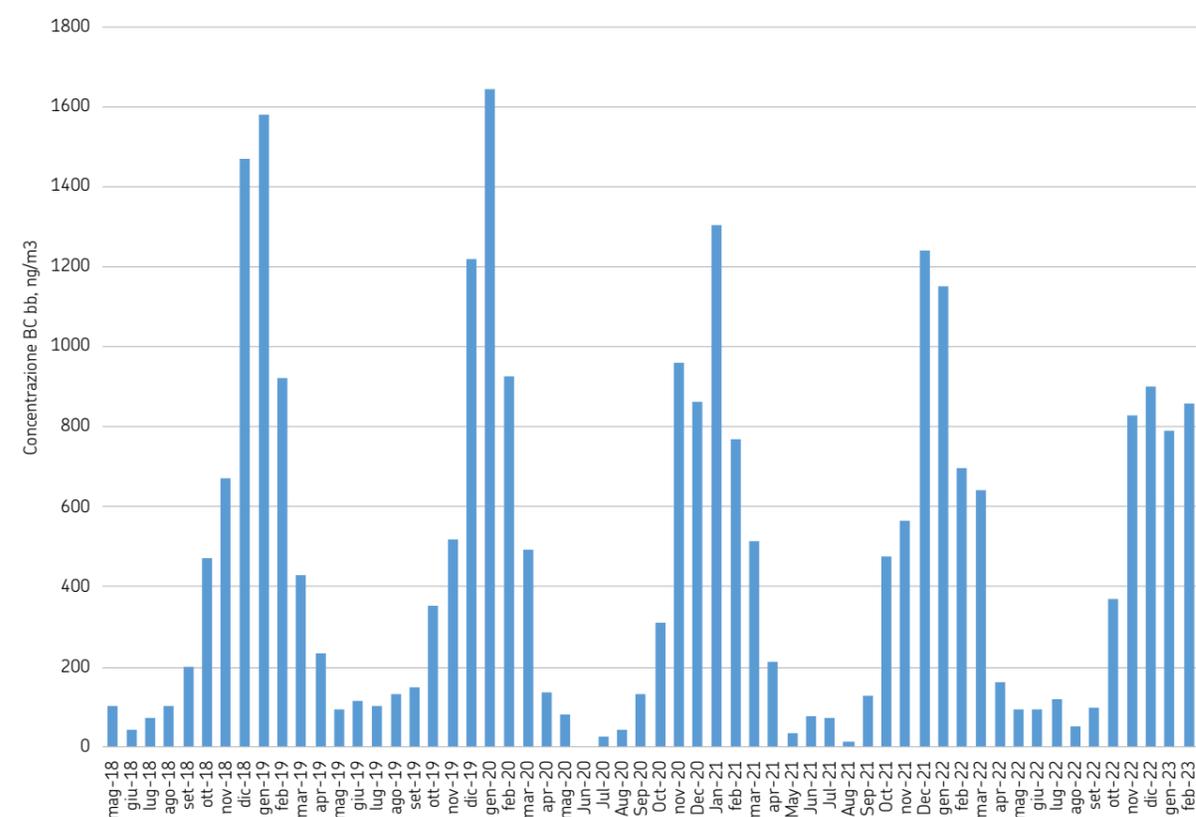


FIGURA 35 Andamento delle concentrazioni medie negli anni di misura del BC totale (da maggio 2018 a marzo 2023)

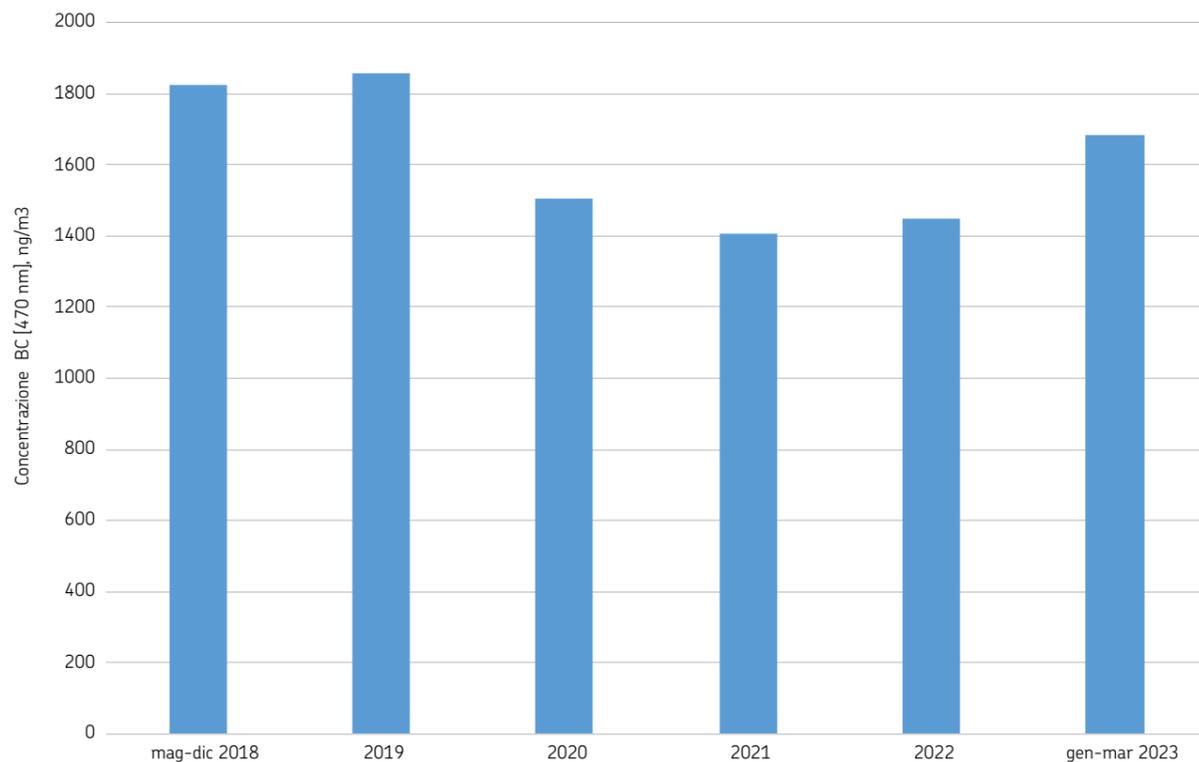
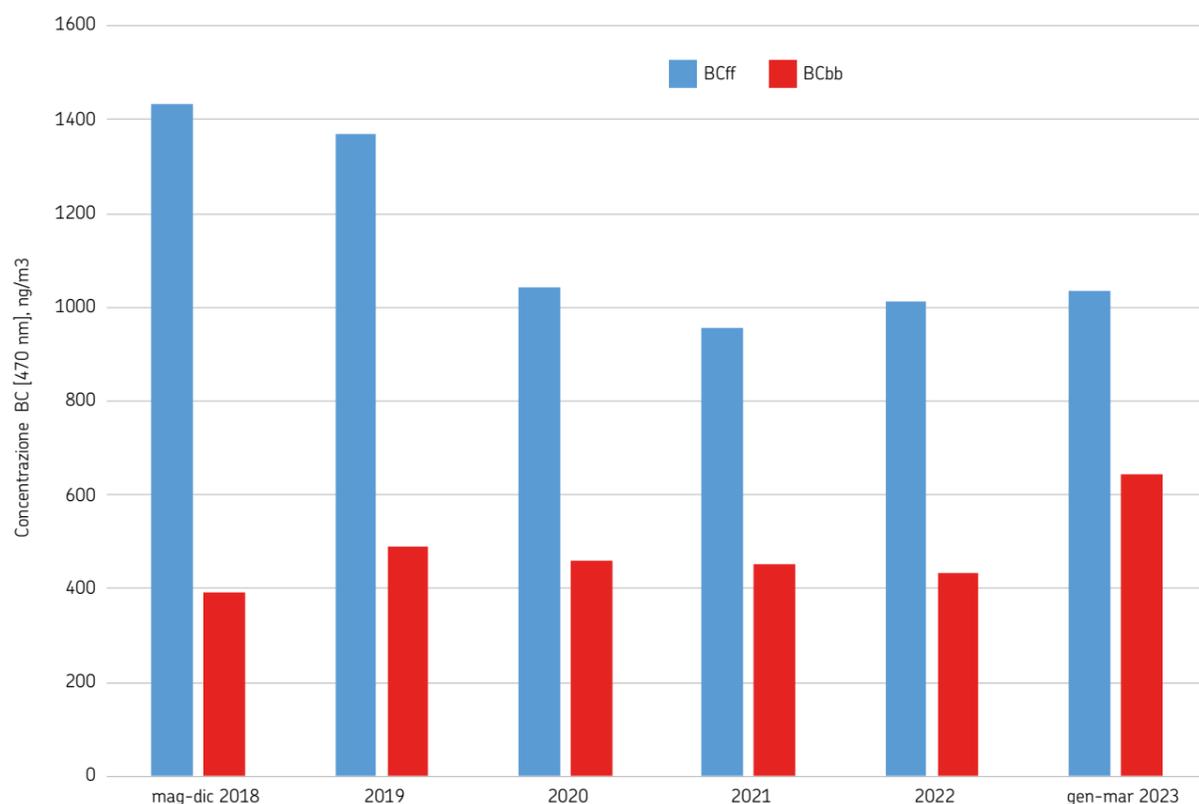


FIGURA 36 Andamento delle concentrazioni medie della misura del BC da traffico (BCff) e da combustione di biomassa (BCbb) da maggio 2018 a marzo 2023



Dall'analisi dei dati ottenuti nel quinquennio 2018-2023 si possono sintetizzare le seguenti valutazioni:

1. Il **contributo del BC dovuto al traffico (BCff)** è maggiore nei mesi da ottobre a febbraio, mentre l'apporto della **combustione della legna (BCbb)** mostra una evidente impennata a partire da novembre fino a marzo tendendo a valori quasi nulli nei mesi estivi;
2. Il 40% del BC totale è rappresentato dal contributo della biomassa (BCbb) nei mesi invernali, mentre il maggior contributo del traffico (BCff) al BC totale è a luglio con più del 90%. Interessante notare che nel 2019 il contributo della combustione della biomassa al BC totale è rimasto a valori del 40% da dicembre a gennaio, mentre nel 2020 per un periodo maggiore, da dicembre a marzo, **probabilmente a causa del maggior utilizzo di combustibile da riscaldamento domestico per le restrizioni COVID**. Si veda il paragrafo successivo "Effetti delle misure contro la pandemia da Covid19 sulla qualità dell'aria";
3. Il **contributo della massa del BCff al PM₁ domina in tutto il periodo dell'anno**, variando da 6% a 22% senza un particolare andamento stagionale, mentre il contributo della massa dovuto alla combustione della legna (BCbb) al PM₁ passa da valori molto bassi in estate a valori di 8-15% nei periodi più freddi;
4. Prendendo in considerazione solo le annualità dove vi è presenza di dati in tutti i mesi (2019, 2020, 2021, 2022) gli andamenti della concentrazione del BCff mostrano una diminuzione passando dal 2019 al 2020 per poi rimanere stabili negli anni 2021 e 2022 mentre i valori delle concentrazioni annuali del contributo del traffico (BCff) al BC totale mostrano una maggiore stabilità nel tempo;
5. Gli andamenti tipo mettono in evidenza le due rush hour nei giorni infra-settimanali, meno evidenti nei giorni prefestivi/festivi, soprattutto per quanto riguarda il contributo del traffico (BCff). Il contributo della combustione della biomassa (BCbb) mostra invece una prevalenza durante le ore serali e, sebbene in misura minore, anche nelle ore notturne.



Black Carbon totale:

- da ottobre a febbraio il maggiore contributo è dovuto al traffico
- da novembre a marzo il maggiore contributo è dovuto alla combustione da legna

Ammoniaca

I risultati delle osservazioni della composizione dell'aerosol atmosferico hanno da tempo mostrato come **un'importante percentuale di PM₁₀ e PM_{2,5} sia composta da particolato secondario, cioè da particolato in fase liquido/solida che si è formato in atmosfera** a seguito di reazioni chimico-fisiche.

Una di queste componenti del materiale particolato vede il coinvolgimento dello **ione ammonio**, per la formazione di solfato, solfato acido e nitrato di ammonio. Nei siti di misura nella regione Emilia-Romagna le osservazioni di tali **sali di ammonio portano a spiegare**, nei mesi invernali, **mediamente il 40-45% della massa del PM_{2,5} nel sito urbano di Bologna** (arrivando fino a circa 60% durante gli eventi acuti di concentrazioni in massa di particolato atmosferico) **e oltre il 50% nel sito rurale di San Pietro Capofiume (BO)**.

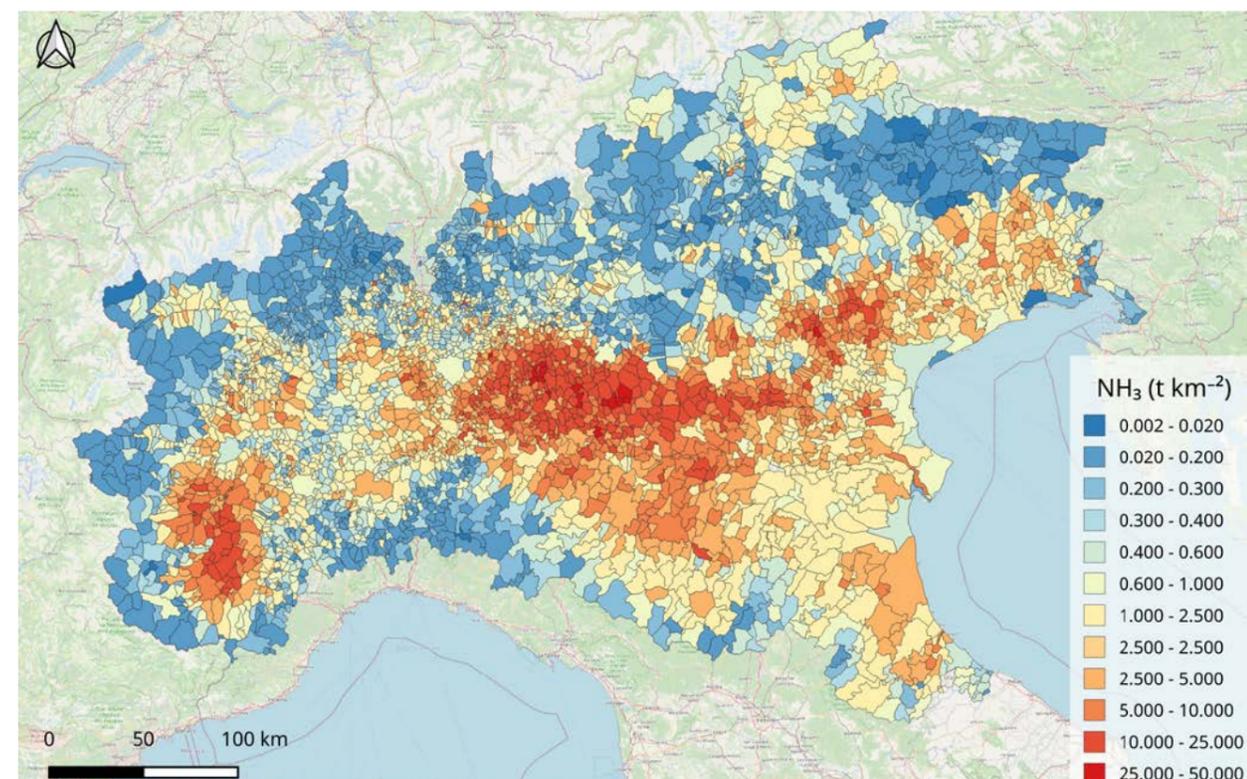
Come è noto, i composti coinvolti in tali reazioni - che portano cioè alla produzione di sali di ammonio - sono in gran parte riconducibili agli ossidi di zolfo, agli ossidi di azoto e all'ammoniaca, emessi questi in modo primario. Inoltre, le possibilità che tali reazioni avvengano dipendono da concentrazioni di vapor d'acqua e di alcuni valori di parametri fisici quali la temperatura e la radiazione solare.



In inverno i sali di ammonio sono all'origine:

- del 40-45% della massa di PM_{2,5} nel sito urbano
- di oltre il 50% nel sito rurale

FIGURA 37
Emissioni di NH₃ nel Bacino Padano espresse in tonnellate per km² (2017)



Analizzando i dati degli inventari delle emissioni INEMAR, si nota che per gli ossidi di azoto il traffico, in particolare quello alimentato a diesel, risulta la prima fonte di emissione mentre, per quanto riguarda gli ossidi di zolfo, il principale contributo deriva dal settore industriale; infine, il **macrosettore agricolo e in particolare il comparto zootecnico risulta in assoluto la maggior sorgente di ammoniaca arrivando a contribuire per oltre il 97%**. Valori importanti dei flussi di massa di ammoniaca emessi derivano dagli spandimenti di liquami di origine zootecnica sui terreni agricoli allo scopo di fertilizzarli.

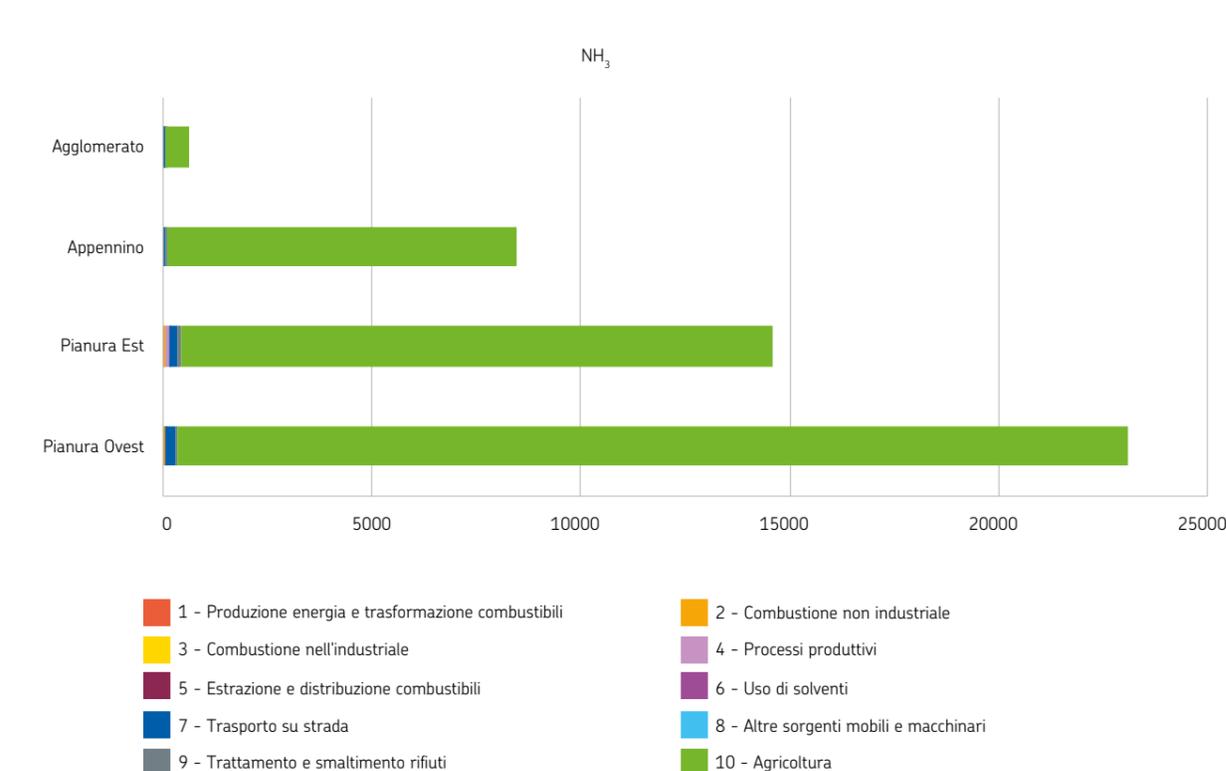
A differenza degli ossidi di azoto e di zolfo, i quali hanno limiti normativi che devono essere rispettati, l'ammoniaca non ha riferimenti di tipo legislativo. **Vista la sua importanza però nella costituzione delle masse di PM, da tempo in Emilia-Romagna si è deciso di studiarla in siti di misura posti nell'area centro-orientale della regione**, a San Pietro Capofiume nella zona rurale tra Bologna e Ferrara, e nella zona a nord di Parma per mezzo di un laboratorio mobile che compie misure in sei postazioni diverse alternando nel tempo tali osservazioni. Se si analizzano le densità emissive dell'ammoniaca espresse in t km⁻², mostrate nella mappa riportata nella **figura 37** - realizzata nell'alveo del progetto Prepair e che mostra la situazione su tutta la Pianura Padana - si nota molto bene il **maggior contributo della zona ovest** della regione Emilia-Romagna a fronte di un minor apporto nell'area orientale.

Tale condizione è ancor più visibile nel grafico di **figura 38** dove vengono disaggregate le emissioni dell'NH₃ (espresse in ty⁻¹) derivante dall'agricoltura e per gli altri macrosettori, nelle zone che caratterizzano la regione Emilia-Romagna dal punto di vista della qualità dell'aria. Risulta ben visibile l'apporto maggiore nella **pianura ovest**.



Il settore agricolo e zootecnico: è la maggiore sorgente di ammoniaca

FIGURA 38
Contributo emissivo di NH₃ espressi in ty⁻¹ per zona e per macrosettore



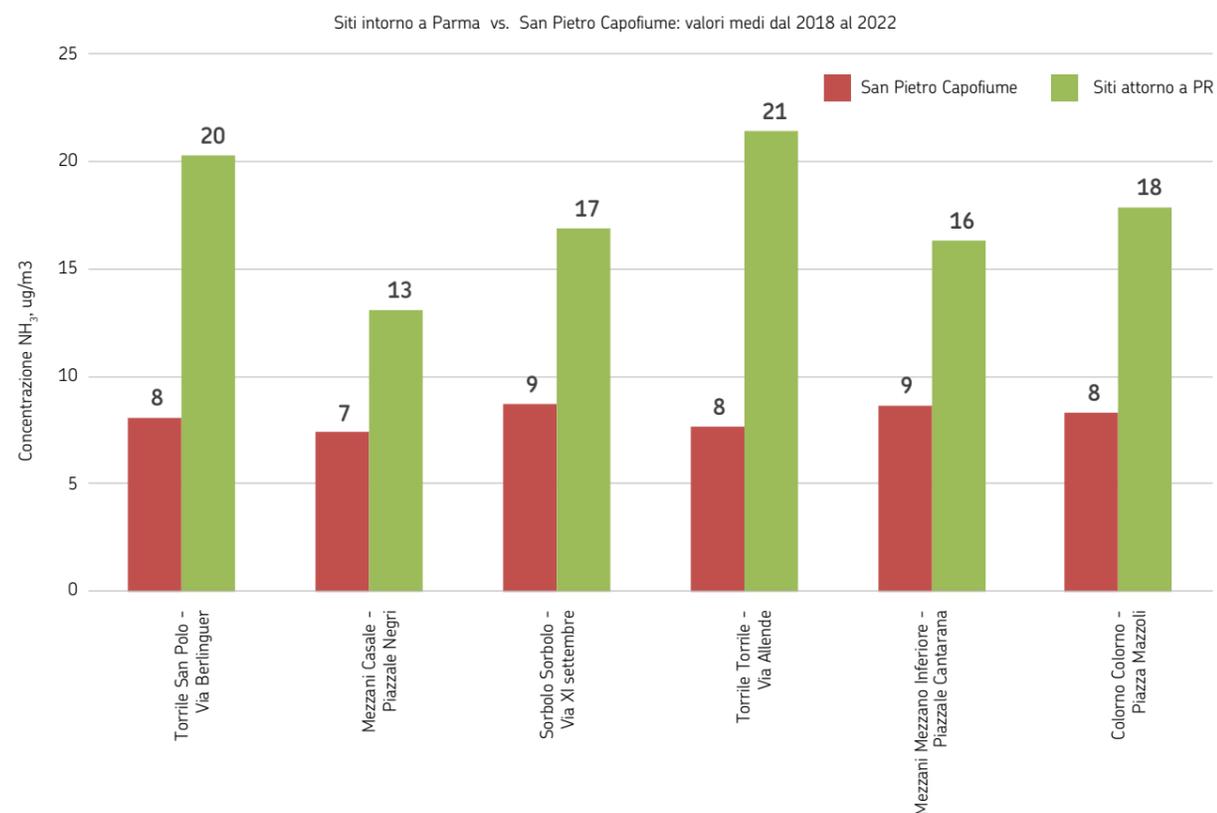
Il confronto tra le concentrazioni osservate a San Pietro Capofiume (BO) e l'area a nord di Parma, evidenziato nella [figura 39](#), mostra una situazione simile a quella dei flussi di massa analizzati nelle figg. 1 e 2. Anche per questa si evidenzia infatti come l'area ovest (nord di Parma) mostri valori molto più marcati dell'area est (San Pietro Capofiume, BO).

L'atmosfera dell'Emilia-Romagna si può quindi certamente definire **ricca in ammoniacca**, vista la grande presenza di **attività agricole** e di **allevamento** che provocano la sua emissione, sebbene sia concentrata sul territorio in modo eterogeneo, come mostrano i valori osservati. In un contesto di questo tipo, dopo aver neutralizzato tutti gli ioni solfato presenti, l'ammoniaca inizia a reagire per formare il nitrato d'ammonio e per tali motivi i valori di particolato sono spesso ricchi di tale sale. Al fine quindi di poter ridurre le masse di PM **risulta necessario diminuire considerevolmente le concentrazioni di NH₃**. Il piano aria integrato della Regione Emilia-Romagna 2030, ad oggi in via di approvazione, va proprio in questa direzione, richiedendo sensibili diminuzioni dei valori emessi dell'azoto ridotto.



L'atmosfera in Emilia-Romagna: è ricca in ammoniacca, concentrata in modo eterogeneo

FIGURA 39 Concentrazione media dell'ammoniaca a San Pietro Capofiume (BO) e in diversi siti nei dintorni di Parma, dal 2018 al 2022



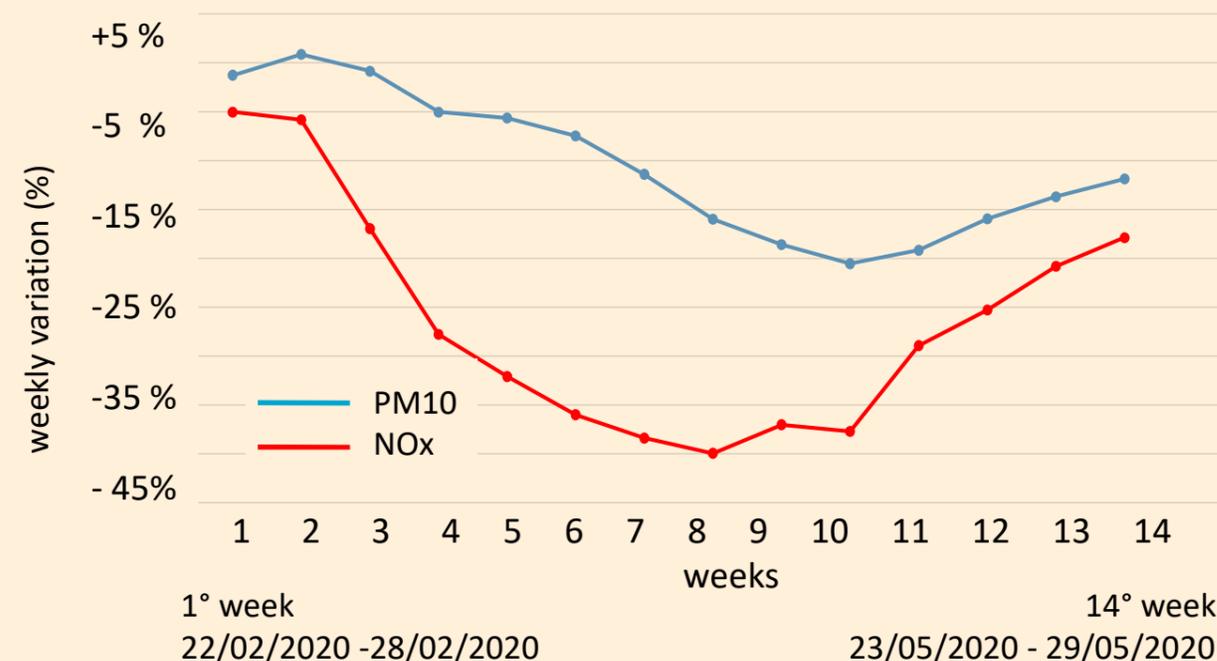
APPROFONDIMENTO

Effetti delle misure contro la pandemia da Covid19 sulla qualità dell'aria

In Italia, a partire da marzo 2020, la **pandemia da Covid19 ha portato all'introduzione di una serie di azioni finalizzate a limitare il diffondersi del virus, che hanno comportato rilevanti variazioni su alcune importanti sorgenti di inquinanti atmosferici**. Si è generata, così, una condizione unica e, auspicabilmente, irripetibile per misurare l'effetto che tali interventi drastici hanno avuto sulla qualità dell'aria anche nella regione Emilia-Romagna. Studi in tal senso sono stati prodotti sia a livello locale che su riviste scientifiche internazionali. In particolare due progetti a cui Arpae partecipa e ha partecipato come membro di rilievo hanno fornito approfondimenti a livello di bacino padano e nazionale, non solo sugli inquinanti il cui monitoraggio è previsto dalla normativa in vigore (D. Lgs. 155 del 2010) ma anche sulla composizione chimica del particolato atmosferico. A causa della crisi sanitaria nei primi mesi del 2020, nell'ambito del già citato (Report chimica) progetto Life-Prepair, è stato deciso di realizzare un approfondimento specifico per studiare l'effetto delle misure di contenimento sulla qualità dell'aria. Tale studio ha portato nel tempo alla produzione di tre report (https://www.lifeprepare.eu/wp-content/uploads/2020/06/COVIDQA-Prepair-19Giugno2020_final.pdf, <https://www.lifeprepare.eu/wp-content/uploads/2020/09/COVIDQA-Prepair-2-17Settembre2020.pdf>, https://www.lifeprepare.eu/wp-content/uploads/2021/02/Prepair_covidQA_Report3_def2.pdf) ottenendo su questo argomento, che non era tra i suoi obiettivi prefissati, un riconoscimento a livello europeo, il COVID-19 Award: "There is a clear link between human health, the environment and climate, and these interdependencies were the focus of several LIFE projects. A special, Adapting to COVID-19 Award, went to Italy's PrePAIR project for its work in the time of COVID crisis." (<https://environment.ec.europa.eu/news/eu-recognises-best-nature-environment-and-climate/>) Il secondo progetto, Pulviris (<https://www.pulviris.it/>), a cui Arpae ha partecipato assieme ad Ispra, ISS, ENEA e numerose altre agenzie regionali, è invece stato creato ad hoc appositamente per comprendere gli effetti della pandemia sotto diversi punti di vista. Tra le diverse analisi eseguite nell'ambito di questi due progetti, si riportano quelle sulla variazione durante il 2020: alcune, come la concentrazione degli inquinanti (gas, PM e composizione chimica del particolato), sono state fatte rispetto agli anni precedenti, altre, come lo studio sulle emissioni e le concentrazioni analizzate tramite modelli di machine learning, sono fatte rispetto

eu/wp-content/uploads/2020/09/COVIDQA-Prepair-2-17Settembre2020.pdf, https://www.lifeprepare.eu/wp-content/uploads/2021/02/Prepair_covidQA_Report3_def2.pdf) ottenendo su questo argomento, che non era tra i suoi obiettivi prefissati, un riconoscimento a livello europeo, il COVID-19 Award: "There is a clear link between human health, the environment and climate, and these interdependencies were the focus of several LIFE projects. A special, Adapting to COVID-19 Award, went to Italy's PrePAIR project for its work in the time of COVID crisis." (<https://environment.ec.europa.eu/news/eu-recognises-best-nature-environment-and-climate/>) Il secondo progetto, Pulviris (<https://www.pulviris.it/>), a cui Arpae ha partecipato assieme ad Ispra, ISS, ENEA e numerose altre agenzie regionali, è invece stato creato ad hoc appositamente per comprendere gli effetti della pandemia sotto diversi punti di vista. Tra le diverse analisi eseguite nell'ambito di questi due progetti, si riportano quelle sulla variazione durante il 2020: alcune, come la concentrazione degli inquinanti (gas, PM e composizione chimica del particolato), sono state fatte rispetto agli anni precedenti, altre, come lo studio sulle emissioni e le concentrazioni analizzate tramite modelli di machine learning, sono fatte rispetto

Variazioni emissive settimanali (%) per PM₁₀ e NO_x nel bacino padano - dal 22/2 al 29/5/2020 (progetto Life-Prepair): in ordinata le variazioni percentuali in ascissa le settimane



all'atteso. In particolare la modellistica è stata utilizzata, essendo nota l'importanza della meteorologia nel determinare le concentrazioni in aria ambiente degli inquinanti atmosferici, per capire se le eventuali differenze registrate nel 2020 potessero essere attribuibili a particolari condizioni meteorologiche o specificatamente alle variazioni generatesi sulle fonti emissive.

I dettagli metodologici dei vari approcci applicati e i risultati delle diverse analisi, nonché le altre analisi eseguite (es: modellistica, meteorologica, ecc.) non saranno trattati in questa sede e per maggiore approfondimento si rimanda ai report specifici dei progetti citati presenti sui siti dei diversi progetti.

VARIAZIONI EMISSIVE

L'analisi è stata condotta calcolando le variazioni settimanali da metà febbraio a fine maggio, rispetto allo stesso periodo in condizioni normali, cioè in assenza di provvedimenti (scenario di riferimento o anno di inventario delle emissioni disponibile, attualizzato), e quindi facendo una stima.

Le principali sorgenti emissive sappiamo ormai essere il traffico, la produzione e il consumo di energia e le attività agricole e zootecniche. Queste ultime in particolare non

sono state coinvolte in alcun modo dalle azioni intraprese contro la pandemia quindi si possono considerare inalterate. Al contrario, il traffico, sia autostradale che nell'ambito urbano, ha avuto contrazioni molto importanti, che in certi casi hanno portato a diminuzioni anche superiori all'80%. Infine, il trasporto aereo è arrivato a toccare decrementi fino al 100%.

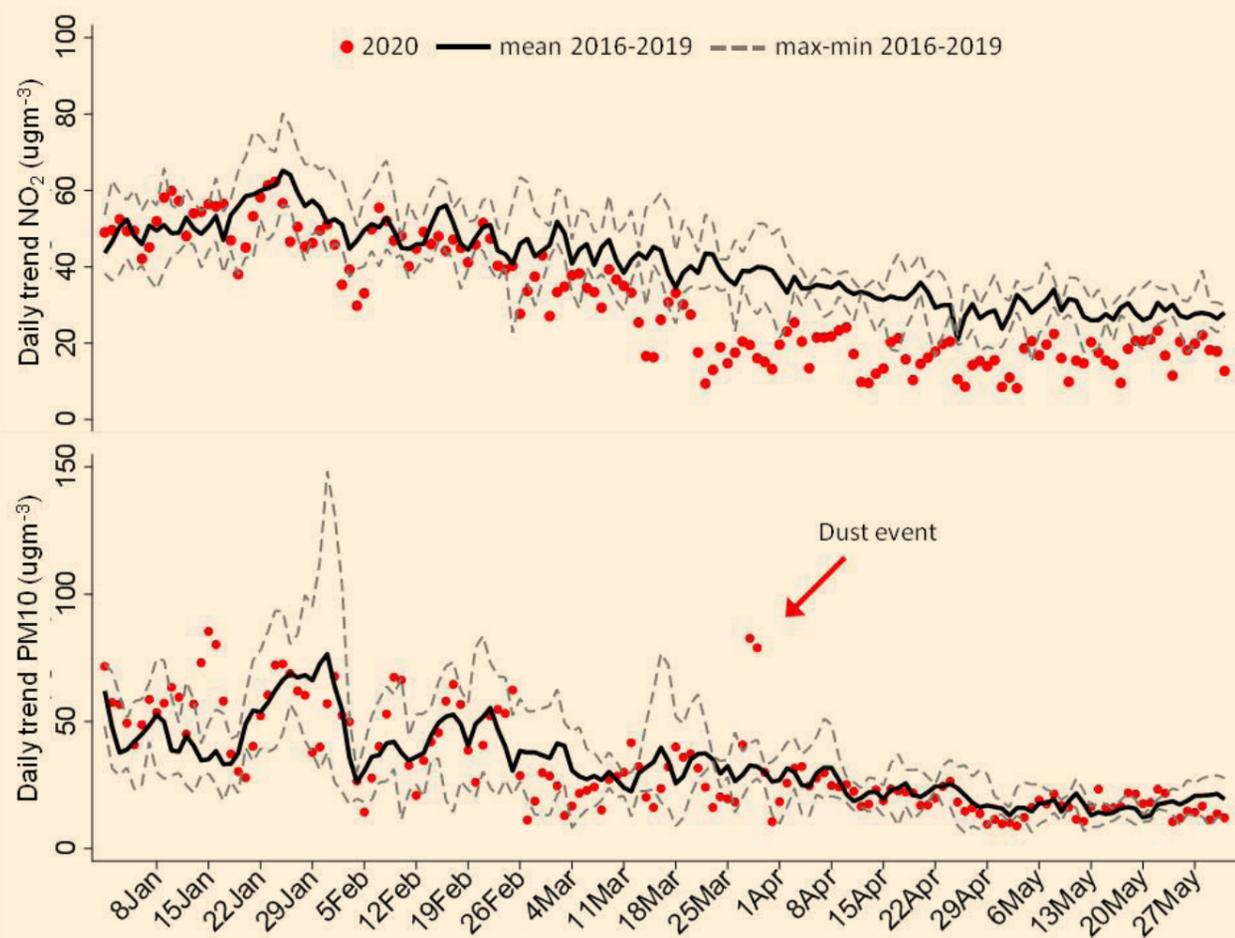
I consumi energetici a fini industriali e produttivi hanno avuto anch'essi flessioni diverse a seconda degli ambiti, e si è arrivati a cali fino a un 65% mentre ai consumi di gas a scopo domestico sono gli unici ad aver registrato degli incrementi tra il 5% e il 15%, probabilmente come conseguenza della maggiore quantità di tempo trascorso in casa dalle persone durante il lockdown 2020.

La stima della variazione legata ai provvedimenti ha individuato un calo emissivo importante per gli ossidi di azoto, che sono arrivati ad avere una contrazione settimanale anche del 40%, e una riduzione in emissione, seppur meno marcata, anche del PM₁₀ (fino a un max settimanale del 20%).

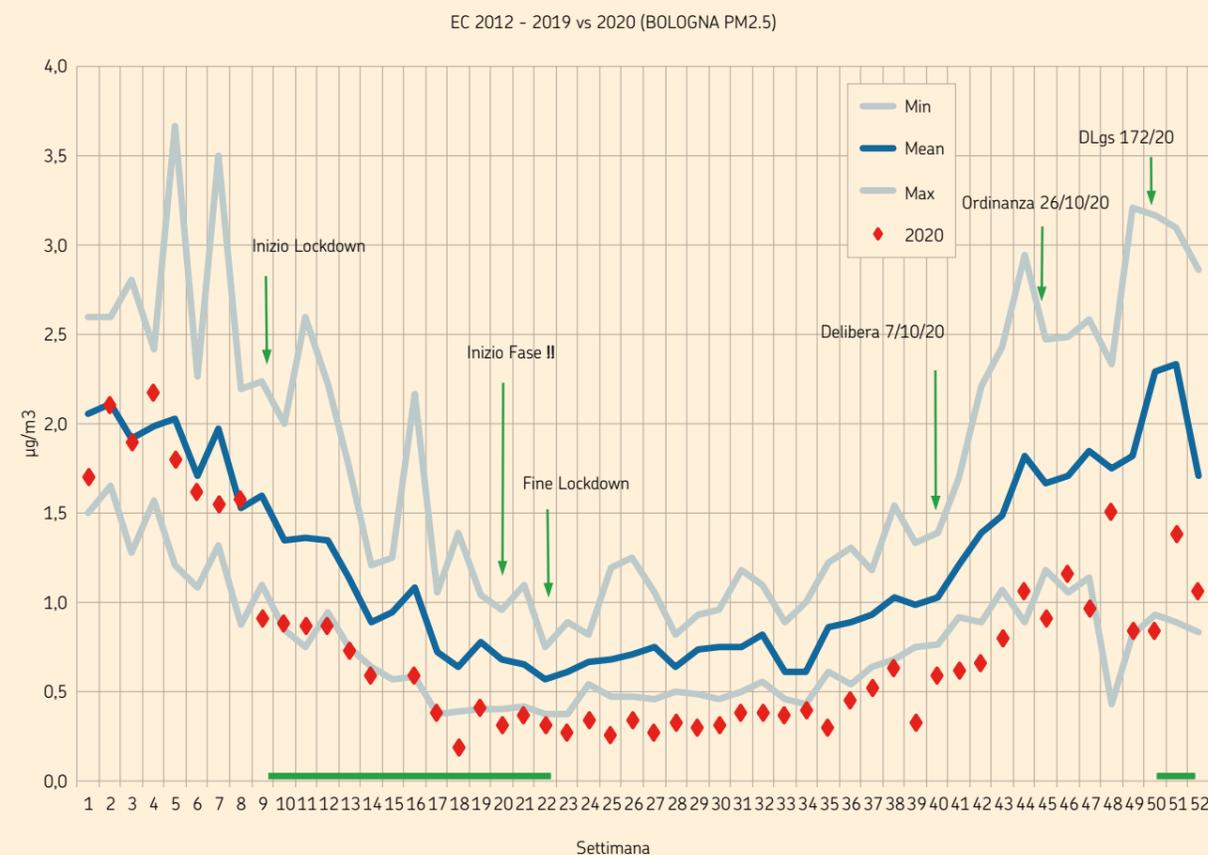
VARIAZIONI DELLE CONCENTRAZIONI

L'analisi dei dati di qualità dell'aria (QA) è stata condotta principalmente su alcuni gas (C₆H₆, NO, NO₂), e due

Andamento della concentrazione media del bacino padano di NO₂ e PM₁₀: in nero e in tratteggiato il valore medio e i max e i minimi rispettivamente nei quattro anni precedenti (2016-2019), i pallini rossi invece rappresentano il 2020 - progetto Life-Prepair



Andamento settimanale nel sito urbano di Bologna di EC nel 2020



frazioni del particolato (PM_{2,5} e PM₁₀). I dati sono stati mediati su tutto il bacino padano, utilizzando le stazioni disponibili, sia da traffico che da fondo urbano, delle reti di monitoraggio della QA. È stata analizzata anche la variazione di ammoniaca (NH₃) laddove il numero di dati fosse sufficiente per le analisi. A differenza dell'analisi eseguita sulle emissioni, i valori degli inquinanti del primo semestre 2020, sono stati confrontati con quelli nello stesso periodo ma degli anni precedenti. Questa scelta è stata fatta poiché la concentrazione in aria dipende da diversi fattori (emissioni antropiche e naturali, condizioni meteorologiche che ne influenzano dispersione, trasporto, formazione, rimozione, deposizione, ecc.) ed è caratterizzata pertanto da una variabilità interannuale. In considerazione di questa variabilità, i valori medi del periodo 2016-2019 sono stati utilizzati per confrontarli con quelli del 2020, affetti dai provvedimenti contro la diffusione di Covid19. Il primo lockdown ha avuto inizio tra fine febbraio e inizio marzo per proseguire fino alla metà inoltrata di maggio.

Le variazioni presenti sono state diverse a seconda degli inquinanti: i gas hanno mostrato decrementi percentuali importanti, arrivando nei mesi di marzo e aprile a dei picchi considerevoli (anche -50%, -60% per NO₂ nelle stazioni da traffico e decrementi anche maggiori per gli inquinanti primari), mentre il particolato ha mostrato segnali più deboli e variabili, seppure comunque nella direzione di un calo.

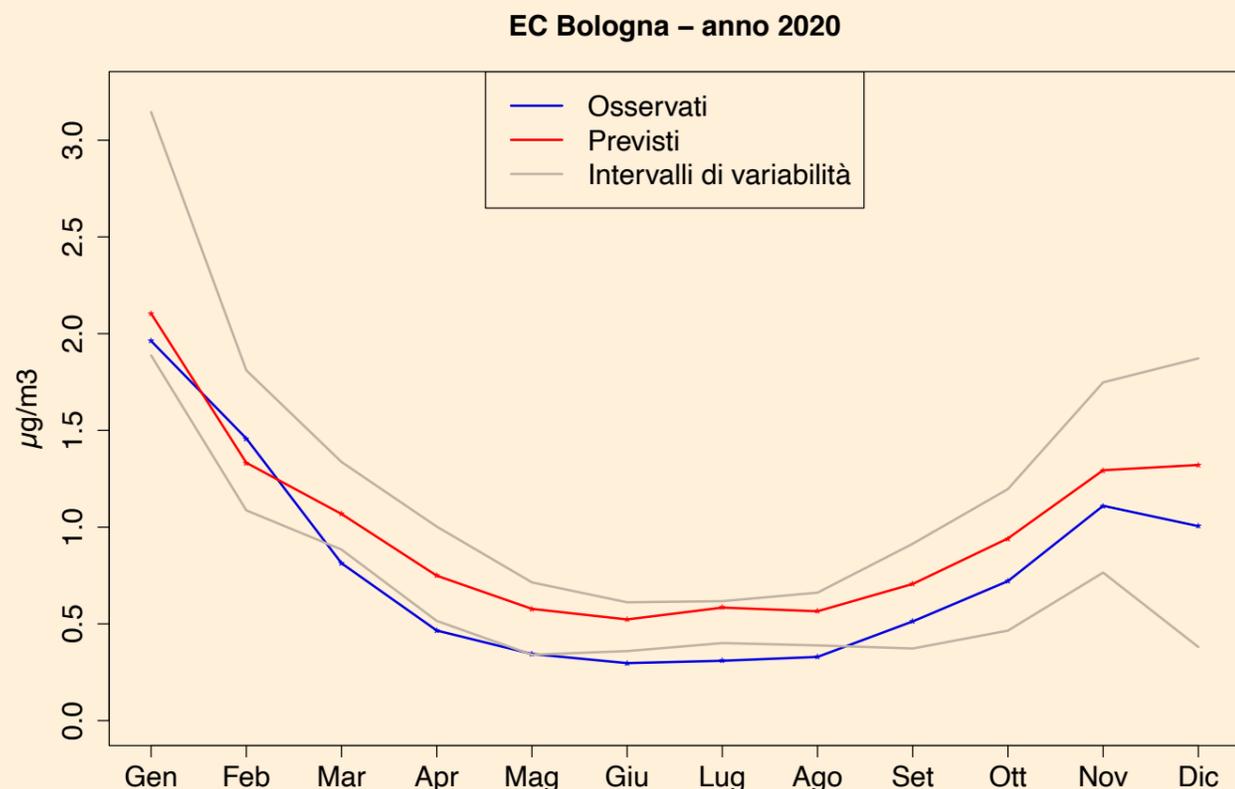
Già da queste analisi si può capire l'importanza della meteorologia sugli inquinanti atmosferici in quanto nel mese di febbraio, dove nessuna limitazione era presente in quanto prima del lockdown, ci sono state variazioni negative rispetto al quadriennio precedente per diversi parametri, questo a causa di un mese particolarmente ricco di eventi atmosferici che hanno portato a una forte dispersione degli inquinanti.

Le analisi eseguite per analizzare le variazioni, a meno del contributo meteorologico, eseguite nell'ambito del progetto Pulvirus sugli inquinanti monitorati per legge hanno fornito risultati statisticamente robusti solo per NO₂, confermando l'importante calo di questo parametro in conseguenza alle azioni intraprese per contrastare il diffondersi della pandemia e non come conseguenza di particolari condizioni meteorologiche.

COMPOSIZIONE CHIMICA

Informazioni sulle specie chimiche presenti nel particolato non sono disponibili in tutti i siti in cui viene monitorata la qualità dell'aria. In Emilia-Romagna la composizione chimica del PM_{2,5} viene analizzata dal 2011 in 4 siti, 3 fondi urbani (Bologna, Parma e Rimini) e un fondo rurale (S. Pietro Capofiume, BO), a cui si aggiungono i dati raccolti sul PM₁₀ di un fondo urbano di Bologna dal 2018, all'interno del progetto Life-PrepAIR. Le misure sul PM₁₀ di tale progetto, oltre che nel sito di Bologna, vengono

Andamento medio mensile delle concentrazioni osservate (blu) e previste (rosso) di EC nel sito urbano di Bologna. In grigio i valori minimo e massimo della serie storica analizzata - progetto Pulviris



eseguite anche in altri 4 siti del bacino padano: tre fondi urbani - Milano, Torino e Vicenza e un fondo rurale - Schivenoglia (MN).

Il confronto dei dati del 2020 rispetto agli anni precedenti (2016-2019 per il $PM_{2.5}$ e 2018-2019 per il PM_{10}) ha mostrato, durante il periodo di lockdown, una diminuzione del carbonio elementare (una media di circa -40%) e di altre specie legate ai trasporti come il rame (circa tra -50% e -60% come media del bacino padano). Tutte le componenti secondarie non mostrano sostanzialmente variazioni, mentre il levoglucosano, marker della combustione di biomassa, indica una crescita (tra +20% e +45%).

Estendendo l'analisi a tutto il 2020, il calo di concentrazione dei traccianti del traffico permane, per certe specie in modo comparabile a quanto calcolato per il periodo di lockdown (per EC tra -40% e -50%) e per altre in modo più contenuto (per il rame circa -30%). Al contrario non

si registra l'aumento del levoglucosano oltre la fine del primo lockdown.

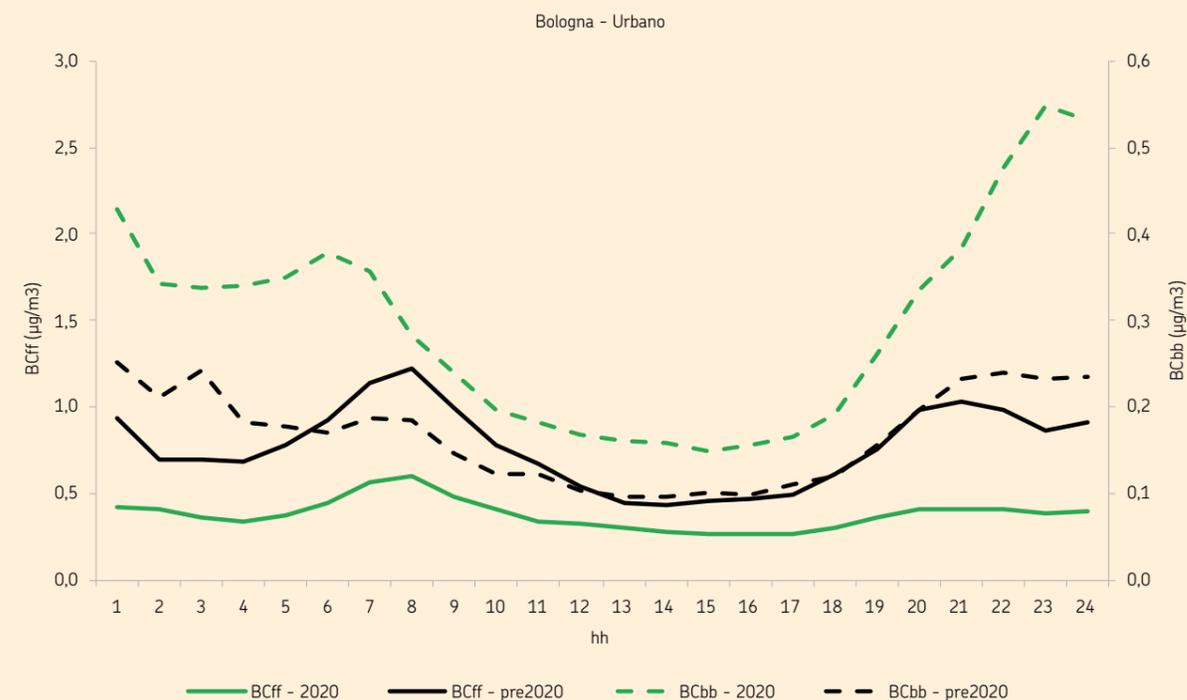
Le analisi volte a minimizzare l'effetto della meteorologia su questi parametri confermano il legame tra i provvedimenti presi per combattere il diffondersi della pandemia e le concentrazioni delle specie legate alla sorgente traffico come il carbonio elementare (-35/-45% nel $PM_{2.5}$ in un fondo urbano di Bologna) e il rame (fino a un -75% nel PM_{10} in un sito di traffico di Milano durante il lockdown).

Conclusioni

Gli eventi e le azioni innescati dalla pandemia da Covid19 hanno influenzato sia la concentrazione degli inquinanti atmosferici che la composizione del particolato.

In conseguenza alla drastica riduzione delle fonti emissive, soprattutto quelle legate ai trasporti, alcuni inquinanti come il biossido di azoto, hanno mostrato un

Andamento del giorno medio delle concentrazioni nel 2020 (linee verdi) e nei 2019 (linee nere) di BC nel sito urbano di Bologna. In tratteggiato il BCbb attribuibile alla combustione da legna, in continuo il BCff attribuibile al BC derivante dal "fossil fuel" - progetto Pulviris



calo importante e comparabile con la diminuzione delle sorgenti.

Altri parametri come il particolato atmosferico, al contrario, hanno mostrato concentrazioni di poco inferiori, in media, a quelle comunemente misurabili nello stesso periodo degli anni precedenti. Questo può essere imputabile sicuramente al grande peso che la frazione secondaria (cioè formata direttamente in atmosfera) ha sulla sua massa totale. Inoltre va anche considerato che alcune fonti emissive dei precursori del particolato secondario non sono state interessate da provvedimenti di contrasto alla pandemia: è il caso, ad esempio, dell'agricoltura.

Risulta evidente il calo della componente del particolato legato ai trasporti (ad es. EC) anche dopo la fine del lockdown della primavera 2020, probabilmente in seguito all'introduzione delle modalità di lavoro agili (smart working) e forse, nel primo periodo, anche a causa del permanere di alcune limitazioni alle attività

ludico-ricreative. Nel periodo del primo lockdown, la permanenza in casa delle persone ha portato ad un incremento delle sorgenti da riscaldamento domestico, confermato dall'aumento della concentrazione del marker della combustione di biomassa nella composizione chimica del PM, che potrebbe aver in parte compensato il calo del particolato generato dalla forte contrazione della sorgente traffico.

Il contributo opposto alla concentrazione dell'aerosol di queste due sorgenti da combustione è ben chiaro osservando la variazione del black carbon durante il lockdown rispetto allo stesso periodo del biennio precedente in un fondo urbano di Bologna (vedi figura soprastante). Questo parametro è possibile suddividerlo in una parte derivante da combustibili fossili (BCff), quindi dal traffico, e una da combustione di biomassa (BCbb): il BCff cala mentre il BCbb cresce. Altri inquinanti - la normativa di riferimento.

5

Esposizione e impatto sanitario sulla popolazione

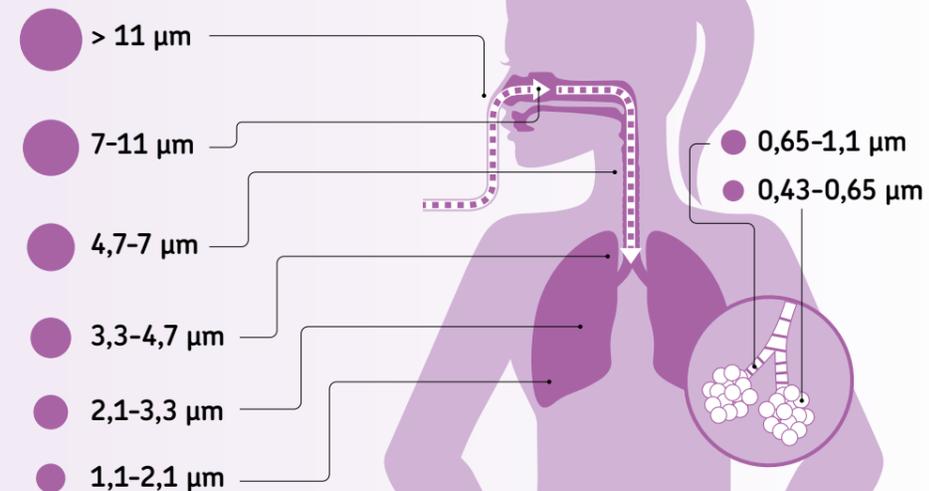


Pillole | "L'aria e l'uomo"

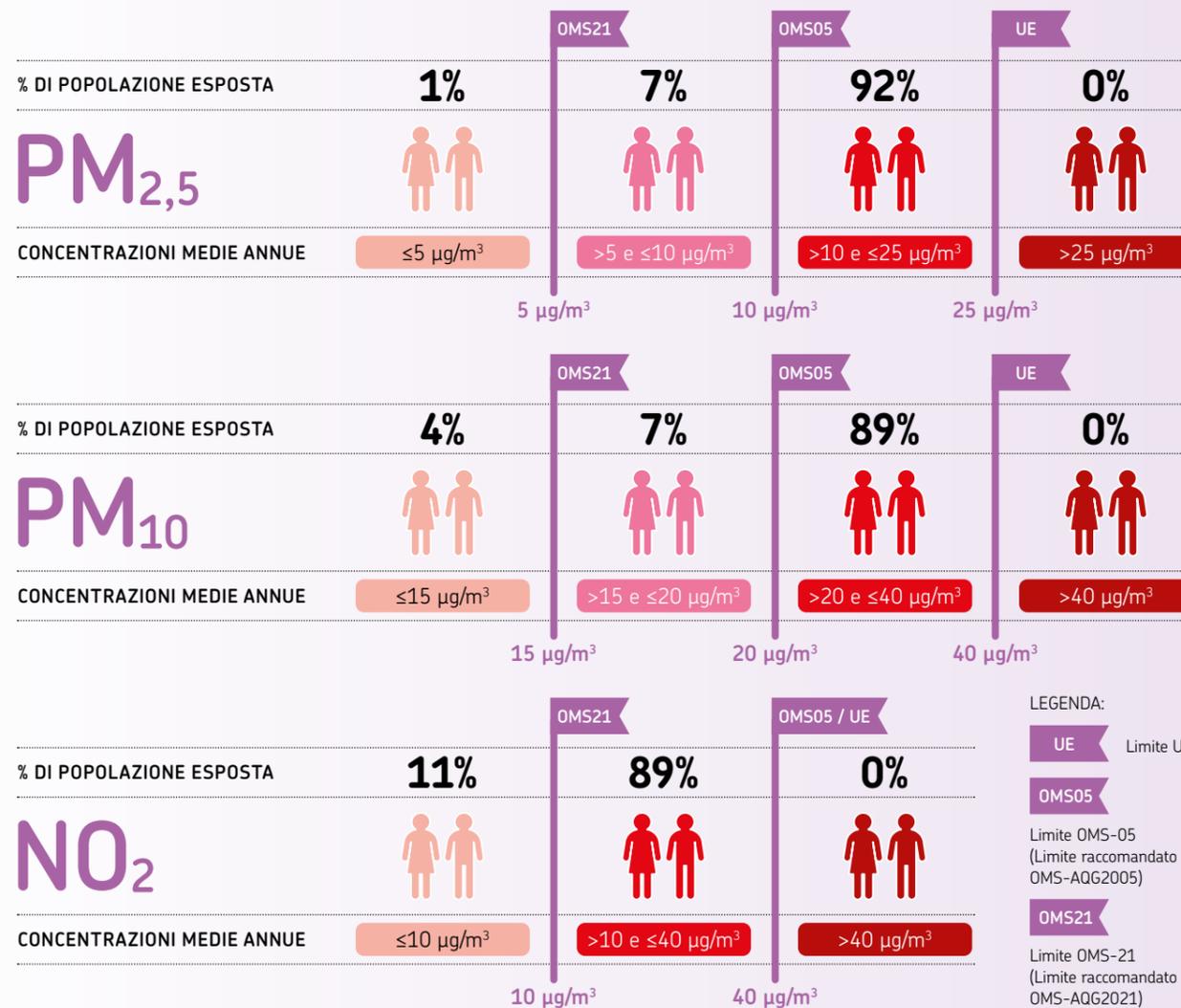
COSA RESPIRIAMO?

Penetrabilità del particolato nelle vie aeree

DIMENSIONE PARTICOLATO ATMOSFERICO



POPOLAZIONE ESPOSTA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA NEL 2022



LEGENDA:
 UE Limite UE
 OMS05 Limite OMS-05 (Limite raccomandato OMS-AQG2005)
 OMS21 Limite OMS-21 (Limite raccomandato OMS-AQG2021)

Relazione tra inquinamento atmosferico e salute umana

L'impatto globale delle patologie associate all'esposizione all'inquinamento atmosferico sulla salute umana in tutto il mondo è stimabile in milioni di morti e anni di vita in salute persi ogni anno. **Si stima che l'esposizione all'inquinamento atmosferico abbia un impatto equivalente a quello di altri importanti rischi per la salute globale come l'alimentazione scorretta e il tabagismo.**

Dagli anni 90 a oggi, si sono riscontrati notevoli miglioramenti della qualità dell'aria nei paesi ad alto reddito, mentre questa è generalmente peggiorata nella maggior parte dei paesi a basso e medio reddito, di pari passo con l'urbanizzazione e lo sviluppo economico su larga scala. Parallelamente, è cresciuta rapidamente la prevalenza globale delle malattie non trasmissibili (Non-Communicable Diseases, NCDs), per motivi riconducibili all'invecchiamento della popolazione e ai cambiamenti nello stile di vita, ponendo le NCDs come principali cause di morte e invalidità in tutto il mondo. Le NCDs comprendono una vasta gamma di patologie a carico del sistema cardiovascolare, neurologico, respiratorio e altri apparati.



Inquinamento atmosferico:
è un fattore di rischio per la salute umana paragonabile al fumo di tabacco



L'inquinamento atmosferico produce effetti sulla salute sia acuti, associati a picchi di esposizione nel breve periodo, sia cronici, associati a esposizioni che si cumulano nel corso della vita. Oltre agli effetti cancerogeni sul tumore del polmone (IARC 2015), l'inquinamento atmosferico rappresenta a livello globale la prima causa di «decessi anticipati» per malattie respiratorie croniche, la quarta per infezioni respiratorie, e la sesta per malattie cardiovascolari. Le linee guida OMS sulla qualità dell'aria del 2021, sulla base di valutazioni integrate delle evidenze epidemiologiche e tossicologiche, confermano una relazione causale tra esposizione al particolato fine $PM_{2.5}$ e mortalità per tutte le cause, per malattie respiratorie e cardiovascolari, sia nel breve che nel lungo termine. La mortalità e morbosità per cause respiratorie risulta legata anche agli effetti a breve termine di ozono, biossido di azoto e biossido di zolfo. Come riportato nella **figura 1**, la ricerca sugli effetti dell'inquinamento atmosferico sta evidenziando relazioni anche con altri apparati.

Nel caso dell'inquinamento atmosferico gli effetti sulla salute sono maggiori in sottogruppi di popolazione suscettibili, che includono anziani, persone con malattia cardiovascolare o respiratoria, bambini, donne in gravidanza, persone con disagio socio-economico, che spesso risiedono nelle zone più inquinate della città (si parla di environmental injustice). Come si vede dalla **figura 2**, l'impatto dell'inquinamento inizia già dalla gravidanza. I primi effetti possono emergere alla nascita e, successivamente, in età pediatrica. Il maggiore impatto si osserva in età adulta e negli anziani, con effetti sulla salute respiratoria, cardiovascolare, sul rischio di diabete, demenza e tumore polmonare.



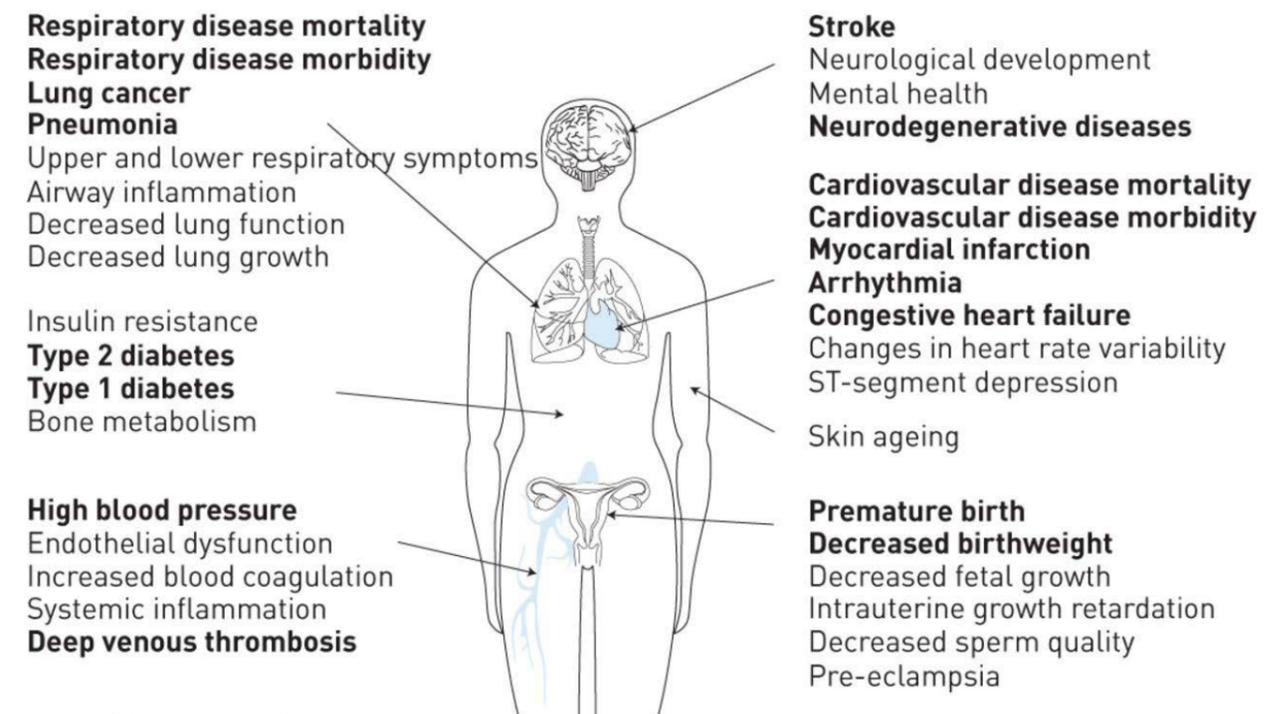
L'inquinamento atmosferico ha effetti sulla salute:
- acuti (picchi di esposizione)
- cronici (esposizione cumulativa)



L'impatto dell'inquinamento inizia già dalla gravidanza

FIGURA 1

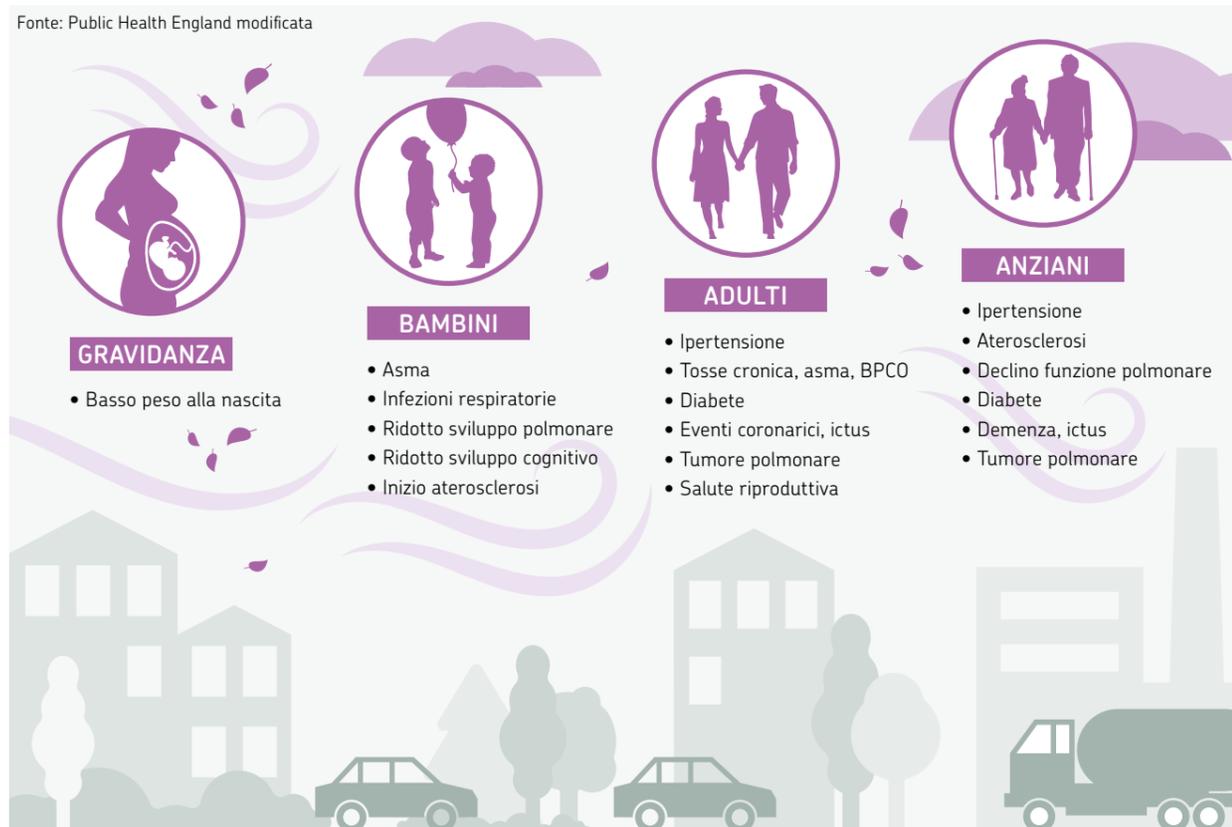
Riepilogo delle malattie, condizioni e biomarcatori influenzati dall'inquinamento dell'aria esterna



Fonte: ATS/ERS Statement – Dec 2016

FIGURA 2
Effetti dell'inquinamento nelle diverse fasi della vita

Fonte: Public Health England modificata



Al fine di tutelare la salute, sono definiti valori limite fissati dalla Direttiva europea attualmente in vigore anche in Italia, e valori guida OMS (AQG Air Quality Guidelines) **tabella 1**, più restrittivi sulla base degli studi su popolazioni esposte a livelli bassi di inquinamento, basati su una revisione sistematica delle evidenze epidemiologiche sugli effetti a basse dosi di inquinamento atmosferico. Rispetto alla precedente revisione delle linee guida OMS (2005), i valori AQG aggiornati sono inferiori a quelli raccomandati 15 anni fa. In base ai nuovi valori guida OMS il numero di persone esposte è ancora più elevato se si considerano i più rigorosi valori della qualità dell'aria dell'OMS fissati per la protezione della salute umana.

TABELLA 1
Livelli AQG raccomandati e obiettivi intermedi

INQUINANTE	TEMPO DI MEDIA	OBIETTIVO INTERMEDIO				LIVELLO AQG
		1	2	3	4	
PM _{2,5} µg/m ³	Annuale	35	25	15	10	5
	24 ore ^a	75	50	37,5	25	15
PM ₁₀ µg/m ³	Annuale	70	50	30	20	15
	24 ore ^a	150	100	75	50	45
O ₃ µg/m ³	Picco stagionale ^b	100	70	-	-	60
	8 ore ^a	160	120	-	-	100
NO ₂ µg/m ³	Annuale	40	30	20	-	10
	24 ore ^a	120	50	-	-	25
SO ₂ µg/m ³	24 ore ^a	125	50	-	-	40
CO ₂ µg/m ³	24 ore ^a	7	-	-	-	4

^a 99° percentile (ovvero 3-4 giorni di superamento all'anno)

^b Media della concentrazione media giornaliera massima su 8 ore di O₃ nei sei mesi consecutivi con la più alta concentrazione media mobile semestrale di O₃

L'OMS stima che circa 7 milioni di morti premature ogni anno siano attribuibili all'effetto congiunto dell'inquinamento dell'aria ambiente outdoor e indoor, con un carico sopportato soprattutto dai paesi a basso e medio reddito. In Italia si calcolano circa 50 mila morti ogni anno secondo la Agenzia europea per l'ambiente, con un costo economico rilevante (<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>). Secondo le ultime stime del Global Burden of Disease (GBD), in Italia circa 30 mila decessi prematuri sono attribuibili all'esposizione a inquinamento atmosferico, e di questi il 90% è dovuto al particolato e il rimanente all'ozono (altri inquinanti come l'NO₂ ancora non sono inclusi nelle stime GBD) (GBD 2019). Considerando i nuovi limiti guida OMS (5 µg/m³), il numero di decessi attribuibili ogni anno in Italia è ancora più elevato e solo il PM_{2,5} sarebbe responsabile di 50.856 decessi (8,3% della mortalità totale) (Rapporto ISTISAN 21/20).



Nel mondo 7 milioni di morti premature per anno: sono attribuibili all'inquinamento dell'aria (stima OMS)

Le vie di esposizione

L'apparato respiratorio è la prima via di ingresso del PM. **Dopo inalazione, le particelle di dimensioni maggiori vengono bloccate nelle vie respiratorie superiori o nei bronchi, mentre le particelle di diametro aerodinamico inferiore possono raggiungere gli alveoli ed essere sottoposte a fagocitosi da parte dei macrofagi alveolari (figura 3).** Il PM depositato negli alveoli può entrare direttamente nel sistema circolatorio attraverso la barriera costituita dall'epitelio alveolare e dall'endotelio capillare. Le particelle isolate dai macrofagi e assorbite nello strato di muco delle basse vie respiratorie possono essere retrotrasportate nell'orofaringe ed ingerite. L'apparato digerente può essere esposto anche direttamente mediante l'assunzione di acqua o cibo contaminati da PM. Una volta penetrato nel tratto gastrointestinale, il PM può influenzare la morfologia e la funzione dell'epitelio gastrointestinale così come la composizione del microbiota intestinale, determinando un impatto la cui importanza è emersa solo in tempi recenti.

Una volta arrivato a contatto con un epitelio, come ad esempio l'epitelio respiratorio, il PM può penetrare nelle cellule. La componente organica del PM, sia volatile che non volatile, può attivare il recettore arilico (AHR) presente nelle cellule bersaglio, inducendo la up-regolazione di geni per i citocromi P450 (CYP1A1, CYP1A2, CYP1B1, CYP2E1, CYP2F1), che metabolizzano la componente organica attivandola a metaboliti elettrofili reattivi. Dopo fagocitosi, il PM può indurre la secrezione da parte dei macrofagi di tumor necrosis factor- α (TNF- α), interleuchina-6 (IL-6) e interleuchina-8 (IL-8), che stimolano la risposta infiammatoria. I mediatori pro-infiammatori possono, a loro volta stimolare sia la produzione di ROS che l'attivazione di percorsi di segnalazione coinvolti in processi fisiopatologici, quali, tra gli altri, proliferazione, risposta immunitaria/infiammatoria, risposta allo stress ossidativo e morte cellulare programmata.

Lo schema concettuale Adverse Outcome Pathway (AOP), che descrive le relazioni tra evento iniziante, eventi chiave ed esito avverso, viene sempre più spesso applicato per la valutazione del rischio associato a contaminanti ambientali e a esposizione a sostanze chimiche, per facilitare lo sviluppo di strategie di gestione del rischio basate sulla conoscenza dei meccanismi tossicologici. L'evento iniziante a livello molecolare, attraverso una serie di eventi chiave a livello cellulare, tissutale e di organo, può condurre ad un esito finale a livello di individuo o di popolazione che dipende dalla concentrazione di esposizione e può spaziare dalla risposta adattativa fino all'effetto avverso. Nel caso del PM e di sue componenti, lo stress ossidativo indotto dalla formazione di ROS può condurre alla deregolazione dell'omeostasi cellulare dello ione calcio e citotossicità. **Il PM può inoltre, attivando pathway infiammazione-relate e inducendo la secrezione di citochine, causare infiammazione sistemica, che può portare a disfunzione d'organo, come ad esempio nel caso della fibrosi polmonare.**



Il PM:
entra nell'organismo attraverso
l'apparato respiratorio

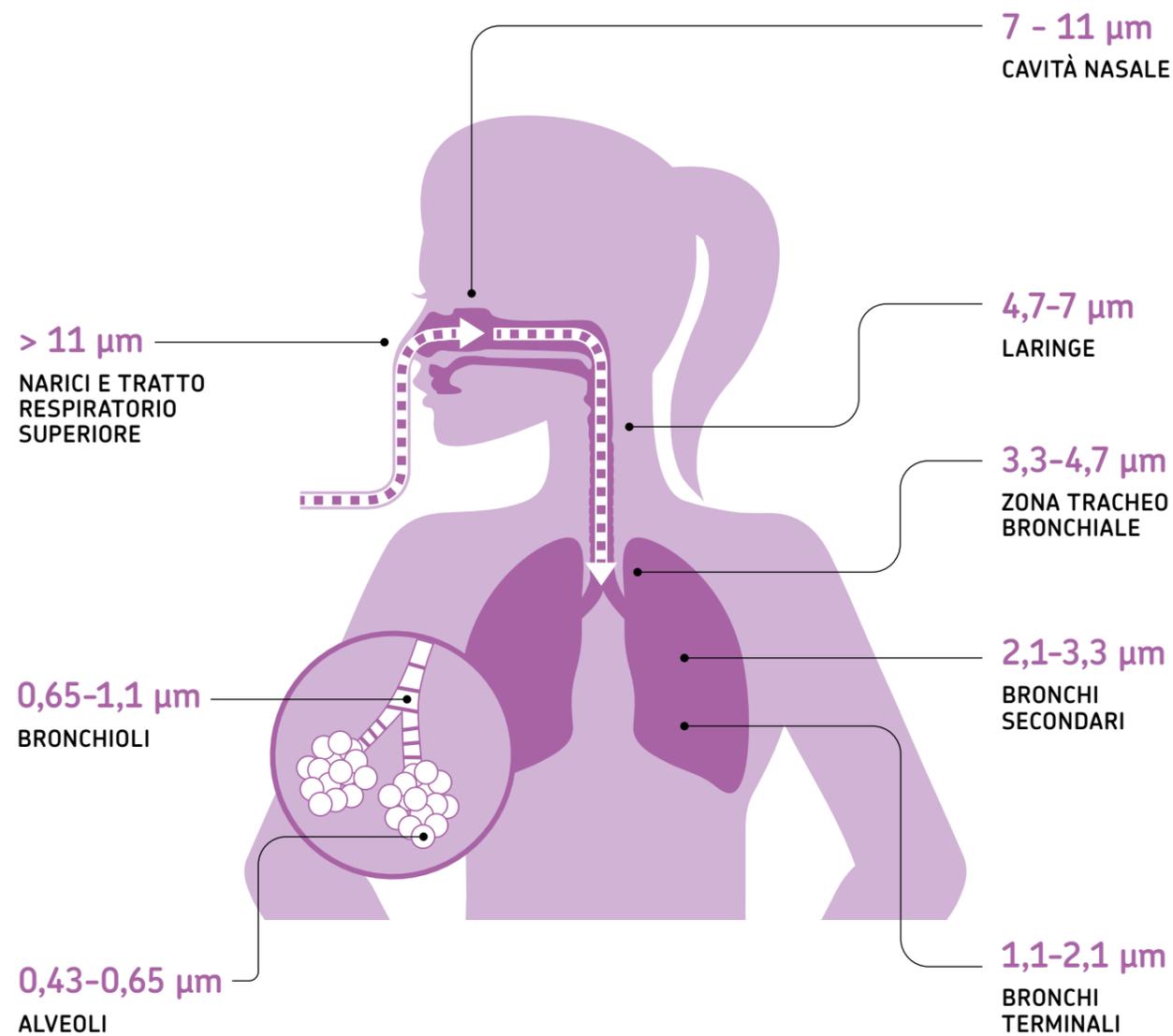


**Il PM arrivato a contatto
con un epitelio
può penetrare nelle cellule**



Il PM
può causare
infiammazione sistemica

FIGURA 3 Relazione tra penetrabilità nell'apparato respiratorio e diametro aerodinamico del particolato (adattata da Manisalidis et al, 2020)



Il ruolo della risposta infiammatoria e dello stress ossidativo

È ormai assodato che l'esposizione a inquinamento atmosferico può avere un impatto sulla salute umana, anche a livelli molto inferiori di quanto ritenuto fino ad alcuni anni fa. Nonostante la vasta pletora di studi e ricerche messe in campo a livello internazionale con lo scopo di acquisire le conoscenze a sostegno dei processi decisionali, nel caso dell'inquinamento atmosferico le basi meccanicistiche sottese alla relazione causale tra esposizione ed esito di salute non sono ancora state completamente esplorate e comprese. Gli studi recenti dimostrano che denominatore comune tra le condizioni patologiche, per cui è stato stabilito o ipotizzato un nesso causale con l'esposizione a inquinamento atmosferico, sembra essere il coinvolgimento di uno stato infiammatorio, che precede e sottende l'effetto avverso. Le specie reattive dell'ossigeno (ROS) e dell'azoto (RNS), a livelli fisiologici, svolgono un ruolo importante come regolatori e mediatori in normali processi biologici, quali la regolazione della trascrizione, la differenziazione e la proliferazione. La generazione non controllata di queste specie reattive porta ad una catena di reazioni che generano radicali liberi come sotto-prodotti e alla saturazione del sistema fisiologico di difesa. Il superamento della massima capacità adattativa cellulare porta alla perturbazione dell'equilibrio e, di conseguenza, ad uno stato di stress ossidativo, che è strettamente interrelato allo stabilirsi di un processo infiammatorio. La produzione di ROS/RNS che supera i



Già bassi livelli di esposizione all'inquinamento atmosferico possono avere effetti sulla salute

meccanismi fisiologici adattativi può indurre la produzione di mediatori dell'infiammazione che a loro volta possono stimolare la produzione di ROS/RNS in un circuito di feedback positivo che si autosostiene. L'infiammazione può essere, quindi, descritta sia come fattore causale che consequenziale in relazione allo stress ossidativo. Anche la citotossicità e l'infiammazione sono strettamente intercorrelate, in quanto la presenza di cellule morte scatena la risposta infiammatoria attraverso la produzione di molecole associate al danno, mentre l'infiammazione può a sua volta indurre la morte cellulare. L'instaurarsi di un microambiente infiammatorio può favorire le condizioni che predispongono all'insorgenza di patologia o all'aggravamento di condizioni patologiche preesistenti.

Sempre più evidenze supportano l'ipotesi che il PM o sue componenti possano attivare risposte infiammatorie a livello cellulare, molecolare e d'organo, con il coinvolgimento di *pathway* e processi biologici a base immunitaria/infiammatoria, a sostegno degli *adverse outcome* correlati all'esposizione. L'attività ossidante di NO_2 , ad esempio, può determinare, a livello tissutale, la formazione di specie ossidate che possono dare inizio al processo infiammatorio. NO_2 può interagire con il surfactante degli epitelii del tratto respiratorio inducendo una deplezione di anti-ossidanti che porta alla formazione di intermedi reattivi (ad es NO_2^-). Anche altri componenti del PM, come gli IPA, possono essere metabolizzati a intermedi reattivi che possono stimolare la produzione di ROS. Anche se l'esposizione a diverse componenti del PM può modulare vie di segnalazione differenti, spesso gli effetti convergono nel sostenere il microambiente infiammatorio. Ad esempio, l'esposizione a O_3 influenza l'espressione di geni per citochine infiammatorie, mentre NO_2 induce geni correlati allo stress ossidativo. Un esempio di come entrino in gioco questi meccanismi è riportato in uno studio pubblicato di recente che mira a decifrare i meccanismi alla base della cancerogenesi polmonare indotta da contaminanti ambientali e individuare possibili bersagli per la prevenzione dei tumori di origine ambientale. Partendo dalla considerazione che almeno una frazione dei tumori polmonari non associati al fumo di sigaretta sia di origine ambientale, lo studio ha analizzato evidenze epidemiologiche combinate a modelli funzionali pre-clinici e osservazioni su coorti di pazienti, dimostrando una correlazione positiva tra i livelli ambientali di $\text{PM}_{2.5}$ e l'incidenza di tumori polmonari sostenuti da mutazioni nel gene per Epidermal Growth Factor Receptor (EGFR), che sono i più frequenti nei pazienti non fumatori. L'analisi della sequenza dell'RNA di cellule di epitelio polmonare derivate da topi geneticamente modificati che esprimono EGFR mutato indica che il trattamento con PM determina l'attivazione di pathway infiammatori e di geni coinvolti nel reclutamento dei macrofagi, consistente con l'aumento dei macrofagi interstiziali polmonari e la secrezione di citochine come l'interleuchina-1 β (IL1 β) osservato in vivo. La somministrazione concomitante di anticorpi anti-IL1 β durante l'esposizione a PM è stata sufficiente a prevenire lo sviluppo di tumori indotti da PM. Nel complesso, queste evidenze supportano fortemente l'ipotesi che l'inquinamento atmosferico possa favorire la comparsa di tumori polmonari non solo attraverso l'induzione di mutazioni nel DNA, ma piuttosto mediante la creazione di un microambiente infiammatorio che stimola la proliferazione di cellule che portano mutazioni pregresse. È importante notare che questo meccanismo può applicarsi anche ad altri tipi di tumore associati ad esposizione ambientale.



Il PM atmosferico può attivare risposte infiammatorie che favoriscono l'insorgenza di patologie o l'aggravamento di patologie già presenti



I nostri studi

Per essere incisive, le politiche di riduzione dell'esposizione a inquinamento atmosferico e le azioni di mitigazione dell'impatto dell'esposizione sulla qualità e sull'aspettativa di vita della popolazione devono essere basate su solide conoscenze scientifiche, che conducono alla formulazione di linee guida. **Per questo motivo, anche la Regione Emilia Romagna, con il supporto tecnico scientifico di Arpae, ha promosso e sostenuto progetti che mirano ad ampliare e approfondire il quadro delle conoscenze sugli effetti del particolato atmosferico** e a mettere in luce meccanismi molecolari ed eventi chiave alla base relazione causale tra esposizione a particolato ed esiti di salute, **a sostegno delle valutazioni effettuate su scala regionale negli studi epidemiologici sugli effetti a breve e lungo termine dell'esposizione a inquinamento atmosferico.** Lo scopo ultimo di questa attività progettuale è fornire dati innovativi a supporto del processo decisionale per la prevenzione degli effetti avversi sulla salute della popolazione e, contestualmente, contribuire alla valutazione degli interventi di prevenzione già in atto nella Regione Emilia Romagna.

Il progetto triennale Monitor, monitoraggio degli inceneritori nel territorio dell'Emilia-Romagna, ha confrontato gli effetti tossicologici e gli esiti di salute associati a esposizione a $PM_{2.5}$ campionato in una stazione di fondo urbano con quelli indotti dal particolato prelevato nei punti di massimo o minimo impatto delle emissioni di un termovalorizzatore. **Il progetto Supersito**, realizzato da Regione Emilia-Romagna e Arpae, con la collaborazione del Cnr-Isac e di altre istituzioni nazionali ed internazionali, ha permesso di confermare ed estendere le osservazioni tossicologiche e sugli esiti di salute di Monitor, focalizzandosi su parametri che di norma non rientrano nelle attività della rete di monitoraggio dell'inquinamento atmosferico della regione Emilia-Romagna. Gli effetti tossicologici ed ecotossicologici, il rischio cancerogeno e le modulazioni trascrizionali in linee cellulari rappresentative di organi bersaglio (polmone, mammella), associabili al diverso diametro aerodinamico (PM_1 e $PM_{2.5}$) e alle diverse modalità di estrazione del PM sono stati indagati in vitro, con una particolare attenzione alla modulazione di *pathway* e processi associati all'infiammazione e allo stress ossidativo e alle modulazioni geniche correlabili a patologie e disordini della sfera riproduttiva. All'attività sperimentale è stata affiancata la valutazione del rischio cancerogeno condotta sul PM campionato in un sito urbano e un sito rurale, per la stima dell'eccesso di rischio associato all'inalazione di aria nei diversi periodi dell'anno e in diversi contesti. Entrambi i progetti hanno promosso un approccio innovativo, basato sull'uso integrato di saggi in vitro con *endpoint* diversificati, come

”

La Regione Emilia-Romagna ha promosso: progetti che studiano gli effetti del Materiale Particolato (PM)

”

Progetto Monitor: ha analizzato gli effetti sulla salute associati all'esposizione al $PM_{2.5}$ nei punti di massimo e minimo impatto di un inceneritore

”

Progetto Supersito: ha esteso e approfondito gli studi tossicologici e epidemiologici iniziati con il progetto Monitor



tossicità e trasformazione morfologica, e approcci “omici”, per implementare una valutazione tossicologica della qualità dell'aria, che andasse oltre all'applicazione dei test di mutagenesi, già da tempo in uso nella Rete regionale di monitoraggio della mutagenicità del particolato urbano dell'Emilia-Romagna. I risultati ottenuti hanno contribuito al fine dello sviluppo di strategie di mitigazione più mirate e dell'utilizzo efficace delle informazioni nell'ambito di processi decisionali.

All'interno dei due progetti sono state effettuate anche indagini epidemiologiche sulla popolazione esposta. Lo studio effettuato all'interno del progetto Monitor ha valutato lo stato di salute della popolazione residente entro 4 km dagli impianti, esaminando l'associazione tra emissioni dell'impianto e esiti di salute, identificando una associazione fra parti pretermine e esposizione agli inquinanti emessi dagli inceneritori. Questa relazione è stata confermata anche dal successivo progetto Supersito, assieme ad altri esiti indagati in associazione con il particolato atmosferico e le sue componenti.

Questi risultati sono alla base di approfondimenti in corso nell'ambito del **progetto regionale Aria e Salute, che mira a investigare gli aspetti epidemiologici e tossicologici delle relazioni fra inquinamento e salute**, con un focus particolare sulla relazione fra inquinamento e patologie Covid-correlate.

”

Progetto Aria e Salute: mira a investigare la relazione tra inquinamento atmosferico e salute nella Regione Emilia-Romagna

Esposizione al particolato, ozono e biossido d'azoto

Per il calcolo della popolazione esposta e dei livelli di esposizione, le informazioni sulla distribuzione della popolazione regionale a livello di sezione di censimento sono state incrociate con le stime per le concentrazioni di fondo (media annua e numero di giorni di superamento) ottenute combinando i dati rilevati dalle stazioni di monitoraggio di fondo urbano-suburbano e rurale con le simulazioni modellistiche.

L'approccio utilizzato per l'elaborazione dei dati di popolazione consiste nel calcolo della PWE (*Population Weighted Exposure*), ovvero la media dei valori di concentrazione che ricadono in ciascuna sezione, pesata per il numero di abitanti della sezione stessa.

L'assunzione alla base di questa valutazione è la distribuzione uniforme della popolazione all'interno di ciascuna sezione di censimento (dato aggiornato al censimento 2011). In base a questa assunzione, nel caso in cui l'area contenente il dato ambientale comprenda solo parzialmente la superficie territoriale di una sezione di censimento, la definizione della numerosità della popolazione esposta a quella concentrazione risulta essere la percentuale proporzionale alla parte di sezione che ricade in ciascun quadrato della maglia di lato 3 km del modello ambientale. Questa impostazione è stata utilizzata per le intersezioni fra i quadrati di concentrazione ambientale e le sezioni di censimento.



Calcolo della popolazione esposta: nasce dall'unione dei dati delle stazioni di monitoraggio e delle simulazioni modellistiche con la distribuzione della popolazione in regione

FIGURA 5
Mappa popolazione residente per zona censuaria (Comune di Piacenza, Censimento 2011)

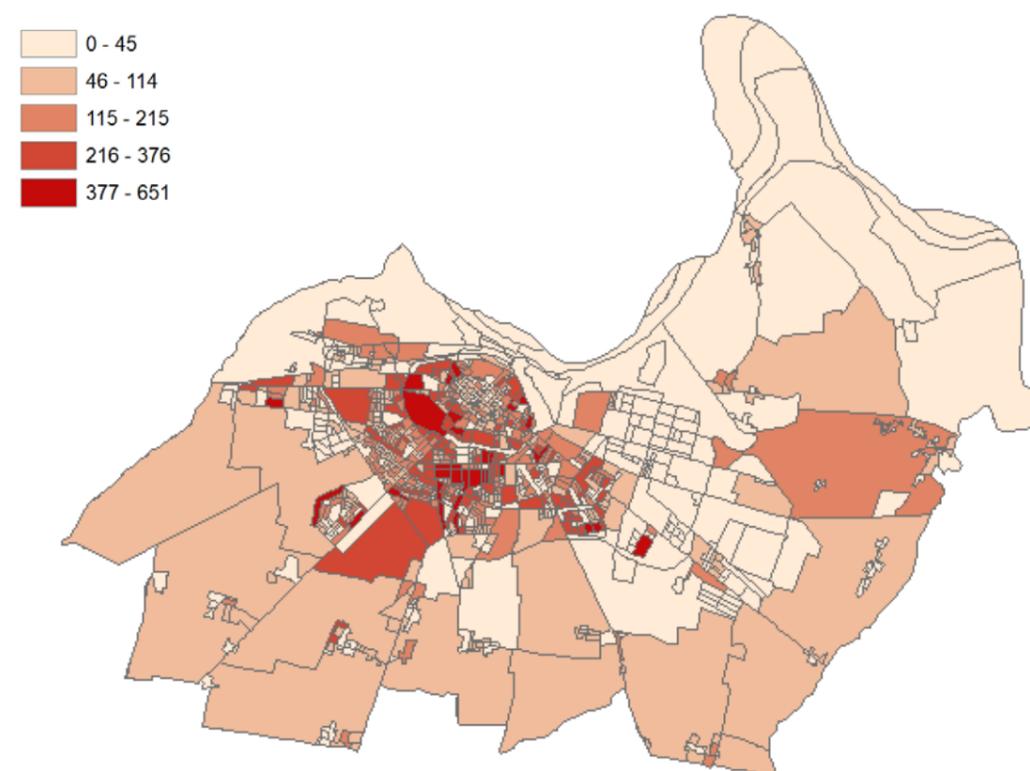
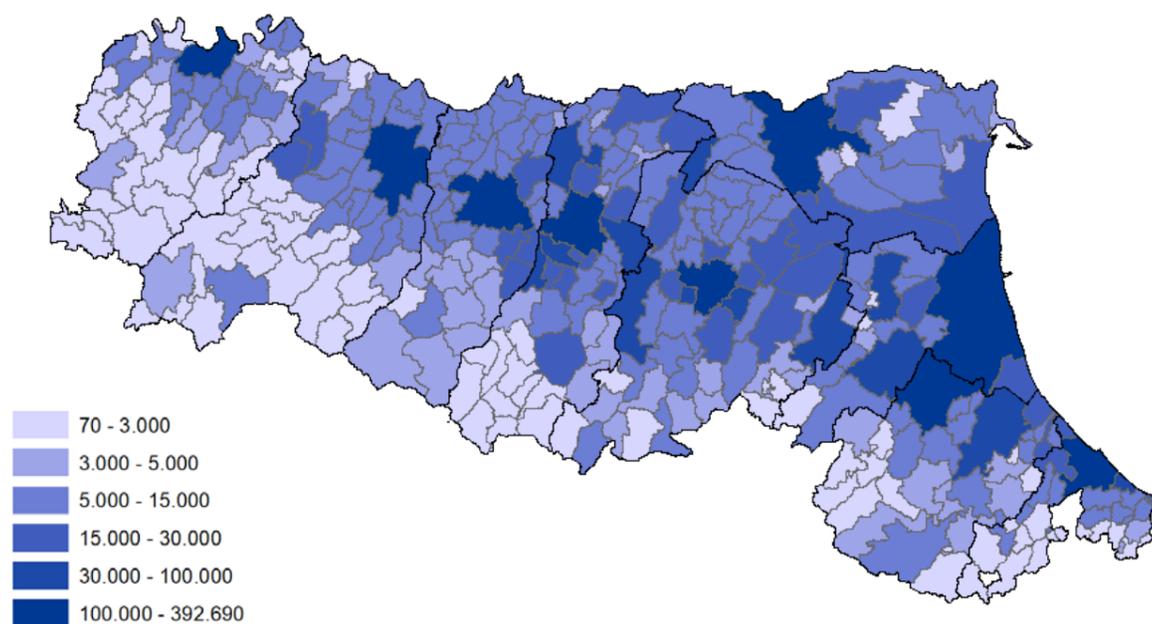


FIGURA 4
Mappa della popolazione comunale residente al 01/01/2022



Nei prossimi grafici sono riportati l'andamento nel periodo 2016-2022 della frazione, espressa in percentuale, di popolazione dell'Emilia-Romagna residente in aree:

- con valori di concentrazione media annua di fondo per il $PM_{2.5}$ minori di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, compresi tra $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- con valori di concentrazione media annua di fondo per il PM_{10} minori di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, compresi tra $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- dove la concentrazione media giornaliera di PM_{10} risulta superiore a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per più di 50 giorni all'anno, tra 36 e 50 giorni all'anno, tra 21 e 35 giorni all'anno, tra 11 e 20 giorni all'anno e meno di 10 giorni all'anno;
- con valori di concentrazione media annua di fondo per NO_2 minori di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, compresi tra $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tra $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- dove il massimo giornaliero della media mobile di 8 ore di ozono risulta superiore all'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana di $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per più di 75 giorni all'anno, tra 50 e 75 giorni all'anno, tra 25 e 50 giorni all'anno, tra 10 e 25 giorni all'anno e meno di 10 giorni all'anno.

FIGURA 6
 $PM_{2,5}$ - Popolazione esposta a diverse concentrazioni medie annuali (2016-2022)

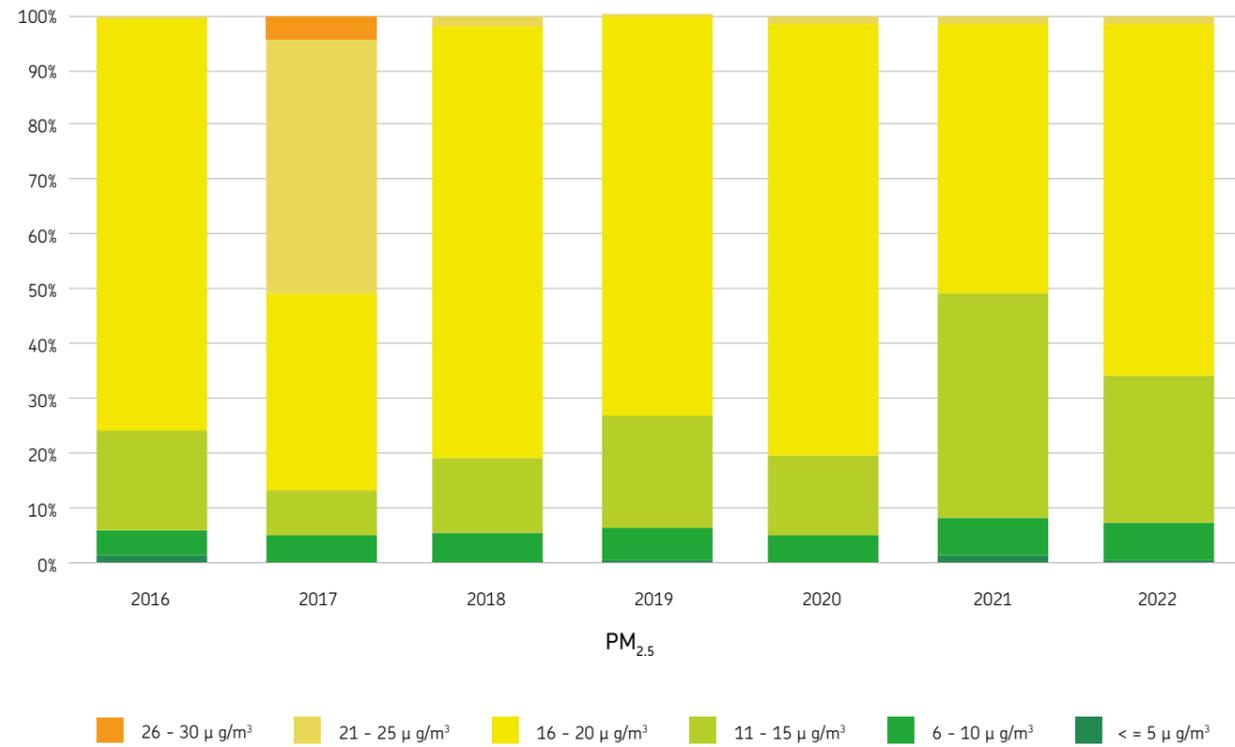


FIGURA 8
 PM_{10} - Popolazione esposta a superamenti del valore limite giornaliero (2016-2022)

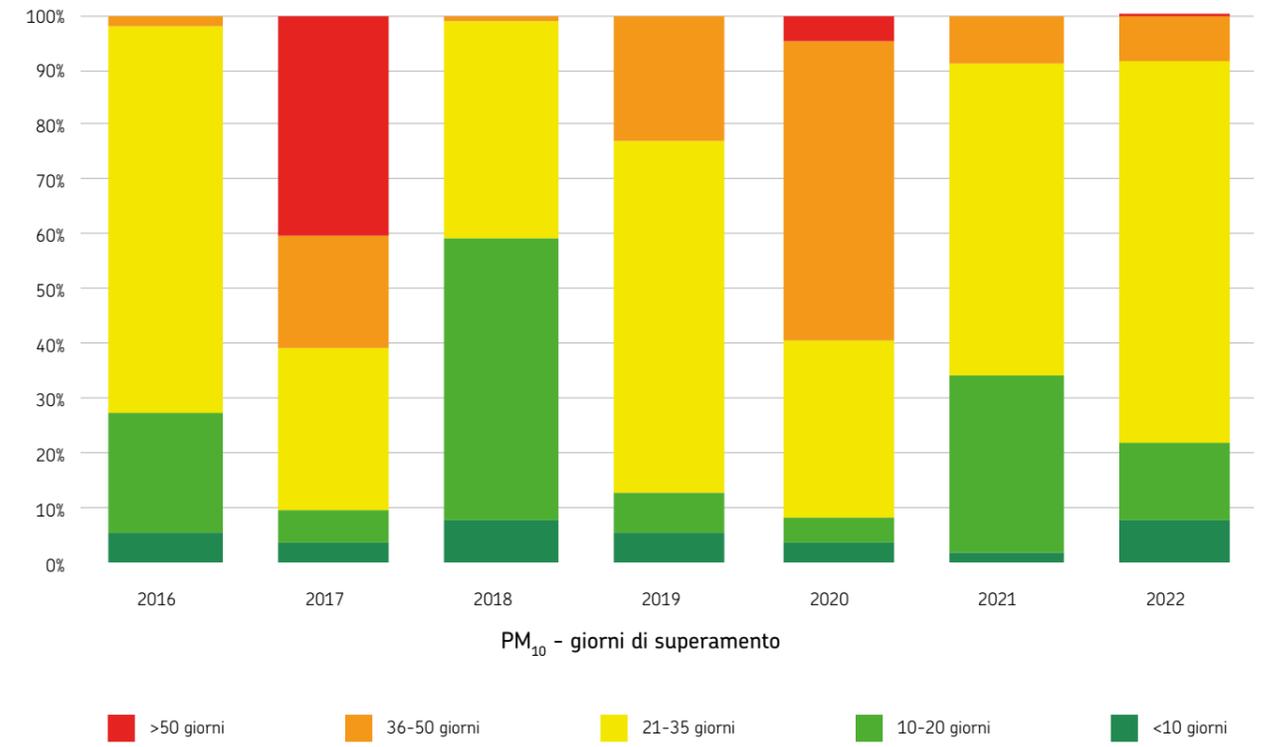


FIGURA 7
 PM_{10} - Popolazione esposta a diverse concentrazioni medie annuali (2016-2022)

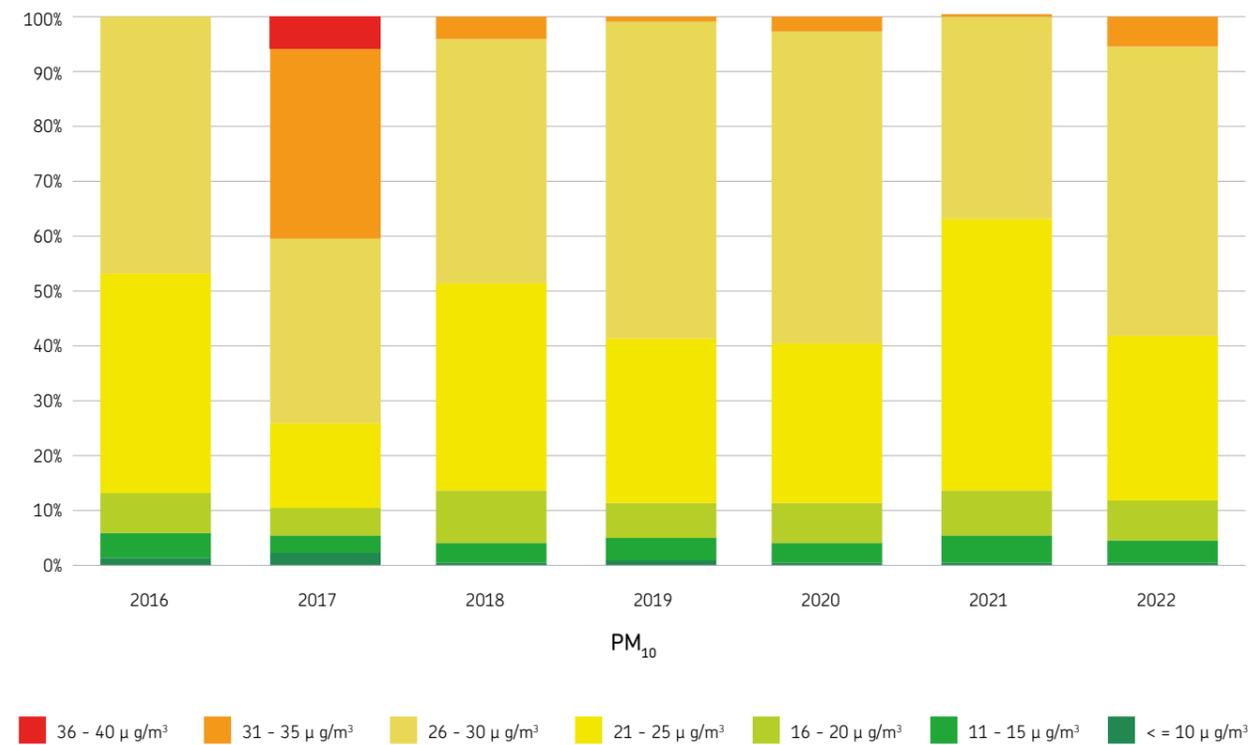
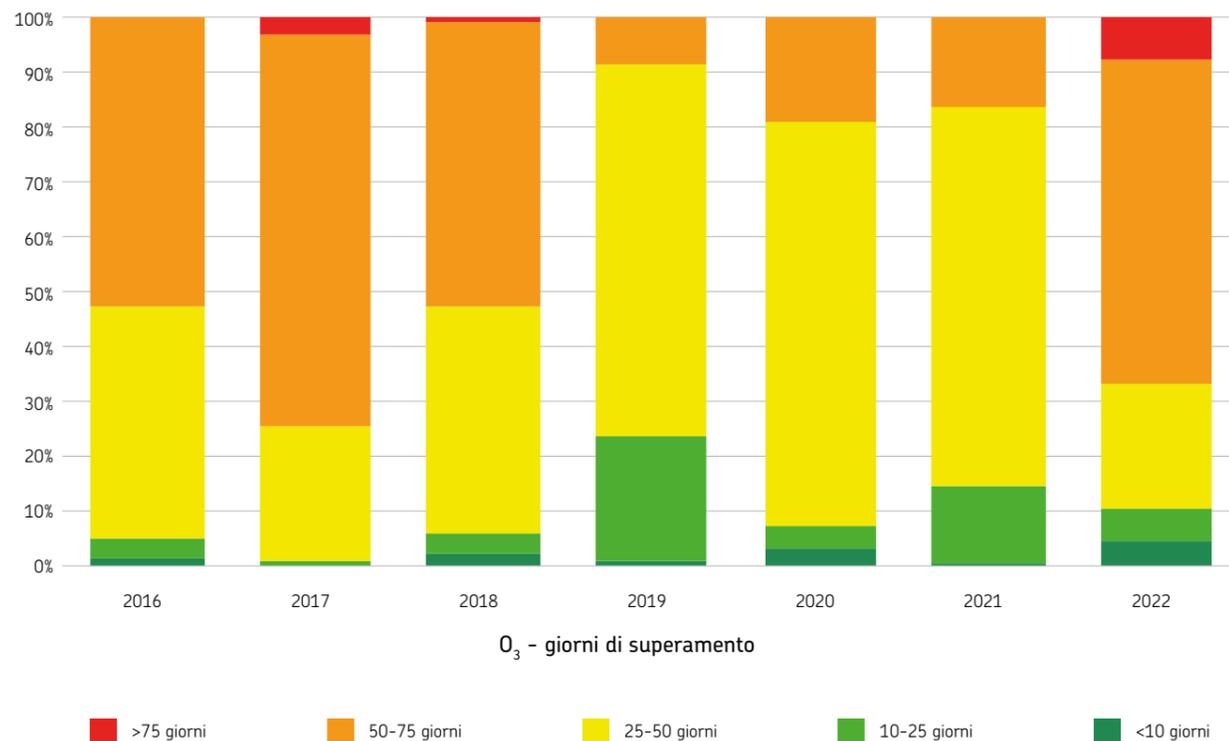


FIGURA 9
 NO_2 - Popolazione esposta a diverse concentrazioni medie annuali (2016-2022)



FIGURA 10
Popolazione esposta a superamenti dell'obiettivo a lungo termine (2016-2022)



La situazione appare abbastanza costante, con fluttuazioni annue legate all'andamento meteorologico. Un trend di miglioramento evidente riguarda l'esposizione media annua della popolazione agli ossidi di azoto (figura 9), dove si è arrivati ad avere più del 75% della popolazione esposta a livelli inferiori ai 20 µg/m³.

Impatti sulla salute

Le stime relative agli impatti sulla salute della popolazione regionale sono state ottenute calcolando il numero di decessi attribuibili ai livelli di inquinamento, considerando il valore di PWE relativo al 2022, superiori ai livelli consigliati dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) nell'aggiornamento delle linee guida sulla qualità dell'aria, dove sono stati ridotti ulteriormente i livelli di inquinamento suggeriti ai fini della protezione della salute umana. I metodi utilizzati per definire questi livelli soglia, riportati nelle linee-guida della qualità dell'aria, hanno seguito un rigoroso processo di revisione sistematica delle evidenze e meta-analisi delle stime quantitative degli effetti per l'aggiornamento di tali livelli. Sono stati coinvolti diversi gruppi di esperti e la revisione ha riguardato più di 500 documenti che sono stati classificati in base al contributo conoscitivo per stabilire i nuovi livelli guida. Questo processo ha permesso di aggiornare anche le funzioni concentrazione-risposta per i principali inquinanti, che quantificano l'aumento del rischio per incrementi dei livelli di esposizione agli inquinanti stessi.



L'impatto sulla salute: si stima calcolando il numero di decessi attribuibili a livelli di inquinamento superiori alle soglie indicate dall'OMS



TABELLA 2
Decessi attribuibili all'esposizione a lungo termine a PM_{2,5}, regione Emilia-Romagna (2022)

AREA	Popolazione 30+ (31/12/2019)	PWE (µg/m³)	Livello soglia AQG (2005): 10 µg/m³			Livello soglia AQG (2021): 5 µg/m³				
			AD	95% CI	AF (%)	AD	95% CI	AF (%)		
Mortalità per cause naturali										
Regione	3.269.176	15,8	2.170	1654	2.423	4,39	3.883	2.971	4.325	7,85
Capoluoghi	1.189.427	16,5	891	679	995	4,89	1.546	1.183	1.721	8,48
Mortalità per cause cardiovascolari										
Regione	3.269.176	15,8	1.000	831	1.244	2,02	1.780	1.485	2.202	3,60
Capoluoghi	1.189.427	16,5	409	340	509	2,24	705	588	872	3,87
Mortalità per cause respiratorie										
Regione	3.269.176	15,8	209	66	354	0,42	376	121	629	0,76
Capoluoghi	1.189.427	16,5	90	29	153	0,49	156	50	260	0,86

AQG = Linee-guida qualità dell'aria OMS
PWE = Population Weighted Exposure
AD = Decessi attribuibili
AF = Frazione attribuibile

TABELLA 3
Decessi attribuibili all'esposizione a lungo termine a PM₁₀, regione Emilia-Romagna (2022)

AREA	Popolazione 30+ (31/12/2019)	PWE (µg/m³)	Livello soglia AQG (2005): 20 µg/m³			Livello soglia AQG (2021): 15 µg/m³				
			AD	95% CI	AF (%)	AD	95% CI	AF (%)		
Mortalità per cause naturali										
Regione	3.269.176	25,6	1.110	839	1.637	2,24	1.970	1.494	2.895	3,99
Capoluoghi	1.189.427	26,7	468	354	691	2,57	813	616	1.194	4,46
Mortalità per cause cardiovascolari										
Regione	3.269.176	25,6	381	10	907	0,77	676	2	1.590	1,37
Capoluoghi	1.189.427	26,7	160	0	380	0,88	278	0	653	1,52
Mortalità per cause respiratorie										
Regione	3.269.176	25,6	242	127	364	0,49	428	227	635	0,87
Capoluoghi	1.189.427	26,7	107	56	160	0,59	184	98	273	1,01

AQG = Linee-guida qualità dell'aria OMS
PWE = Population Weighted Exposure
AD = Decessi attribuibili
AF = Frazione attribuibile

TABELLA 4
Decessi attribuibili all'esposizione a lungo termine a NO₂, regione Emilia-Romagna (2022)

AREA	Popolazione 30+ (31/12/2019)	PWE (µg/m³)	Livello soglia AQG (2005): 40 µg/m³			Livello soglia AQG (2021): 10 µg/m³				
			AD	95% CI	AF (%)	AD	95% CI	AF (%)		
Mortalità per cause naturali										
Regione	3.269.176	16,7	0	0	0	0	664	335	1.304	1,34
Capoluoghi	1.189.427	19,7	0	0	0	0	346	175	679	1,90
Mortalità per cause respiratorie										
Regione	3.269.176	16,7	0	0	0	0	80	27	131	0,16
Capoluoghi	1.189.427	19,7	0	0	0	0	43	15	70	0,24

AQG = Linee-guida qualità dell'aria OMS
PWE = Population Weighted Exposure
AD = Decessi attribuibili
AF = Frazione attribuibile

Per effettuare tale stima, in accordo con la metodologia Integrated Environmental Health Impact Assessment, è stata considerata la popolazione over-30 come popolazione target, desunta da ISTAT e riferita al 31/12/2019, mentre i tassi di mortalità causa-specifica sono riferiti al periodo 2013-2017.

Le stime degli impatti a lungo termine per PM_{2,5}, PM₁₀ e NO₂ sono riportati nelle *tabelle 2,3,4*, dove sono riportati i risultati per tutta la regione, con un focus sulle 9 città con più di 100.000 abitanti. I risultati sono espressi come numero di decessi attribuibili ed in termini percentuali come frazione attribuibile (ponendo pari a 100 il totale dei decessi per cause naturali).

Va ricordato che le stime relative ai diversi inquinanti non devono essere sommate per ottenere l'impatto complessivo dell'inquinamento, data l'alta correlazione tra gli inquinanti considerati che porterebbe ad una sovrastima dei casi attribuibili. L'inquinante solitamente considerato come "tracciante" dell'impatto dell'inquinamento atmosferico è il PM_{2,5}, per il quale sono maggiori le conoscenze di letteratura sugli effetti avversi.

I risultati confermano che l'inquinamento atmosferico, pur in diminuzione sul lungo periodo, resta il fattore di rischio ambientale con il maggiore impatto sulla salute umana. Il metodo utilizzato può rappresentare anche un utile strumento di sanità pubblica, per valutare l'efficacia di azioni di mitigazione dell'inquinamento atmosferico, in termini di miglioramento della salute della popolazione.

”
I risultati confermano: l'inquinamento atmosferico è il fattore di rischio ambientale con il maggiore impatto sulla salute umana

6

Piano aria integrato regionale



Che cosa stiamo facendo?

Il Piano Aria Integrato Regionale 2020 (PAIR 2020)

Dal 2002 la Regione promuove e attua iniziative per migliorare la qualità dell'aria, in principio attraverso Accordi di programma con Province e Comuni, a cui si è affiancata, circa dal 2007, una stagione di pianificazione su base provinciale. Successivamente, è stato tuttavia necessario ricondurre la pianificazione a una scala territoriale più ampia, quella regionale, per intervenire con maggiore efficacia sui complessi processi che portano al superamento dei valori limite di qualità dell'aria, mantenendo tuttavia il ruolo strategico svolto dagli Enti locali nell'attuazione delle misure.

Nel 2017, quindi, la Regione Emilia-Romagna, con deliberazione dell'Assemblea Legislativa n. 115/2017, ha approvato il primo Piano Aria Integrato Regionale (PAIR 2020), entrato in vigore il 21 aprile 2017, dando attuazione alla Direttiva europea 2008/50/CE sulla qualità dell'aria ambiente e al decreto di recepimento, il Dlgs n. 155/2010.

Il PAIR 2020 individuava **oltre 90 misure relative a tutti i settori emissivi e ripartite su sei ambiti di intervento**: la città, la pianificazione e l'utilizzo del territorio, i trasporti e la mobilità sostenibile delle persone e delle merci, l'energia, le attività produttive, l'agricoltura e gli acquisti verdi nelle P.A. (*Green Public Procurement*). A tali misure si sono accompagnati ulteriori interventi di contenimento delle emissioni per le aree di superamento dei valori limite di PM₁₀ e NO₂ e azioni di comunicazione ed educazione ambientale volte a informare e sensibilizzare i cittadini sui temi della qualità dell'aria e della sostenibilità ambientale.

Successivamente, a seguito della sottoscrizione del Nuovo Accordo di Bacino Padano 2017, la Regione ha recepito, con DGR n. 1412/2017¹, alcune misure aggiuntive in esso contenute, che hanno pertanto integrato le corrispondenti disposizioni del PAIR 2020. Come noto, il **Bacino Padano** è caratterizzato da un'alta densità abitativa e un'elevata industrializzazione; allo stesso tempo, le particolari caratteristiche meteo-climatiche e orografiche rendono **difficile la dispersione degli inquinanti nell'atmosfera**, portando a frequenti episodi acuti di inquinamento, nonché a concentrazioni di fondo rilevanti e su area vasta. La peculiarità del fenomeno descritto ha reso necessario attuare **azioni coordinate e congiunte da parte delle Regioni della valle del Po**, che dal 2005 hanno sottoscritto accordi per intervenire sulle principali fonti emissive responsabili del superamento dei valori limite di qualità dell'aria².

Per rafforzare il coordinamento di Bacino Padano, la Regione Emilia-Romagna, in qualità di capofila e unitamente alle altre Regioni del Bacino Padano aderenti all'Accordo 2013, sta attuando il **progetto LIFE integrato "PREPAIR"** (*Po Regions Engaged to Policies of AIR*), avviato nel 2017 con un budget di circa 17 milioni di euro, la cui conclusione è prevista nell'autunno 2024. Il progetto prevede la realizzazione di azioni coordinate volte al miglioramento della qualità dell'aria nel Bacino Padano relativamente ai settori maggiormente impattanti sulla qualità dell'aria (trasporti e mobilità sostenibile, combustione delle biomasse, energia, agricoltura) e di un sistema condiviso per la loro valutazione e monitoraggio.

¹ DGR 1412 del 25 settembre 2017 "Misure per il miglioramento della qualità dell'aria in attuazione del Piano Aria Integrato Regionale (PAIR 2020) e del Nuovo Accordo di Bacino Padano 2017"; Accordo 2017 sottoscritto da Ministero dell'Ambiente e dalle regioni Emilia-Romagna, Lombardia, Piemonte e Veneto
² Accordo fra le Regioni Emilia-Romagna, Veneto, Lombardia, Piemonte e Provincia autonoma di Trento, al fine di condividere le azioni da intraprendere per il risanamento della qualità dell'aria (2005). Nel 2007 l'Accordo è stato rinnovato, includendo tra i firmatari anche Friuli Venezia-Giulia, Valle D'Aosta,

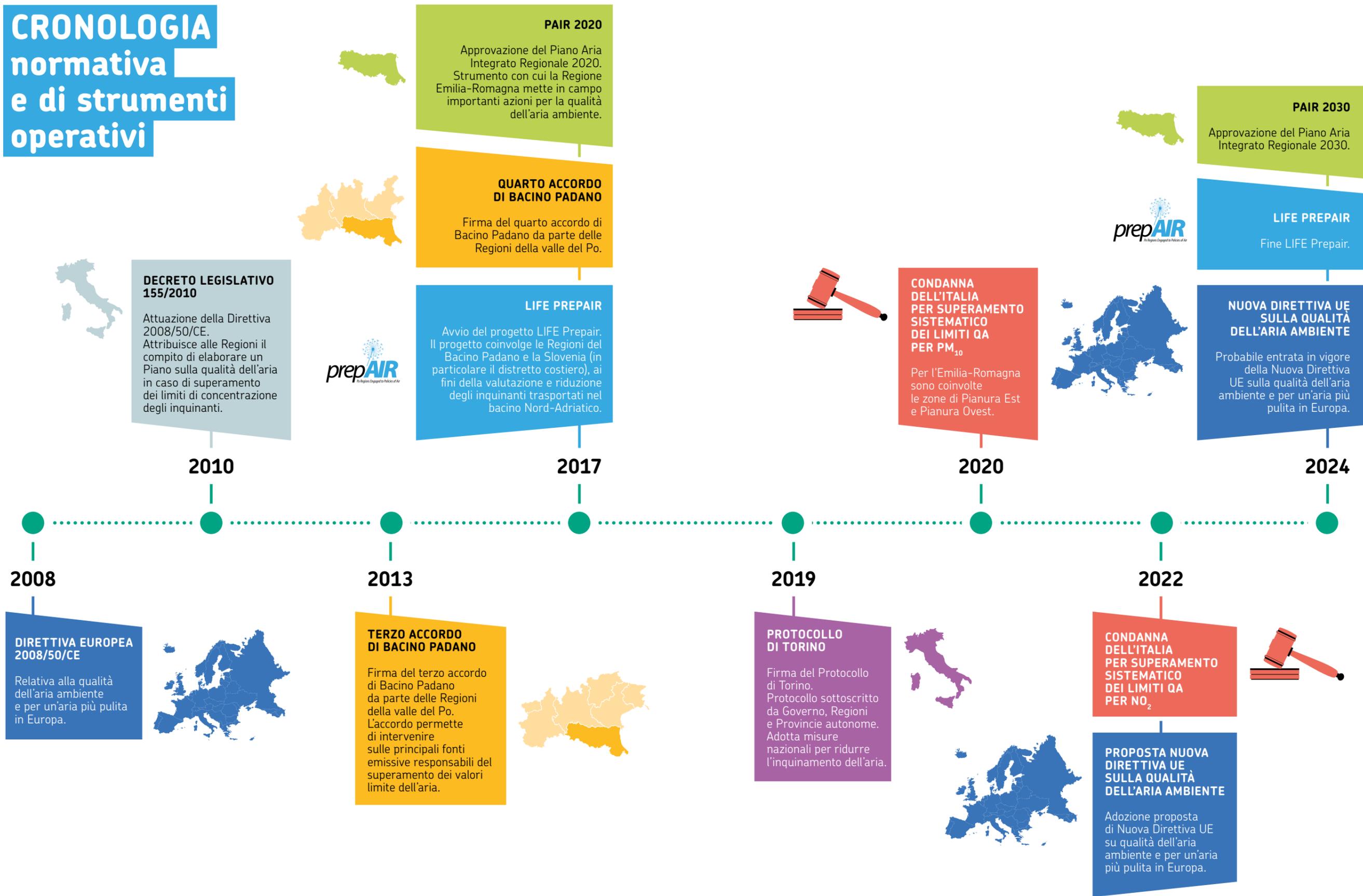
Provincia autonoma di Bolzano e la Repubblica e Cantone del Ticino.
"Accordo di programma per l'adozione coordinata e congiunta di misure di miglioramento della qualità dell'aria" - 2013 - fra Ministro dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare, dello Sviluppo Economico, delle infrastrutture e dei trasporti, delle politiche Agricole, alimentari e forestali, della Salute e i Presidenti delle regioni Emilia-Romagna, Lombardia, Piemonte, Veneto, delle regioni autonome Valle d'Aosta e Friuli-Venezia Giulia e delle province autonome di Trento e Bolzano

PAIR 2020

In vigore dal 21.04.2017, lo strumento che la regione Emilia-Romagna ha messo in campo per migliorare la qualità dell'aria



CRONOLOGIA normativa e di strumenti operativi



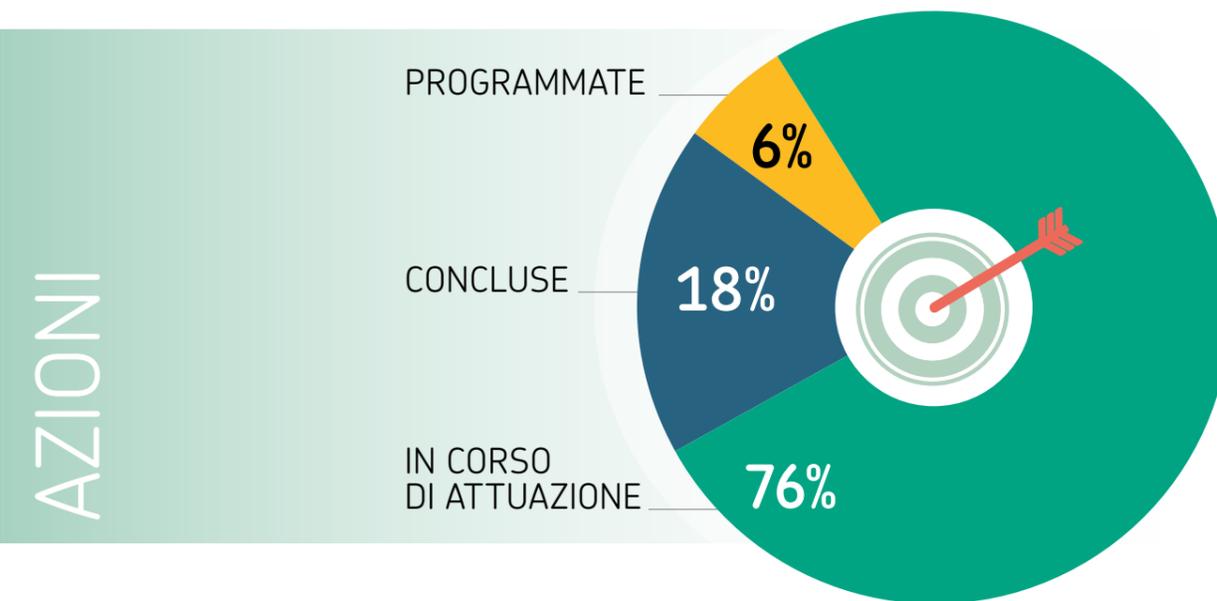
Monitoraggio PAIR 2020

Nel 2020 è stato effettuato un monitoraggio del PAIR, per verificare lo stato di avanzamento delle azioni e delle riduzioni emissive a esse associate. Il monitoraggio delle **97 misure** ha mostrato che, al 2020, risultavano **74 azioni in corso di attuazione (76%)**, **17 concluse (18%)** e **6 programmate (6%)**, dove per "concluse" si intendono misure di carattere normativo, che trovavano attuazione come prescrizioni di Piano, norme regionali o perché recepite con atti comunali; per "avviate" si intendono quelle che trovavano attuazione con continuità attraverso i finanziamenti disponibili, principalmente relativi al POR FESR e al PSR 2014-2020, oltre a quelli di livello nazionale afferenti ai diversi ministeri o di livello regionale legati alle programmazioni settoriali. Le misure "programmate" non erano ancora state attivate per mancanza di linee di finanziamento dedicate o perché previste o considerate più opportune in momenti successivi.

La maggioranza delle azioni, il 94%, al 2020 stava quindi dispiegando i suoi effetti. Nonostante questo, le stime di **riduzione emissiva** effettuate a quella data, rispetto agli obiettivi di riduzione posti dallo scenario di piano **al 2020**, indicavano che erano state raggiunte le seguenti riduzioni percentuali: per i **composti organici di circa il 70%**, per il **biossido di zolfo di circa l'80%**, per gli **ossidi di azoto e il particolato rispettivamente del 44% e 50%** e per l'**ammoniaca di circa il 10%**. Gli obiettivi non erano ancora stati pienamente raggiunti, anche perché numerose azioni e finanziamenti erano ancora in corso per tutti i settori. Per quanto riguarda il monitoraggio annuale dello stato di attuazione delle misure specifiche per l'ambito "Città" (30 Comuni più grandi e dell'agglomerato di Bologna), aggiornato al 2022, si nota una **sostanziale crescita di alcuni indicatori medi nel periodo 2017-2022**, confrontati con il dato 2014 di riferimento, anno di adozione del Piano.



MONITORAGGIO PAIR 2020



RISORSE

STANZIATI OLTRE
905
MILIONI DI EURO



RIDUZIONE % EMISSIONI

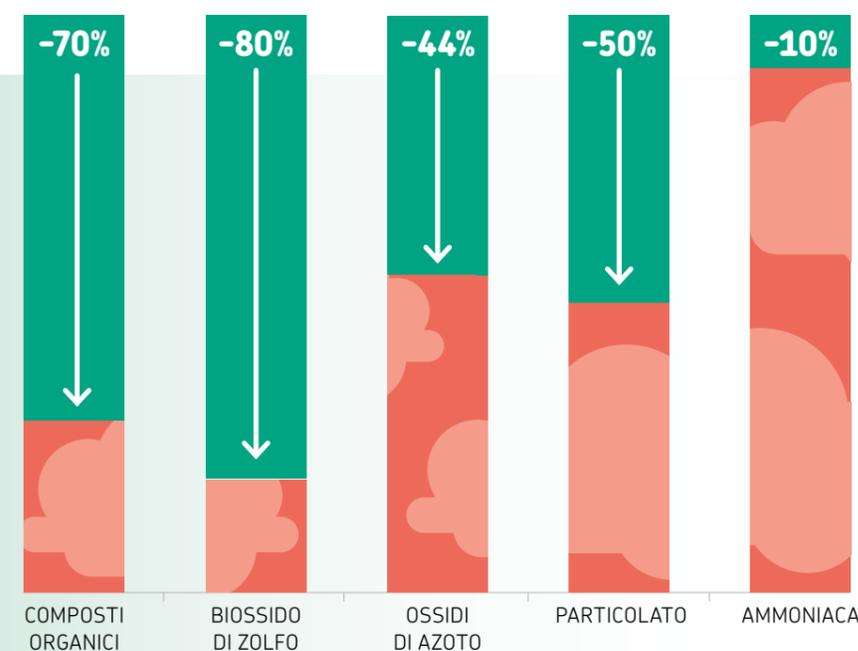


FIGURA 1
Metri di piste ciclabili per abitante, anni 2017-2022 (anno 2014 di riferimento)



FIGURA 3
Aree verdi (m²) disponibili per abitante, anni 2017-2022 (anno 2014 di riferimento)

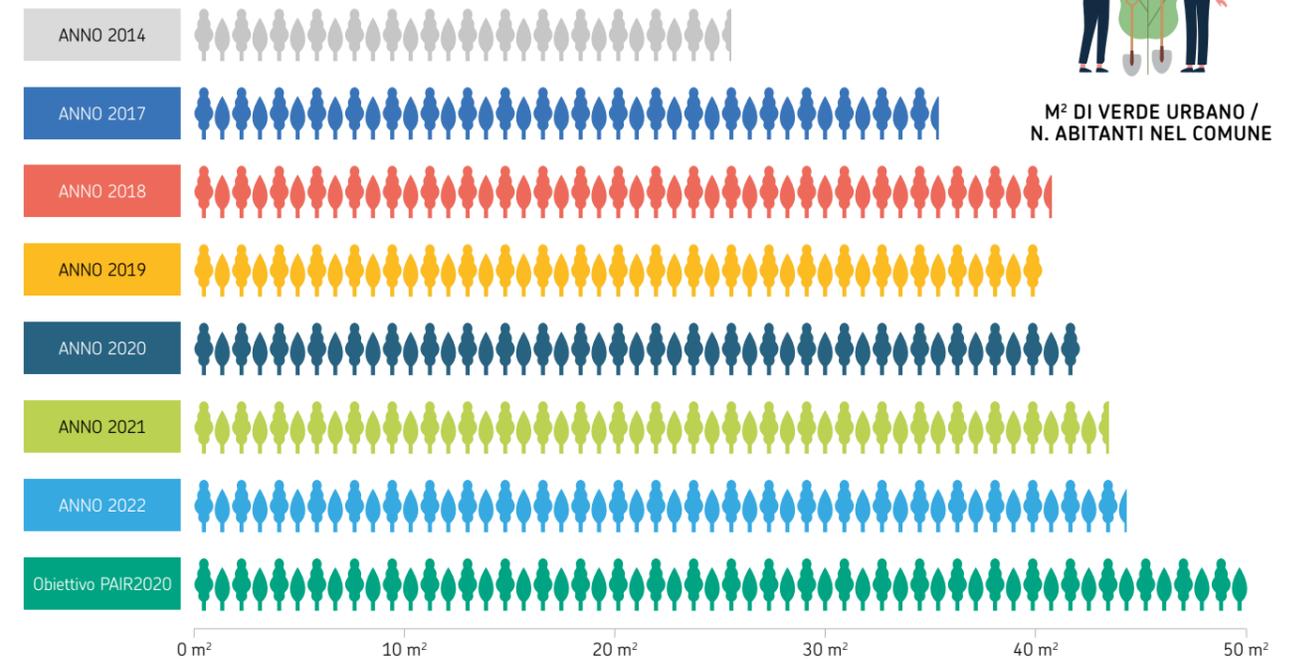
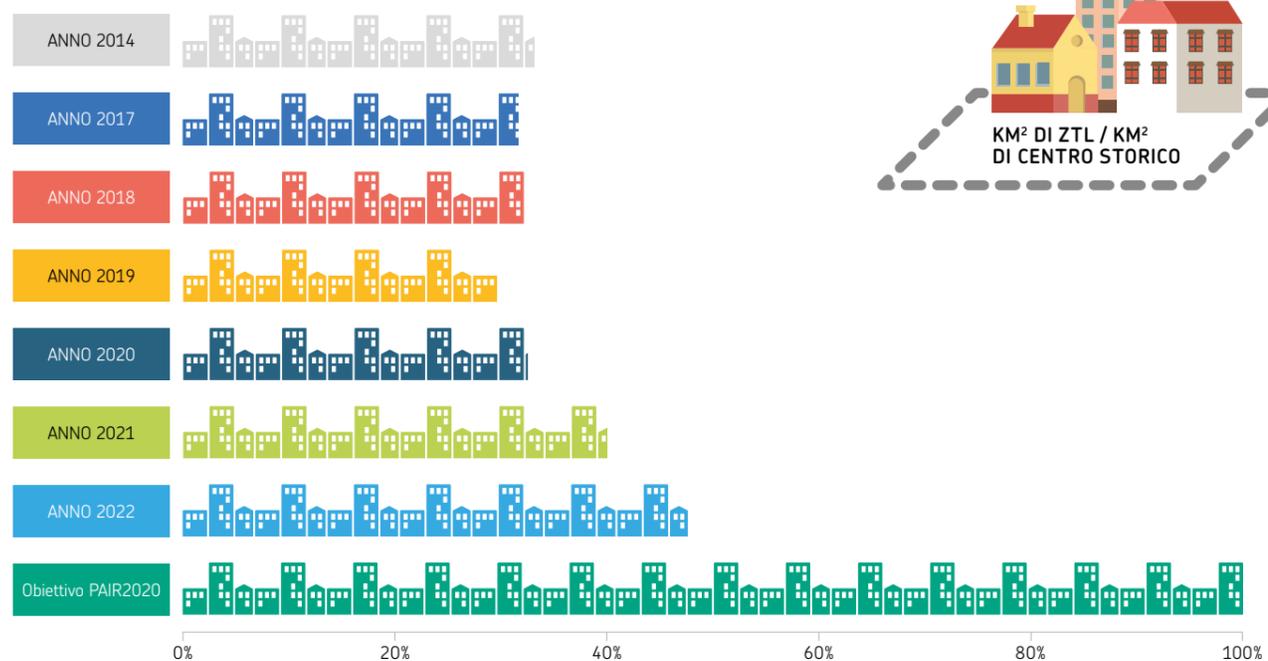


FIGURA 2
Ampliamento delle zone ZTL, anni 2017-2022 (anno 2014 di riferimento)

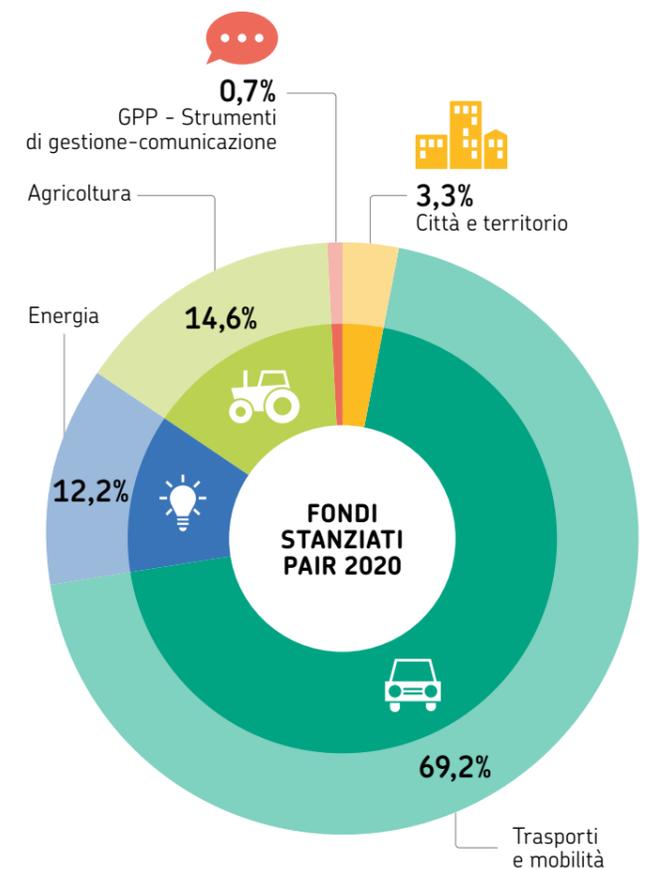


Ad esempio, il valore relativo alle piste ciclabili per abitante è aumentato nel corso del tempo, avvicinandosi agli obiettivi posti dal PAIR 2020, anche per merito degli specifici finanziamenti stanziati per la mobilità ciclopedonale (figura 1). L'ampliamento delle zone ZTL risulta leggermente aumentato dal 2014 (figura 2), mentre si osserva un considerevole aumento delle superfici di aree verdi per abitante, con valori non distanti da quelli posti come obiettivo di piano (figura 3).

Si evidenziano alcuni limiti del monitoraggio rappresentato, dovuti innanzitutto al fatto che il dato di riferimento al 2014 è relativo ai soli Comuni capoluogo, mentre il monitoraggio successivo è stato condotto sui 30 Comuni "PAIR". Inoltre, non sempre tutti i Comuni hanno fornito il dato per le diverse annualità, pertanto, il campione di riferimento ha subito fluttuazioni di anno in anno, limitando la rappresentatività del dato medio.

Le risorse stanziare per l'attuazione del PAIR, al 2020, ammontavano a oltre 905 milioni di euro. Nella figura 4 sono indicate le ripartizioni dei fondi stanziati nel periodo 2014-2020, suddivise per ambito di intervento. La presente ricognizione non considera la quota di 750.000.000 di euro relativa alla gara della Regione Emilia-Romagna per il vigente contratto di servizio per il trasporto pubblico ferroviario regionale, che porterebbe a un totale di 1.650.000.000 di euro stanziati.

FIGURA 4
Percentuale di ripartizione dei fondi stanziati per l'attuazione delle misure di Piano, suddivisi per ambito di intervento



Misure straordinarie PAIR 2020

In seguito alla sentenza di condanna del 10 novembre 2020 della Corte di giustizia dell'Unione europea per il superamento del valore limite giornaliero di PM₁₀ nelle zone Pianura Est e Pianura Ovest, la Regione Emilia-Romagna, in coordinamento con le altre regioni del Bacino Padano coinvolte nella sentenza, con le Deliberazioni di Giunta Regionale n. 33 del 13/01/2021, n. 189 del 15/2/2021 e n. 2130 del 13 dicembre 2021, ha approvato alcune **misure straordinarie per la tutela della qualità dell'aria** al fine di accelerare il rientro nei valori limite di PM₁₀ e adempiere nel più breve tempo possibile alla sentenza.

Le deliberazioni hanno introdotto alcune misure aggiuntive per i 30 Comuni principali oltreché l'estensione di diverse prescrizioni a tutto il territorio di pianura, includendo pertanto le zone di Pianura Est e Pianura Ovest, coinvolte nella sentenza di condanna, nella loro interezza.

In particolare, le **misure straordinarie** hanno previsto **limitazioni progressive alla circolazione** dei veicoli più inquinanti, **divieti di abbruciamento** dei residui vegetali, **prescrizioni per gli spandimenti dei reflui zootecnici**, **divieti di utilizzo di impianti a biomassa per riscaldamento domestico inquinanti**, **riduzione dei consumi energetici negli edifici**, l'introduzione di un **meccanismo preventivo di attivazione delle misure emergenziali** in modo da evitare l'occorrenza dei superamenti del valore limite giornaliero di PM₁₀ e il prolungamento fino al 30 aprile del periodo di attuazione delle misure strutturali ed emergenziali per la qualità dell'aria.

Con le medesime deliberazioni è stato avviato un programma di finanziamenti volto a supportare l'attuazione delle misure straordinarie, sia attraverso fondi regionali che fondi ministeriali, specificatamente dedicati alla qualità dell'aria nelle Regioni del Bacino Padano³.

Nella **tabella 1** si riportano i bandi attivati e le risorse stanziati dal 2021 a oggi.



³ Decreto Direttoriale 18 dicembre 2020 n. 412 istitutivo di un programma di finanziamento per il miglioramento della qualità dell'aria nel territorio delle Regioni del Bacino Padano – Fondo previsto dal D.L. 14 agosto 2020, n. 104,

recante "Misure urgenti per il sostegno e il rilancio dell'economia", convertito con modificazioni dalla L. 13 ottobre 2020, n. 126

TABELLA 1
Principali risorse e bandi dal 2021 a oggi

DESCRIZIONE BANDO	DENARO STANZIATO	STATO AVANZAMENTO
 Bando per la concessione di contributi ai Comuni di Pianura per interventi di forestazione urbana relativo al 2021 (DGR n. 645 del 3 maggio 2021; 207 Comuni interessati)	€ 1.625.000	
 Bando 2022 per la concessione di contributi ai Comuni di Pianura per la realizzazione di interventi di forestazione urbana (DGR n. 297 del 7 marzo 2022; 207 Comuni interessati)	€ 625.000	
 Bando per la distribuzione gratuita di piante forestali : estensione alle annualità 2022 e 2023 (DGR n. 817 del 31 maggio 2021)	€ 4.369.419,50	
 Bando per il co-finanziamento alle imprese relativamente alla realizzazione di interventi di forestazione urbana in pianura (DGR n. 1328 del 01/08/2022)	€ 500.000	
 Bando per la sostituzione degli impianti inquinanti per riscaldamento civile destinato a cittadini residenti nei Comuni delle zone di Pianura – IT0892 Pianura Ovest, IT0893 Pianura Est e IT0890 Agglomerato (DGR n.1333 del 24 agosto 2021; 207 Comuni interessati)	€ 11.500.000 € 11.491.218,71 totale euro liquidati	 2.363 stufe sostituite
 Progetto "Bike to work 2021" . Promozione di iniziative per la mobilità sostenibile con ulteriore impulso alla mobilità ciclistica nei 13 Comuni della Regione aventi popolazione uguale o superiore a 50000 abitanti delle zone territoriali interessate al superamento dei valori limite di qualità dell'aria e specificatamente del numero annuale di superamento del limite giornaliero di PM ₁₀ (DGR n.1332 del 24 agosto 2021; 13 Comuni interessati)	€ 9.778.000	
 Promozione di iniziative per la mobilità sostenibile con ulteriore impulso alla mobilità ciclistica nei Comuni con popolazione inferiore a 50000 abitanti delle zone territoriali interessate al superamento dei valori limite di qualità dell'aria e specificatamente del numero annuale di superamento del limite giornaliero di PM ₁₀ (DGR n. 1291 del 2 agosto 2021; 194 Comuni interessati)	€ 10.022.000	
 Piano d'azione ambientale per lo sviluppo sostenibile Bando per la concessione di contributi a favore di Comuni o loro Unioni per la sostituzione di veicoli obsoleti con veicoli a minor impatto ambientale – Anno 2021 (DGR n. 1289 del 2 agosto 2021; 185 Comuni interessati)	€ 4.500.000 € 3.968.098,60 contributi concessi	 179 veicoli finanziati
 Bando per la concessione di contributi a favore di Comuni o loro Unioni per la sostituzione di veicoli obsoleti con veicoli a minor impatto ambientale - Anno 2022 (DGR n. 1268 del 25 luglio 2022)	€ 1.000.000 € 981.477,04 contributi concessi	 31 veicoli finanziati
 Misure di incentivazione all'utilizzo del trasporto pubblico urbano nelle domeniche ecologiche	€ 250.000	
 Bando Reg. (UE) n. 1305/2013 - PSR 2014/2020 - Misura 4 - tipo operazione 4.1.04 "Investimenti per la riduzione di gas serra e ammoniaci " (DGR n. 2283 del 27 dicembre 2021)	€ 29.320.077,64	
 Bando per l'erogazione di incentivi ai cittadini per l' acquisto di biciclette a pedalata assistita anche a seguito di rottamazione di autovetture – anni 2023-2025 - DGR 1411/2023	€ 8.850.000	
 Bando per la promozione della mobilità ciclabile per i comuni sotto i 30.000 abitanti - annualità 2024 - DGR 1444/2023	€ 10.000.000	
 PR FESR 2021-2027 - azione 2.8.1: bando per favorire la realizzazione di piste ciclabili e progetti di mobilità dolce e ciclopedonale per Comuni, province, città metropolitana, Unione dei comuni - DGR 658/2023	€ 17.000.000	
 PR FESR 2021-2027 - azione 2.8.3: bando per potenziamento delle infrastrutture di ricarica nelle pubbliche amministrazioni - DGR 659/2023	€ 4.000.000	
TOTALE STANZIATO	€ 113.339.497,14	

LEGENDA:  Stato di avanzamento: IN CORSO  Stato di avanzamento: CONCLUSO

Le strategie future

Il nuovo Piano Aria Integrato Regionale (PAIR 2030)

Nel corso del 2023 la Regione ha adottato la **proposta di nuovo Piano Aria Integrato Regionale (PAIR 2030)** per l'approvazione finale in **Assemblea legislativa**, con Delibera di giunta regionale n. 2005 del 20/11/2023, confermando la scelta fatta nel 2021 di estendere l'ambito di intervento a tutti i Comuni di pianura appartenenti alle zone "Pianura Est", "Pianura Ovest" e "Agglomerato" di Bologna e l'approccio di forte integrazione con le politiche settoriali e le strategie per lo sviluppo sostenibile e il contrasto al cambiamento climatico, in continuità con il Piano precedente.

Sulla base dell'esperienza maturata nell'ultimo decennio, la strategia del PAIR 2030 interviene su una pluralità di aspetti **al fine di rientrare nei valori limite di qualità dell'aria nel più breve tempo possibile:**

- **Ridurre le emissioni** sia di inquinanti primari sia di precursori degli inquinanti secondari (PM₁₀, PM_{2,5}, NO_x, SO₂, NH₃, COV);
- Agire **simultaneamente sui principali settori emissivi** - combustione di biomasse (PM₁₀), agricoltura (NH₃) trasporti (NO_x);
- Agire sia **su scala locale** che **su scala spaziale estesa di Bacino Padano** con intervento dei Ministeri sulle fonti di competenza nazionale;
- **Prevenire gli episodi di inquinamento acuto** al fine di ridurre i picchi locali.



PAIR 2030



RISORSE



2022-2025

63,7
MILIONI DI EURO

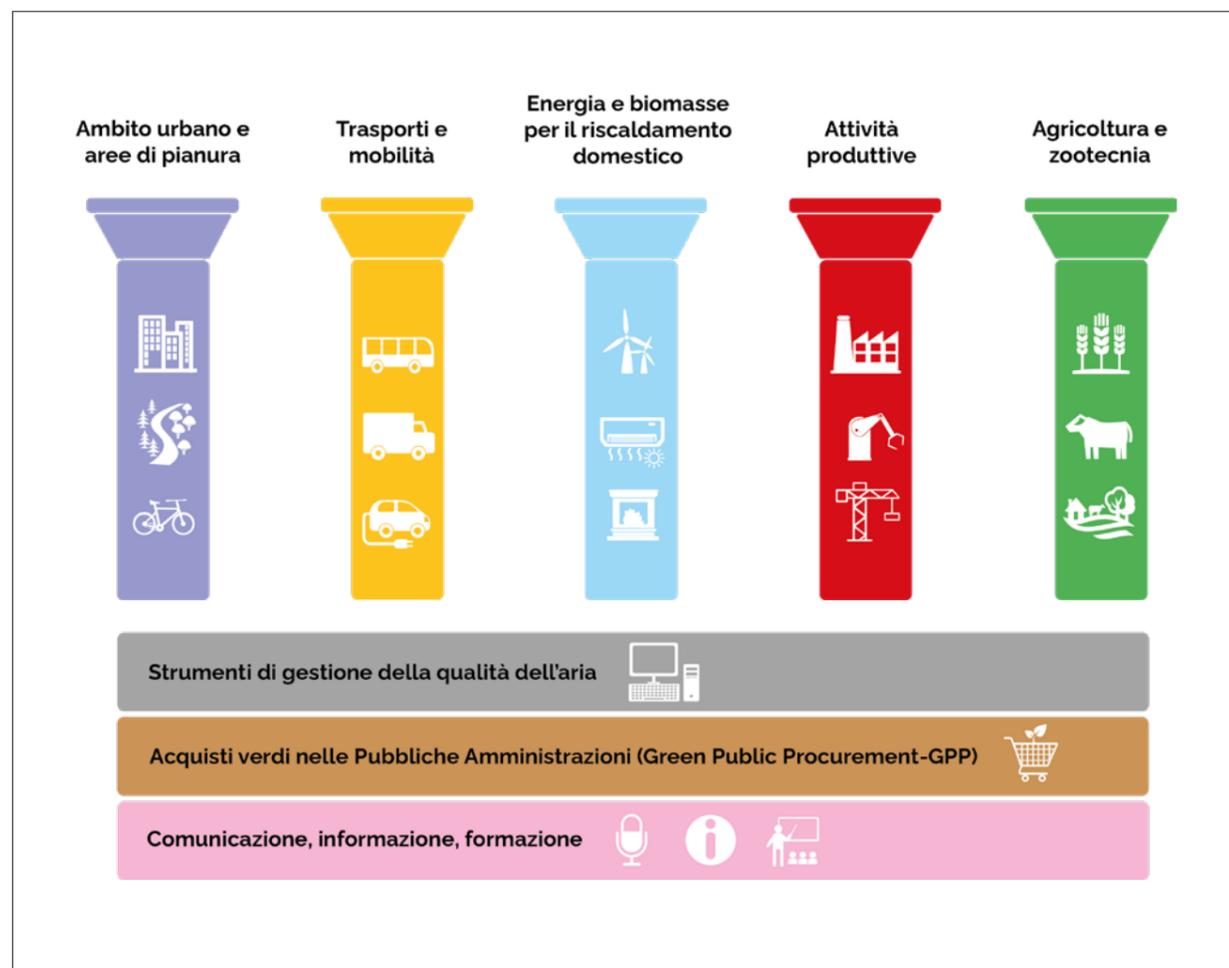
2026-2030

154,6
MILIONI DI EURO

SISTEMA A RETE DI AZIONE



FIGURA 5
Gli otto ambiti di intervento prioritari del PAIR 2023



Il PAIR 2030 individua **otto ambiti di intervento** prioritari per il raggiungimento degli obiettivi della qualità dell'aria, **di cui cinque tematici e tre trasversali** (figura 5).

Per gli ambiti tematici sono previste azioni per l'ambito urbano e le zone di pianura, i trasporti, l'energia e le biomasse, l'agricoltura e la zootecnia e, infine, le attività produttive.

I settori trasversali riguardano invece gli strumenti di gestione della qualità dell'aria, gli acquisti verdi nella Pubblica Amministrazione e le attività di comunicazione, informazione e formazione.

Lo **scenario di piano** è stato sviluppato **al 2030** in

modo da disporre di un orizzonte temporale sufficientemente ampio per utilizzare le diverse programmazioni dei fondi europei e da allinearsi con i percorsi previsti dal Patto per il Lavoro e per il Clima approvato dalla Regione Emilia-Romagna nel dicembre 2020⁴, dall'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile⁵, dall'Accordo di Parigi, dal Quadro 2030 per il clima e l'energia dell'Unione europea e dalla Direttiva NEC (*National Emission Ceilings*)⁶.

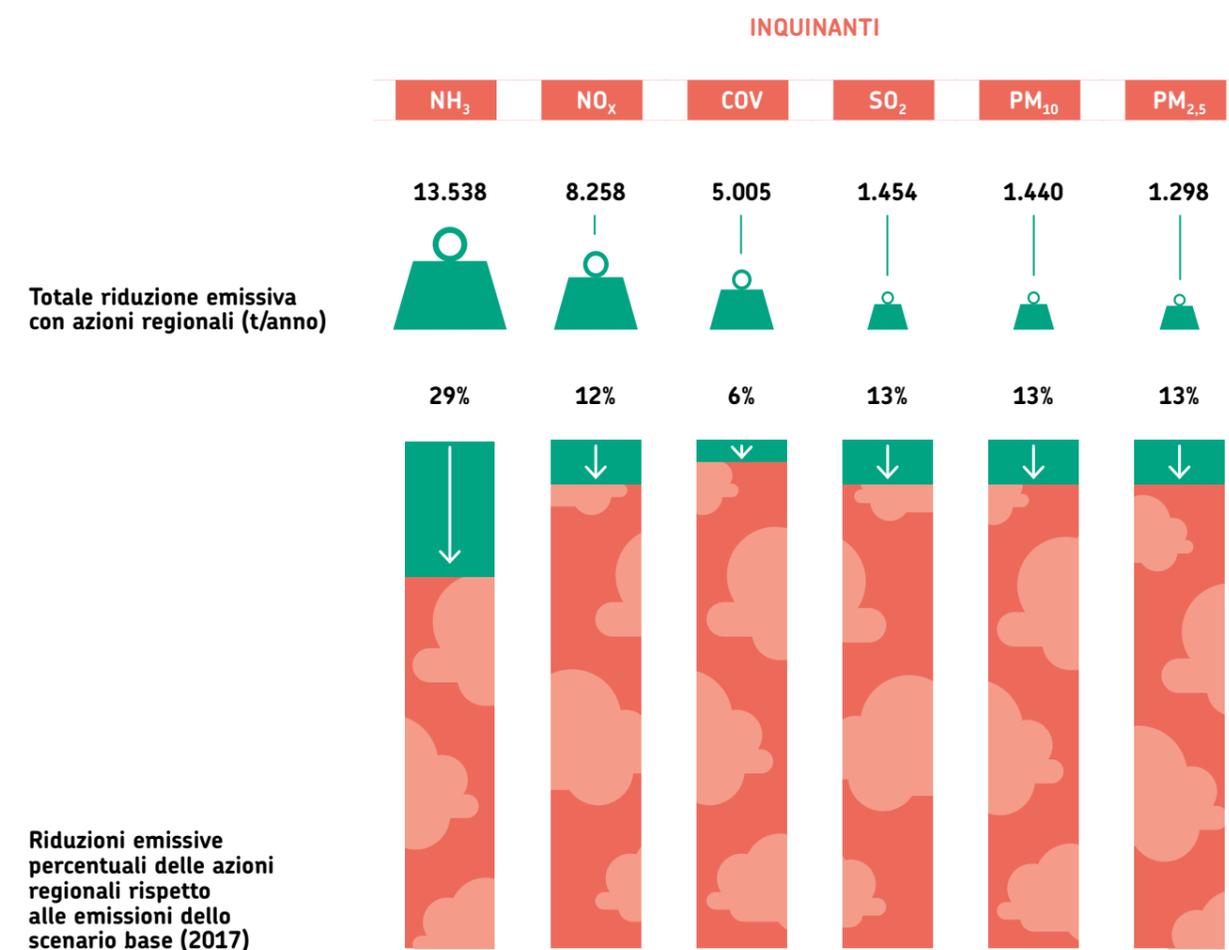
Lo scenario di piano prevede al 2030 di ridurre le emissioni, rispetto allo scenario di base al 2017, con azioni di carattere regionale, delle quantità mostrate in **tabella 2**.

⁴ Deliberazione di Giunta regionale n. 1899 del 14 dicembre 2020 "Approvazione del "Patto per il lavoro e per il clima"

⁵ <https://unric.org/it/wp-content/uploads/sites/3/2019/11/Agenda-2030-Onu-italia.pdf>

⁶ Direttiva 2016/2284 del Parlamento europeo e del Consiglio del 14 dicembre 2016, concernente la riduzione delle emissioni nazionali di determinati inquinanti atmosferici, che modifica la direttiva 2003/35/CE e abroga la direttiva 2001/81/CE, recepita con il Decreto legislativo 30 maggio 2018, n. 81

TABELLA 2 Riduzioni emissive (tonnellate/anno) derivanti dalla pianificazione regionale complementare e dalle azioni specifiche di piano e relativa riduzione percentuale rispetto al totale delle emissioni al 2017



Il **contributo regionale** deriva non solo dalle **azioni proprie di piano**, ma anche da quelle derivanti dalle pianificazioni settoriali dei trasporti (**PRIT 2025**) e dell'energia (**PER 2030**) e dal Programma di sviluppo rurale (**CoPSR 2023-2027**).

Il PAIR 2030 può contare per la prima volta su risorse specifiche volte al risanamento della qualità dell'aria derivanti dal Decreto n. 412/2020, che prevede fondi dedicati alla nostra regione nel triennio 2022-2025 di **63.671.000 euro** (in parte utilizzati per i bandi prima descritti) e di **154.650.000 euro** per il periodo 2026-2030. Le risorse verranno utilizzate a sostegno delle azioni di piano nei diversi settori. Altre risorse mirate alla riduzione delle emissioni in atmosfera sono quelle previste nel Protocollo 2019 tra Governo, sei Ministeri competenti e Regioni e Province autonome, che nell'ambito del Piano d'Azione per il miglioramento della qualità dell'aria stanziava **2,3 miliardi di euro** per

le annualità 2023-2030 per l'attuazione del Programma Nazionale di Controllo dell'Inquinamento Atmosferico (PNCIA).

Vi è inoltre un potenziale di risorse di notevole entità che, sebbene non specificamente destinate ai piani di miglioramento della qualità dell'aria, se adeguatamente indirizzate, possono concorrere a sostenere le misure necessarie al raggiungimento degli obiettivi di qualità dell'aria, quali quelle del PR FESR 2021-2027, del Complemento di programmazione per lo sviluppo rurale (CoPSR) del Programma strategico della PAC 2023-2027 della Regione Emilia-Romagna, che prevede azioni che contribuiranno alla riduzione delle emissioni di ammoniaca, e quelle del PNRR per l'efficiamento energetico e per il rinnovo e la riqualificazione del trasporto pubblico su gomma e ferro.

Di seguito si riportano le linee di intervento più rilevanti individuate dal PAIR 2030.

Ambito urbano e aree di pianura

L'applicazione di diverse misure per l'ambito urbano è passata da 30 Comuni del PAIR 2020 a 207 Comuni, arrivando a coprire tutta la pianura dell'Emilia-Romagna e coinvolgendo, oltre all'agglomerato, le zone di Pianura Est e Ovest nella loro interezza, quindi passando **dal 53% di popolazione regionale coinvolta al 91%**, dal 18% del territorio regionale al 60%.

Il piano promuove in generale la mobilità sostenibile con l'obiettivo di **ridurre gli spostamenti con il mezzo privato a favore della mobilità ciclopedonale e della mobilità pubblica**.

Per ridurre i flussi di traffico, il piano pone pertanto obiettivi di share modale dei veicoli privati al 2030, differenziati fra Bologna (27%), Comuni capoluogo

(40%) e Comuni con più di 30.000 abitanti (50%) e fornisce un obiettivo indicativo per i Comuni più piccoli sotto i 30.000 abitanti (60%).

Per il raggiungimento dell'obiettivo i Comuni possono adottare apposite misure nelle modalità più idonee al proprio territorio quali, ad esempio, la promozione della mobilità ciclistica e dei percorsi scolastici bicibus e pedibus, l'estensione di ZTL e aree pedonali, l'istituzione di "zone 30", la gestione della sosta e del traffico, la promozione del trasporto pubblico e l'estensione delle corsie preferenziali. All'**obiettivo di share modale**, oltre che al ricambio veicolare, concorrono anche le **misure di limitazione della circolazione** dei veicoli più inquinanti dal 1° ottobre al 31 marzo nei centri abitati, che nel corso degli anni prevedono un aumento delle categorie limitate come descritto nella **tabella 3**.

CITTÀ IN MOVIMENTO 2030



TABELLA 3
Misure di limitazione della circolazione nel centro abitato

COMUNI DI PIANURA CON LIMITAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE (AGGLOMERATO + PIANURA EST + PIANURA OVEST)



TIPOLOGIA DI VEICOLI CON LIMITAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE *

TIPOLOGIA DI VEICOLO / CARBURANTE	Limitazioni dal 1/10/2023	Limitazioni dal 1/10/2025	Limitazioni dal 1/10/2027	Limitazioni dal 1/10/2029
Classi di veicoli - (autoveicoli e veicoli commerciali M1, M2, M3, N1, N2, N3)				
Autoveicoli Benzina	< = Euro 2	< = Euro 2	< = Euro 3	< = Euro 4
Autoveicoli Diesel	< = Euro 4	< = Euro 4**	< = Euro 4**	< = Euro 4**
Autoveicoli Benzina/ GPL-METANO	< = Euro 1	< = Euro 2	< = Euro 3	< = Euro 3
Ciclomotori e motocicli	< = Euro 1	< = Euro 2	< = Euro 3	< = Euro 3

* Dal 1° ottobre al 31 marzo dalle 8.30 alle 18.30 dal lunedì al venerdì (possibilità di sospendere le limitazioni nei giorni di festività)
** <= diesel euro 5 nei comuni con popolazione superiore a 30.000 abitanti, comuni dell'agglomerato di Bologna e comuni aderenti volontari



Per i Comuni con popolazione superiore a 30.000 abitanti, per i Comuni appartenenti all'agglomerato di Bologna e per i Comuni aderenti volontari, con l'attivazione delle misure emergenziali le limitazioni

alla circolazione sono estese anche ai veicoli diesel euro 5, limitazioni che, per gli stessi Comuni, valgono anche nelle domeniche ecologiche (4 al mese dal 1° ottobre al 31 marzo).

Il PAIR 2030 ha fissato anche un **numero di controlli per i Comuni commisurato alla popolazione residente** e ha ridotto il numero di deroghe possibili al fine di aumentare l'efficacia della misura, anche considerando l'avvio del servizio Move-In, che ha introdotto una modalità alternativa di utilizzo dei veicoli oggetto di limitazioni.

Il PAIR 2030 conferma, inoltre, per l'ambito urbano e peri-urbano, la volontà della Regione di proseguire nell'ampliamento della forestazione, in sinergia con le politiche volte alla lotta ai cambiamenti climatici.

Sempre nelle zone di pianura viene stabilito il divieto assoluto e strutturale di qualsiasi tipologia di combustione all'aperto a scopo di intrattenimento (ad esempio falò rituali legati a tradizioni o fuochi d'artificio, a eccezione dei barbecue) nel periodo 1° ottobre – 31 marzo, concedendo due deroghe per eventi organizzati dal Comune, in caso non siano state attivate le misure emergenziali o i provvedimenti di dichiarazione dello stato di grave pericolosità per gli incendi boschivi.

Il PAIR 2030 conferma per le zone di Pianura e l'agglomerato le **misure emergenziali da attivare su base previsionale**, nel caso in cui si verifichi nel giorno di controllo (lunedì, mercoledì e venerdì) la probabilità di superamento del valore limite giornaliero di PM₁₀ per i successivi tre giorni, in almeno una stazione della provincia. Le giornate con misure emergenziali si attivano dal 1° ottobre al 31 marzo, in seguito all'emissione dell'apposito bollettino a cura di Arpa e sulla base del sistema integrato di modellistica meteorologica e di qualità dell'aria e permangono fino al giorno di controllo successivo.

Le misure emergenziali riguardano, in particolare, il divieto di spandimento dei liquami zootecnici con tecniche non eco-sostenibili e il divieto di utilizzo di generatori di calore per uso civile alimentati a biomassa legnosa (in presenza di impianto di riscaldamento alternativo) aventi prestazioni energetiche ed emissive che non sono in grado di rispettare i valori previsti almeno per la classe "4 stelle" (che a decorrere dal 1/1/2030 diviene "almeno alla classe 5 stelle").

Il PAIR 2030 introduce ulteriori misure cautelative, volte a evitare il raggiungimento dei 35 superamenti del valore limite giornaliero di PM₁₀, parametro sul quale grava la sentenza di condanna della Corte di giustizia europea.

Nel caso in cui si verifichino 25 superamenti del valore limite giornaliero di PM₁₀ in una delle stazioni di monitoraggio collocate sul proprio territorio, i Comuni adottano specifiche misure aggiuntive a livello locale finalizzate a ridurre le emissioni delle principali sorgenti emissive.

Nel caso in cui si verifichino 25 superamenti in almeno una stazione ricadente nelle zone Pianura Est, Pianura Ovest e Agglomerato, la Regione⁷ dispone, fino al 31 dicembre dell'anno in corso, la riduzione della velocità di circolazione dei veicoli su autostrade e strade extraurbane principali⁸, nei tratti stradali che attraversano centri abitati oppure che sono ubicati in prossimità degli stessi, ricadenti nella zona in cui si è verificato il superamento.

⁷ In attuazione dell'articolo 6 del D.Lgs. 30 aprile 1992, n. 285

⁸ Come definite alle lettere A e B dell'articolo 2, comma 3 del D.Lgs. 30 aprile 1992, n. 285



Trasporti e mobilità

All'obiettivo di share modale contribuisce anche la promozione e il potenziamento del **trasporto pubblico sia su gomma che su ferro**, al fine di renderlo sempre più competitivo rispetto al mezzo privato.

Il PAIR 2030 stabilisce quindi specifici obiettivi di aumento dei passeggeri trasportati (+ 10% su TPL gomma e + 20% su ferro al 2030, rispetto a quanto previsto dal PRIT 2025) e promuove azioni volte allo sviluppo dell'intermodalità; all'incremento delle corsie preferenziali e del preferenziamento semaforico e all'ottimizzazione dei percorsi del trasporto pubblico; alle **iniziative tariffarie**, quali "Salta su", "Mi Muovo anche in città" e "Mi Muovo tutto treno"; allo sviluppo di **punti di ricarica elettrica** anche per le aree a bassa

domanda, facendo in modo che sia disponibile un punto di ricarica ogni 50 km e favorendo i poli attrattori; alla promozione della **digitalizzazione dei servizi di mobilità**; al **rinnovo del parco veicolare della Pubblica Amministrazione**; alla promozione del **mobility management** e dello smart working; alla promozione di iniziative per la diffusione dell'**eco-driving**. Per quanto riguarda la mobilità delle merci, il PAIR 2030 prevede l'incremento del trasporto merci ferroviario del +5% al 2030 rispetto a quanto previsto dal PRIT al 2025 e l'incentivazione del trasferimento da gomma a ferro; la promozione della sostenibilità e dell'ottimizzazione della logistica a corto raggio, anche tramite finanziamenti per la diffusione delle **cargo bike** e l'**armonizzazione delle regole di accesso alle ZTL per la logistica urbana**.

POTENZIAMENTO TRASPORTO PUBBLICO LOCALE SU GOMMA E SU FERRO



POTENZIAMENTO TRASPORTO MERCI FERROVIARIO



Energia e biomasse per il riscaldamento domestico

Il PAIR 2030 stabilisce in generale indirizzi volti alla produzione di energia da fonti rinnovabili non emissive e al **risparmio energetico**, in sinergia con le politiche energetiche regionali.

Relativamente alla **produzione di energia da fonti rinnovabili**, il PAIR 2030, nelle zone di Pianura e nell'Agglomerato, vieta l'autorizzazione di nuovi impianti o l'ampliamento di impianti esistenti per la produzione di energia elettrica tramite combustione di biomassa solida, a prescindere dalla potenza termica nominale. Inoltre, in continuità con quanto previsto dal piano

precedente, stabilisce nelle medesime zone che l'obbligo di prevedere l'utilizzo di fonti rinnovabili a copertura di quota parte dei consumi energetici in edifici nuovi o sottoposti a ristrutturazioni rilevanti deve essere soddisfatto ricorrendo all'uso di fonti rinnovabili diverse dalla combustione delle biomasse.

Ai fini del risparmio energetico il PAIR 2030 conferma l'obbligo di **chiusura delle porte** degli esercizi commerciali e degli edifici con accesso al pubblico in tutta la Regione. Inoltre, ripropone anche la regolamentazione della **temperatura negli ambienti riscaldati**, rendendola però strutturale durante la stagione termica ed estendendola a tutti i Comuni di Pianura Est, Ovest e Agglomerato.

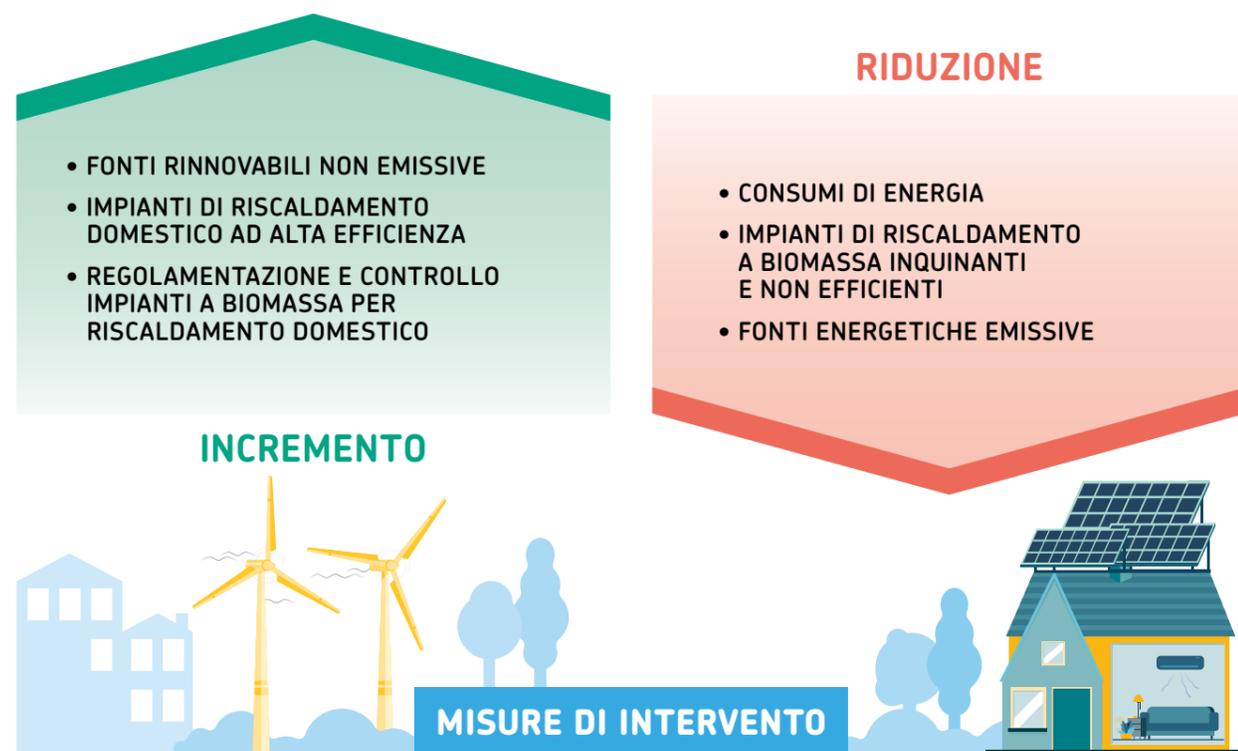


Per quanto riguarda la regolamentazione degli **impianti di combustione a biomassa per riscaldamento a uso civile**, nelle unità immobiliari ubicate nei Comuni delle zone Pianura Est, Ovest e Agglomerato, dal 1° ottobre al 31 marzo di ogni anno, il PAIR 2030 vieta l'utilizzo di impianti di riscaldamento a biomassa legnosa inferiori a "3 stelle" e di focolari aperti, qualora questo non sia l'unico metodo di riscaldamento presente nell'immobile. A decorrere dal 1/10/2025, il divieto di utilizzo verrà esteso agli impianti inferiori a "4 stelle".

A decorrere dall'entrata in vigore del piano, il divieto di installazione di nuovi generatori di calore a biomassa per uso civile è esteso agli impianti che non siano di ultima generazione (classe di prestazione emissiva 5 stelle e successivi). Viene confermato l'obbligo di utilizzo, nei generatori di calore a pellet di potenza termica nominale inferiore ai 35 kW, di pellet certificato conforme alla classe A1 della norma UNI EN ISO 17225-2.

Il piano pone inoltre l'obiettivo al 31/12/2026 di registrazione al Catasto regionale degli impianti termici di tutti gli impianti a biomassa per riscaldamento domestico, anche sotto i 5 kW, esclusi i caminetti aperti.

Per accompagnare le prescrizioni descritte, il PAIR 2030 promuove misure di incentivazione volte alla sostituzione degli impianti termici civili a biomassa esistenti con sistemi a più alta efficienza energetica.



Attività produttive

Il PAIR 2030 individua le misure necessarie a promuovere una **riqualificazione delle tecniche adottate nelle aziende produttive** e una **riduzione delle emissioni** nei distretti industriali caratterizzati da un'alta potenzialità emissiva, con particolare riferimento agli **inquinanti di Piano**.

In particolare, il PAIR 2030 prevede, su tutto il territorio regionale e anche per gli impianti di competenza statale, che l'Autorità competente per il rilascio delle AIA prescriva per le nuove installazioni, per le **polveri e gli ossidi di azoto**, i valori limite di emissione più bassi previsti nei BREF comunitari elaborati ai sensi della Direttiva 2010/75/UE, in particolare nella sezione **BAT Conclusions**, nei limiti in cui sia tecnicamente possibile.

Nelle aree critiche per la qualità dell'aria (Pianura Est, Ovest e Agglomerato) tale misura si applica anche agli **ossidi di zolfo**, ai **COV non metanici** e agli specifici composti organici del processo in esame. Nelle medesime aree tale misura si applica inoltre



alle modifiche sostanziali di installazioni esistenti AIA che configurino incrementi di capacità produttiva superiori o pari alla soglia di assoggettabilità ad AIA.

Si conferma la regolamentazione dei combustibili solidi secondari (CSS), il divieto dell'uso di olio combustibile e la promozione di accordi d'area e territoriali volontari per il contenimento delle emissioni da stipularsi tra gli enti pubblici, le imprese e le associazioni di categoria; si prevede inoltre l'**adozione delle migliori tecniche (BAT)** di abbattimento

per il contrasto alle emissioni di polveri diffuse e di composti organici volatili, la revisione dei criteri regionali di autorizzabilità per le attività non AIA con emissioni in atmosfera e l'impegno ad attuare e **promuovere l'efficiamento energetico nel settore industriale e terziario**. Al fine di disporre di una base conoscitiva aggiornata sulle emissioni autorizzate nel territorio e sulle reali emissioni, si procederà alla sistematizzazione dei dati autorizzativi e di controllo, nell'ambito di un progetto di realizzazione di un database ambientale.

RIDUZIONE

- EMISSIONI DA ATTIVITÀ PRODUTTIVE NELLE ZONE DI PIANURA

INCREMENTO

- MIGLIORIE TECNICHE PER IMPIANTI SOGGETTI AD AUTORIZZAZIONI AMBIENTALI
- EFFICIENTAMENTO ENERGETICO NEL SETTORE INDUSTRIALE
- COMPLETAMENTO DEL CATASTO IMPIANTI



Agricoltura

Uno dei principali obiettivi del PAIR 2030 è ottenere la **riduzione delle emissioni di ammoniaca, importante precursore di particolato secondario**, derivanti quasi esclusivamente dal settore dell'agricoltura. Per raggiungere tale obiettivo, in continuità con le azioni messe in atto con il precedente Piano, le misure saranno finalizzate alla promozione e incentivazione, principalmente tramite le misure del CoPSR, di interventi strutturali e gestionali sull'alimentazione, sui ricoveri zootecnici, sullo stoccaggio dei reflui e sull'incentivazione del rinnovo tecnologico per la distribuzione di effluenti e fertilizzanti minerali, in sinergia con la regolamentazione delle pratiche



RIDUZIONE

- EMISSIONI DI AMMONIACA IN TUTTE LE FASI DI GESTIONE DEGLI ALLEVAMENTI E DELLE ATTIVITÀ AGRICOLE
- ABBRUCIAMENTO RESIDUI VEGETALI

INCREMENTO

- ZOOTECCIA SOSTENIBILE
- FERTILIZZANTI SOSTENIBILI
- MIGLIORIE TECNICHE PER NUOVI ALLEVAMENTI SOGGETTI AD AUTORIZZAZIONI AMBIENTALI
- IMPIANTI A BIOMETANO





di spandimento dei reflui e dei fertilizzanti azotati e con le attività di rilascio e aggiornamento delle autorizzazioni ambientali, considerando anche, in ottica integrata, gli impatti sulle altre matrici ambientali. Le misure principali riguardanti le attività zootecniche prevedono, a partire dal 1° gennaio 2030, nelle zone Pianura Est, Ovest e Agglomerato, l'obbligo di copertura degli stoccaggi dei reflui zootecnici con tecniche di riduzione delle emissioni di ammoniaca a media o alta efficienza o la sostituzione con vasche con un rapporto superficie/volume inferiore o uguale a 0,2 m³/m².

Si confermano inoltre il divieto di stoccaggio dei liquami in lagoni per i nuovi allevamenti e gli obblighi di incorporazione per lo spandimento dei reflui palabili.

Nelle medesime zone prima citate, a partire dall'entrata in vigore del Piano, è anche previsto l'obbligo di interrimento dei reflui zootecnici entro 12 ore dallo spandimento dal 1° ottobre al 31 marzo e l'obbligo di usare sistemi di erogazione a pressione non superiore alle 2 atmosfere all'uscita del sistema di distribuzione.

In coerenza con quanto previsto per le attività produttive, in Pianura Est, Ovest e Agglomerato per i **nuovi allevamenti** soggetti ad **AIA** (per i settori suino e avicolo) e ad **AUA** (ove prevista per le altre tipologie di allevamento) e per le **modifiche sostanziali** degli allevamenti esistenti con ampliamenti almeno pari alla soglia AIA o AUA, le **autorizzazioni dispongono l'adozione delle BAT più prestanti** tra quelle applicabili a ogni singola fase dell'allevamento, nei limiti in cui sia tecnicamente applicabile.

Il PAIR 2030, in conformità a quanto previsto nel

Codice Agricoltura allegato al Programma Nazionale di Controllo dell'Inquinamento Atmosferico (PNCIA), introduce, a partire dal 1° gennaio 2026, nelle zone Pianura Ovest, Pianura Est e Agglomerato, l'obbligo di incorporazione nel terreno dei **fertilizzanti a base urea**, nel più breve tempo possibile e comunque entro le 24 ore successive allo spandimento, fatti salvi i casi di copertura vegetale in atto o semina già effettuata.

A decorrere dall'entrata in vigore, il PAIR 2030 stabilisce, fermo restando quanto introdotto dal D.L. 13 giugno 2023, n. 69, articolo 10, il divieto di **abbruciamento dei residui vegetali**, incluse le stoppie e le paglie, anche per le superfici investite a riso, nel periodo 1° ottobre - 31 marzo nelle zone Pianura Est, Ovest e Agglomerato, fatte salve le deroghe a seguito di prescrizioni emesse dall'Autorità fitosanitaria.



Appendice



LA NORMATIVA

Normativa europea

Direttiva 2004/107/CE

Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, del 15 dicembre 2004, concernente l'arsenico, il cadmio, il mercurio, il nickel e gli idrocarburi policiclici aromatici nell'aria ambiente

Direttiva 2008/50/CE

Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa

Direttiva 2009/30/CE

Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, che modifica la direttiva 98/70/CE per quanto riguarda le specifiche relative a benzina, combustibile diesel e gasolio nonché l'introduzione di un meccanismo inteso a controllare e ridurre le emissioni di gas a effetto serra, modifica la direttiva 1999/32/CE del Consiglio per quanto concerne le specifiche relative al combustibile utilizzato dalle navi adibite alla navigazione interna e abroga la direttiva 93/12/CEE

Direttiva 2010/75/UE

Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio del 24 novembre 2010 relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento)

Direttiva 2010/79/UE

Direttiva della Commissione sull'adeguamento al progresso tecnico dell'allegato III della direttiva 2004/42/CE del Parlamento europeo e del Consiglio relativa alla limitazione delle emissioni di composti organici volatili

Direttiva (UE) 2015/2193

Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, del 25 novembre 2015, relativa alla limitazione delle emissioni nell'atmosfera di taluni inquinanti originati da impianti di combustione medi

Direttiva (UE) 2016/2284

Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 dicembre 2016, concernente la riduzione delle emissioni nazionali di determinati inquinanti atmosferici, che modifica la direttiva 2003/35/CE e abroga la direttiva 2001/81/CE

Normativa nazionale

D.Lgs 3 aprile 2006 n. 152

Norme in materia ambientale

D.Lgs 29 giugno 2010, n. 128

Modifiche e integrazioni al decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale, a norma dell'articolo 12 della legge 18 giugno 2009, n. 69

D.Lgs 13 agosto 2010, n. 155

Attuazione della Direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa

Decreto del Ministero dell'Ambiente 23 febbraio 2012

Qualità dell'aria - Formato per l'invio dei progetti di zonizzazione e di classificazione del territorio ex Dlgs 155/2010

Decreto del Ministero dell'Ambiente 29 novembre 2012

Individuazione delle stazioni speciali di misurazione della qualità dell'aria previste dall'articolo 6, comma 1, e dall'articolo 8, commi 6 e 7 del decreto legislativo 13 agosto 2010, n. 155

D.Lgs 24 dicembre 2012 n. 250

Modifiche ed integrazioni al decreto legislativo 13 agosto 2010, n. 155, recante attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa

Decreto del Ministero dell'Ambiente 13 marzo 2013

Individuazione delle stazioni per il calcolo dell'indicatore d'esposizione media per il Pm 2,5 di cui all'articolo 12, comma 2, del decreto legislativo 13 agosto 2010, n. 155

D.Lgs 13 marzo 2013, n. 30

Attuazione della direttiva 2009/29/CE che modifica la direttiva 2003/87/CE al fine di perfezionare ed estendere il sistema comunitario per lo scambio di quote di emissione di gas a effetto serra

D.Lgs 4 marzo 2014, n. 46

Attuazione della direttiva 2010/75/UE relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento)

Decreto del Ministero dell'Ambiente 26 gennaio 2017

Attuazione della direttiva (UE) 2015/1480 del 28 agosto 2015, che modifica taluni allegati delle direttive 2004/107/CE e 2008/50/CE nelle parti relative ai metodi di riferimento, alla convalida dei dati e all'ubicazione dei punti di campionamento per la valutazione della qualità dell'aria ambiente

Decreto del Ministero dell'Ambiente 7 novembre 2017, n. 186

Regolamento recante la disciplina dei requisiti, delle procedure e delle competenze per il rilascio di una certificazione dei generatori di calore alimentati a biomasse combustibili solide

D.Lgs 15 novembre 2017, n. 183

Attuazione della direttiva (UE) 2015/2193 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 25 novembre 2015, relativa alla limitazione delle emissioni nell'atmosfera di taluni inquinanti originati da impianti di combustione medi, nonché per il riordino del quadro normativo degli stabilimenti che producono emissioni nell'atmosfera, ai sensi dell'articolo 17 della legge 12 agosto 2016, n. 170

D.Lgs 30 maggio 2018, n. 81

Attuazione della direttiva (UE) 2016/2284 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 dicembre 2016, concernente la riduzione delle emissioni nazionali di determinati inquinanti atmosferici, che modifica la direttiva 2003/35/CE e abroga la direttiva 2001/81/CE

Normativa regionale

DGR n. 1614 del 26/10/2009

Approvazione dello schema di convenzione tra Regione Emilia-Romagna, Amministrazioni provinciali dell'Emilia-Romagna e ARPA per la gestione della Rete Regionale della Qualità dell'Aria (RRQA) per il quadriennio 2009-2012

DGR n. 2236 del 28/12/2009

Autorizzazioni alle emissioni in atmosfera - interventi di semplificazione ed omogeneizzazione delle procedure e determinazione delle prescrizioni delle autorizzazioni di carattere generale per le attività in deroga ai sensi dell'art. 272, commi 1, 2 e 3 del D.Lgs n. 152 del 3 aprile 2006 "Norme in materia ambientale"

DGR n. 10082 del 16/09/2010

Costituzione del tavolo tecnico regionale sulla qualità dell'aria di cui alla deliberazione di Giunta Regionale n. 1614 del 26 ottobre 2009

DGR n. 1769 del 22/11/2010

Integrazioni e modifiche alla DGR 2236/2009 e approvazione degli allegati relativi all'autorizzazione di carattere generale per impianti termici civili con potenzialità termica nominale complessiva inferiore a 10 MWT, ai sensi dell'art. 272 comma 2 ed art. 281 comma 4 del D.Lgs 152/2006 "Norme in materia ambientale"

DGR n. 335 del 14/3/2011

Integrazioni e modifiche alla DGR 2236/2009 e s.m.i. ed approvazione degli allegati relativi all'Autorizzazione di carattere generale per motori fissi a combustione interna alimentati a Biomasse liquide e Biodisel con potenzialità termica nominale complessiva fino a 10 MWT, ai sensi degli artt. 271, comma 3 e 272, comma 2 del D.Lgs 152/2006

DAL n. 51 del 26/07/2011

Individuazione delle aree e dei siti per l'installazione di impianti di produzione di energia elettrica mediante l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili eolica, da biogas, da biomasse e idroelettrica

DGR n. 1496 del 24/10/2011

Integrazioni e modifiche alla DGR 2236/09 - Approvazione degli allegati relativi all'autorizzazione di carattere generale per gli impianti di produzione di energia con motori a cogenerazione elettrica aventi potenza termica nominale compresa fra 3 e 10 MWT alimentati a biogas, ai sensi degli artt. 271, comma 3 e 272 comma 2 del D.Lgs 152/2006 "Norme in materia ambientale"

DGR n. 1681 del 21/11/2011

Integrazioni e modifiche alla DGR 2236/2009 - Approvazione degli allegati relativi all'Autorizzazione di carattere generale per allevamenti di bestiame di cui alla parte II, dell'Allegato IV alla PARTE V del D.Lgs 152/06 e s.m.i.

DGR n. 1497 del 24/10/2011

Autorizzazione alle emissioni in atmosfera - Approvazione della modulistica per la presentazione delle domande di autorizzazione ai sensi dell'art. 269 del D.Lgs n. 152/2006 "NORME IN MATERIA AMBIENTALE" e s.m.i.

DGR n. 1498 del 24/10/2011

Rinnovo delle autorizzazioni alle emissioni in atmosfera per le attività in deroga ai sensi dell'art. 272 del D.Lgs 152/2006 "NORME IN MATERIA AMBIENTALE". Approvazione di una direttiva alle Province per l'esercizio omogeneo e coordinato delle attività autorizzatorie

DGR n. 2001 del 27/12/2011

Recepimento del Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 15 "Attuazione della Direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa" - Approvazione della nuova zonizzazione e della nuova configurazione della rete di rilevamento e indirizzi per la gestione della qualità dell'aria

DGR n. 362 del 26/03/2012

Attuazione della DAL 51 del 26 luglio 2011 - approvazione dei criteri per l'elaborazione del computo emissivo per gli impianti di produzione di energia a biomasse

DGR n. 855 del 25/06/2012

Approvazione degli allegati relativi all'autorizzazione di carattere generale per impianti termici civili e industriali alimentati a biomasse solide con potenzialità termica nominale complessiva inferiore a 10 MWt, ai sensi degli articoli 271 comma 3 e 272 comma 2 del D.Lgs 152/2006 "Norme in materia ambientale" - integrazioni e modifiche alla DGR 2236/2009

DGR n. 968 del 16/07/2012

Integrazioni e modifiche alla DGR 2236/09 e alla DGR 1681/2011 - Modifica degli allegati relativi all'autorizzazione di carattere generale per allevamenti di bestiame di cui alla parte II, dell'allegato IV alla parte V, del DLgs 152/06 e s.m.i. e approvazione del modulo per la domanda di adesione

DGR n. 995 del 16/07/2012

Integrazioni e modifiche alla DGR 2236/2009 - approvazione degli allegati relativi all'autorizzazione di carattere generale per le linee di trattamento fanghi connesse ad impianti di depurazione acque

DGR n. 1998 del 23/12/2013

Modifiche al progetto di zonizzazione della regione Emilia-Romagna approvato con DGR n. 2001 del 27 dicembre 2011 - recepimento del decreto legislativo 13 agosto

DGR n. 1648 del 17/10/2016

Modifiche alla DGR 1496/2011: integrazioni e modifiche alla DGR 2236/09 - Approvazione degli allegati relativi all'autorizzazione di carattere generale per impianti di produzione di energia con motori a cogenerazione elettrica aventi potenza termica nominale compresa fra 3 e 10 MWT alimentati a biogas, ai sensi degli articoli 271 comma 3 e 272 comma 2 del DLgs 152/2006 "Norme in materia ambientale"

DGR n. 1412 del 25/09/2017

Misure per il miglioramento della qualità dell'aria in attuazione del Piano Aria Integrato Regionale (PAIR 2020) e del nuovo Accordo di Bacino Padano 2017

DGR n. 1135 del 08/07/2019

Riesame e classificazione delle zone e degli agglomerati della Regione Emilia Romagna ai fini della valutazione della qualità dell'aria

DGR n. 1523 del 02/11/2020

Disposizioni in materia di pianificazione sulla tutela della qualità dell'aria

DGR n. 33 del 13/01/2021

Disposizioni straordinarie in materia di tutela della qualità dell'aria

DGR n. 189 del 15/02/2021

Ulteriori disposizioni straordinarie in materia di tutela della qualità dell'aria

Determinazione n. 14471 del 30/07/2021 - Indicazioni operative per l'attuazione degli adempimenti concernenti la limitazione dell'utilizzo di determinate sostanze pericolose (art.271, comma 7 bis del D.Lgs 152/2006)

DGR n. 2130 del 13/12/2021

Ulteriori misure straordinarie in materia di tutela della qualità dell'aria e proroga del Piano Aria Integrato regionale (PAIR 2020). Formalizzazione del coinvolgimento del livello nazionale per l'adozione di misure relative a sorgenti di emissione su cui la Regione non ha competenza amministrativa e legislativa.

I DATI

Concentrazione media annuale di PM₁₀ andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	COMUNE	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura ovest	Piacenza	Piacenza	Parco Montecucco	Fondo urbano	27	27	27	28	30
		Lugagnano Val D'Arda	Lugagnano	Fondo suburbano	23	22	22	23	24
		Piacenza	Giordani-Farnese	Traffico urbano	30	30	29	31	31
	Parma	Parma	Cittadella	Fondo urbano	31	30	30	30	29
		Colorno	Saragat	Fondo suburbano	28	28	28	28	30
		Langhirano	Badia	Fondo rurale	20	19	21	21	21
		Parma	Montebello	Traffico urbano	32	30	28	28	30
	Reggio Emilia	Reggio Emilia	S. Lazzaro	Fondo urbano	28	27	27	26	29
		Castellarano	Castellarano	Fondo suburbano	26	24	25	26	27
		Guastalla	S. Rocco	Fondo rurale	30	29	30	27	29
		Reggio Emilia	Timavo	Traffico urbano	35	32	32	33	35
	Modena	Sassuolo	Parco Edilcarani	Fondo urbano	26	25	26	26	27
		Modena	Mo - Parco Ferrari	Fondo urbano	28	30	31	29	30
		Carpi	Remesina	Fondo suburbano	28	30	30	28	30
Modena		Mo - Via Giardini	Traffico urbano	32	33	33	33	36	
Mirandola		Gavello	Fondo rurale	25	29	28	25	27	
Fiorano Modenese		Circ. San Francesco	Traffico urbano	31	33	30	32	33	
Agglomerato	Bologna	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	22	22	24	23	23
		Bologna	Via Chiarini	Fondo suburbano	24	25	22	21	25
		Bologna	Porta San Felice	Traffico urbano	26	26	26	26	27
		San Lazzaro di Savena	San Lazzaro	Traffico urbano	24	25	26	27	27
Pianura est	Bologna	Molinella	San Pietro Capofiume	Fondo rurale	23	24	26	22	23
		Imola	De Amicis	Traffico urbano	23	23	25	22	26
	Ferrara	Ferrara	Villa Fulvia	Fondo urbano	27	26	28	25	27
		Cento	Cento	Fondo suburbano	27	27	27	24	27
		Jolanda di Savoia	Gherardi	Fondo rurale	25	25	23	21	24
		Ferrara	Isonzo	Traffico urbano	29	32	31	28	30
	Ravenna	Ravenna	Caorle	Fondo urbano	26	26	26	22	25
		Faenza	Parco Bertozzi	Fondo urbano	22	24	24	22	24
		Cervia	Delta Cervia	Fondo suburbano	25	26	27	24	27
		Ravenna	Zalamella	Traffico urbano	26	30	29	27	29
	Forlì-Cesena	Forlì	Parco Resistenza	Fondo urbano	23	22	22	21	23
		Cesena	Franchini-Angeloni	Fondo urbano	24	25	24	23	25
		Savignano sul Rubicone	Savignano	Fondo suburbano	25	25	27	23	27
		Forlì	Roma	Traffico urbano	26	27	25	24	26
	Rimini	Rimini	Marecchia	Fondo urbano	23	29	27	25	27
		Verucchio	Verucchio	Fondo suburbano	19	19	19	18	20
Rimini		Flaminia	Traffico urbano	31	30	31	28	30	
Appennino	Piacenza	Corte Brugnatella	Corte Brugnatella	Fondo rurale	11	10	10	12	13
	Reggio Emilia	Villa Minozzo	Febbio	Fondo rurale	11	10	9	10	11
	Bologna	Porretta Terme	Castelluccio	Fondo rurale	10	10	10	10	11
	Forlì-Cesena	Sogliano al Rubicone	Savignano di Rigo	Fondo rurale	12	12	12	12	13
	Rimini	San Leo	San Leo	Fondo rurale	16	14	14	13	14

LEGENDA

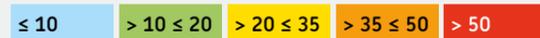
Limite di legge:
40 µg/m³



Numero di superamenti del limite giornaliero (50 µg/m³) per il PM₁₀ andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	COMUNE	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura ovest	Piacenza	Piacenza	Parco Montecucco	Fondo urbano	22	32	41	37	45
		Lugagnano Val D'Arda	Lugagnano	Fondo suburbano	8	9	19	17	15
		Piacenza	Giordani-Farnese	Traffico urbano	32	48	53	45	47
	Parma	Parma	Cittadella	Fondo urbano	40	39	54	42	34
		Colorno	Saragat	Fondo suburbano	24	32	49	36	33
		Langhirano	Badia	Fondo rurale	10	5	22	12	8
	Reggio Emilia	Parma	Montebello	Traffico urbano	45	42	52	34	46
		Reggio Emilia	S. Lazzaro	Fondo urbano	28	32	39	32	28
		Castellarano	Castellarano	Fondo suburbano	24	23	31	33	30
	Modena	Guastalla	S. Rocco	Fondo rurale	30	41	54	35	30
		Reggio Emilia	Timavo	Traffico urbano	56	53	61	51	64
		Sassuolo	Parco Edilcarani	Fondo urbano	26	32	34	32	30
		Modena	Mo - Parco Ferrari	Fondo urbano	32	47	58	39	40
		Carpi	Remesina	Fondo suburbano	29	49	57	39	41
	Modena	Modena	Mo - Via Giardini	Traffico urbano	51	58	75	62	75
Mirandola		Gavello	Fondo rurale	19	45	51	29	29	
Fiorano Modenese		Circ. San Francesco	Traffico urbano	39	48	48	47	48	
Agglomerato	Bologna	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	10	23	30	21	23
		Bologna	Via Chiarini	Fondo suburbano	14	21	22	17	23
		Bologna	Porta San Felice	Traffico urbano	18	32	42	29	33
		San Lazzaro di Savena	San Lazzaro	Traffico urbano	13	29	34	28	26
Pianura est	Bologna	Molinella	San Pietro Capofiume	Fondo rurale	15	31	39	24	11
		Imola	De Amicis	Traffico urbano	17	20	35	19	23
	Ferrara	Ferrara	Villa Fulvia	Fondo urbano	26	44	55	34	46
		Cento	Cento	Fondo suburbano	27	41	45	27	28
		Jolanda di Savoia	Gherardi	Fondo rurale	12	30	38	16	21
		Ferrara	Isonzo	Traffico urbano	41	60	73	42	61
	Ravenna	Ravenna	Caorle	Fondo urbano	22	33	40	14	22
		Faenza	Parco Bertozzi	Fondo urbano	11	20	26	17	21
		Cervia	Delta Cervia	Fondo suburbano	15	28	36	21	22
		Ravenna	Zalamella	Traffico urbano	22	51	58	33	37
	Forlì-Cesena	Forlì	Parco Resistenza	Fondo urbano	17	23	25	18	15
		Cesena	Franchini-Angeloni	Fondo urbano	17	26	30	19	20
		Savignano sul Rubicone	Savignano	Fondo suburbano	28	33	48	21	27
		Forlì	Roma	Traffico urbano	26	37	30	24	27
	Rimini	Rimini	Marecchia	Fondo urbano	19	41	46	27	26
Verucchio		Verucchio	Fondo suburbano	6	10	16	13	7	
Rimini		Flaminia	Traffico urbano	36	43	56	36	42	
Appennino	Piacenza	Corte Brugnatella	Corte Brugnatella	Fondo rurale	0	0	1	4	1
	Reggio Emilia	Villa Minozzo	Febbio	Fondo rurale	0	0	1	6	0
	Bologna	Porretta Terme	Castelluccio	Fondo rurale	0	0	1	6	0
	Forlì-Cesena	Sogliano al Rubicone	Savignano di Rigo	Fondo rurale	3	0	4	3	4
	Rimini	San Leo	San Leo	Fondo rurale	4	0	6	4	3

LEGENDA Limite di legge: 50 µg/m³ media oraria giornaliera da non superare più di 35 volte in un anno



Concentrazione media annuale di PM_{2,5} andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	COMUNE	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022	
Pianura ovest	Piacenza	Piacenza	Parco Montecucco	Fondo urbano	21	21	21	21	22	
		Besenzone	Besenzone	Fondo rurale	22	22	20	19	18	
	Parma	Parma	Cittadella	Fondo urbano	19	17	18	15	16	
		Langhirano	Badia	Fondo rurale	14	12	14	11	12	
	Reggio Emilia	Reggio Emilia	S. Lazzaro	Fondo urbano	20	18	19	17	18	
		Castellarano	Castellarano	Fondo suburbano	19	18	19	16	17	
		Guastalla	S. Rocco	Fondo rurale	19	20	21	17	18	
	Modena	Modena	Mo - Parco Ferrari	Fondo urbano	18	18	19	18	18	
		Sassuolo	Parco Edilcarani	Fondo urbano	18	14	17	17	17	
		Mirandola	Gavello	Fondo rurale	17	19	20	17	18	
	Agglomerato	Bologna	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	15	14	15	14	14
			Bologna	Porta San Felice	Traffico urbano	18	16	17	16	17
	Pianura est	Bologna	Molinella	San Pietro Capofiume	Fondo rurale	17	17	18	16	17
			Ferrara	Ferrara	Villa Fulvia	Fondo urbano	17	17	18	16
		Ferrara	Jolanda di Savoia	Gherardi	Fondo rurale	18	18	15	13	15
Ostellato			Ostellato	Fondo rurale	15	18	17	16	17	
Ravenna			Faenza	Parco Bertozzi	Fondo urbano	15	15	15	13	14
Ravenna		Ravenna	Caorle	Fondo urbano	19	19	19	15	16	
		Alfonsine	Ballirana	Fondo rurale	16	17	18	15	17	
		Folì-Cesena	Forlì	Parco Resistenza	Fondo urbano	16	14	14	13	14
Folì-Cesena		Savignano sul Rubicone	Savignano	Fondo suburbano	17	16	18	16	17	
		Rimini	Rimini	Marecchia	Fondo urbano	17	16	17	15	16
Rimini	San Clemente	San Clemente	Fondo rurale	13	12	13	10	12		
	Appennino	Bologna	Porretta Terme	Castelluccio	Fondo rurale	6	6	5	5	6

LEGENDA Limite di legge: 25 µg/m³



Concentrazione media annuale di Biossido di azoto andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	COMUNE	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022	
Pianura ovest	Piacenza	Piacenza	Parco Montecucco	Fondo urbano	23	23	19	21	19	
		Lugagnano Val D'Arda	Lugagnano	Fondo suburbano	17	16	14	14	12	
		Besenzone	Besenzone	Fondo rurale	19	18	17	19	15	
		Piacenza	Giordani-Farnese	Traffico urbano	34	33	27	29	27	
	Parma	Parma	Cittadella	Fondo urbano	22	20	19	21	20	
		Colorno	Saragat	Fondo suburbano	18	16	15	16	16	
		Langhirano	Badia	Fondo rurale	13	12	11	12	12	
		Parma	Montebello	Traffico urbano	36	34	28	29	28	
	Reggio Emilia	Reggio Emilia	S. Lazzaro	Fondo urbano	22	23	18	21	20	
		Castellarano	Castellarano	Fondo suburbano	19	17	15	18	17	
		Guastalla	S. Rocco	Fondo rurale	17	16	15	15	15	
		Reggio Emilia	Timavo	Traffico urbano	35	34	29	33	32	
	Modena	Sassuolo	Parco Edilcarani	Fondo urbano	22	19	19	18	17	
		Modena	Mo - Parco Ferrari	Fondo urbano	27	24	25	26	23	
		Carpi	Remesina	Fondo suburbano	24	28	26	25	24	
		Mirandola	Gavello	Fondo rurale	15	14	13	13	13	
Modena		Mo - Via Giardini	Traffico urbano	40	41	34	36	33		
Fiorano Modenese		Circ. San Francesco	Traffico urbano	45	43	34	37	37		
Agglomerato	Bologna	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	22	21	17	17	18	
		Bologna	Via Chiarini	Fondo suburbano	23	21	20	19	16	
		Bologna	Porta San Felice	Traffico urbano	49	46	38	43	39	
		San Lazzaro di Savena	San Lazzaro	Traffico urbano	25	25	23	24	25	
Pianura est	Bologna	Molinella	San Pietro Capofiume	Fondo rurale	12	15	15	12	13	
		Imola	De Amicis	Traffico urbano	25	24	27	26	20	
	Ferrara	Ferrara	Villa Fulvia	Fondo urbano	19	19	17	18	16	
		Cento	Cento	Fondo suburbano	21	20	18	17	15	
		Jolanda di Savoia	Gherardi	Fondo rurale	12	13	11	12	12	
		Ostellato	Ostellato	Fondo rurale	13	13	12	13	13	
		Ferrara	Isonzo	Traffico urbano	38	36	28	29	29	
		Ravenna	Ravenna	Caorle	Fondo urbano	19	20	18	18	17
	Ravenna	Faenza	Parco Bertozzi	Fondo urbano	16	15	14	15	15	
		Cervia	Delta Cervia	Fondo suburbano	14	14	11	12	12	
		Alfonsine	Ballirana	Fondo rurale	13	13	13	13	12	
		Ravenna	Zalamella	Traffico urbano	30	28	28	22	23	
		Forlì-Cesena	Forlì	Parco Resistenza	Fondo urbano	20	21	17	19	17
			Cesena	Franchini-Angeloni	Fondo urbano	24	23	20	20	19
	Savignano sul Rubicone		Savignano	Fondo suburbano	20	22	19	19	17	
	Forlì		Roma	Traffico urbano	29	28	24	28	24	
	Rimini	Rimini	Marecchia	Fondo urbano	19	21	19	18	17	
		Verucchio	Verucchio	Fondo suburbano	9	13	10	10	9	
San Clemente		San Clemente	Fondo rurale	8	7	9	11	9		
Rimini		Flaminia	Traffico urbano	39	42	32	36	34		
Appennino	Piacenza	Corte Brugnatella	Corte Brugnatella	Fondo rurale	5	4	4	4	4	
	Reggio Emilia	Villa Minozzo	Febbio	Fondo rurale	4	4	3	3	2	
	Bologna	Porretta Terme	Castelluccio	Fondo rurale	4	6	3	3	3	
	Forlì-Cesena	Sogliano al Rubicone	Savignano di Rigo	Fondo rurale	4	4	3	3	3	
	Rimini	San Leo	San Leo	Fondo rurale	8	5	5	5	5	

LEGENDA

Limite di legge:
40 µg/m³



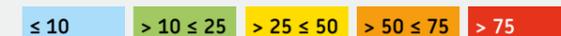
raccolta minima di dati non sufficiente

Numero di superamenti per l'Ozono dell'obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana - andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	COMUNE	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022		
Pianura ovest	Piacenza	Piacenza	Parco Montecucco	Fondo urbano	80	80	75	62	82		
		Lugagnano Val D'Arda	Lugagnano	Fondo suburbano	47	75	70	54	67		
		Besenzone	Besenzone	Fondo rurale	60	61	60	43	69		
		Parma	Parma	Cittadella	Fondo urbano	46	38	38	42		
	Parma	Colorno	Saragat	Fondo suburbano	51	48	31	56	67		
		Langhirano	Badia	Fondo rurale	76	62	50	61	74		
		Reggio Emilia	Reggio Emilia	S. Lazzaro	Fondo urbano	55	55	42	54	55	
		Castellarano	Castellarano	Fondo suburbano	75	55	62	77			
	Reggio Emilia	Guastalla	S. Rocco	Fondo rurale	86	73	68	56	79		
		Modena	Modena	Mo - Parco Ferrari	Fondo urbano	66	50	67	53	74	
		Carpi	Remesina	Fondo suburbano	53	55	29	34	53		
		Sassuolo	Parco Edilcarani	Fondo urbano	54	54	40	49	54		
	Modena	Mirandola	Gavello	Fondo rurale	77	49	44	42	58		
		Agglomerato	Bologna	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	39	59	33	34	56
		Bologna	Via Chiarini	Fondo suburbano	39	60	36	42	54		
		Pianura est	Bologna	Molinella	San Pietro Capofiume	Fondo rurale	45	51	28	52	71
Ferrara	Ferrara			Villa Fulvia	Fondo urbano	22	43	27	38	51	
Ferrara	Cento		Cento	Fondo suburbano	53	57	48	51	50		
	Jolanda di Savoia		Gherardi	Fondo rurale	69	53	32	59	53		
	Ostellato		Ostellato	Fondo rurale	63	60	41	45	59		
	Ravenna		Faenza	Parco Bertozzi	Fondo urbano	28	24	27	10	27	
	Cervia		Delta Cervia	Fondo suburbano	57	51	30	20	52		
Ravenna	Ravenna		Caorle	Fondo urbano	42	28	25	15	26		
	Alfonsine		Ballirana	Fondo rurale	10	15	12	18	29		
	Forlì-Cesena		Forlì	Parco Resistenza	Fondo urbano	48	26	51	38	75	
	Savignano sul Rubicone		Savignano	Fondo suburbano	60	27	17	23	7		
Rimini	Rimini		Marecchia	Fondo urbano	46	43	22	8			
	Verucchio		Verucchio	Fondo suburbano	35	40	59	34	42		
	San Clemente		San Clemente	Fondo rurale	33	32	30	20	27		
Appennino	Piacenza		Corte Brugnatella	Corte Brugnatella	Fondo rurale	20	43	48	30	63	
	Reggio Emilia		Villa Minozzo	Febbio	Fondo rurale	13	1	10	21		
	Bologna		Porretta Terme	Castelluccio	Fondo rurale	0	5	0	8	0	
	Forlì-Cesena		Sogliano al Rubicone	Savignano di Rigo	Fondo rurale	48	23	21	29		
	Rimini	San Leo	San Leo	Fondo rurale	15	27	26	21			

LEGENDA

Obiettivo a lungo termine
per la protezione della
salute umana:
massimo giornaliero
della media mobile su 8 ore,
pari a 120 µg/m³



raccolta minima di dati non sufficiente

Numero di superamenti della soglia di informazione per l'Ozono andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	COMUNE	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura ovest	Piacenza	Piacenza	Parco Montecucco	Fondo urbano	32	64	13	7	39
		Lugagnano Val D'Arda	Lugagnano	Fondo suburbano	5	35	8	0	14
		Besenzone	Besenzone	Fondo rurale	1	15	0	0	11
	Parma	Parma	Cittadella	Fondo urbano	9	20	0	0	0
		Colorno	Saragat	Fondo suburbano	4	19	1	0	16
		Langhirano	Badia	Fondo rurale	11	9	7	1	10
	Reggio Emilia	Reggio Emilia	S. Lazzaro	Fondo urbano	1	5	1	0	4
		Castellarano	Castellarano	Fondo suburbano	///	37	13	0	19
		Guastalla	S. Rocco	Fondo rurale	10	32	3	0	7
	Modena	Modena	Mo - Parco Ferrari	Fondo urbano	3	6	14	0	3
		Carpi	Remesina	Fondo suburbano	10	19	1	0	3
		Sassuolo	Parco Edilcarani	Fondo urbano	3	8	5	0	10
		Mirandola	Gavello	Fondo rurale	3	19	1	0	0
Agglomerato	Bologna	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	0	18	0	0	7
		Bologna	Via Chiarini	Fondo suburbano	0	25	6	0	5
Pianura est	Bologna	Molinella	San Pietro Capofiume	Fondo rurale	0	2	0	3	0
	Ferrara	Ferrara	Villa Fulvia	Fondo urbano	0	7	0	0	1
		Cento	Cento	Fondo suburbano	0	12	0	0	0
		Jolanda di Savoia	Gherardi	Fondo rurale	2	11	2	0	0
		Ostellato	Ostellato	Fondo rurale	0	6	4	0	1
	Ravenna	Faenza	Parco Bertozzi	Fondo urbano	0	0	0	0	0
		Cervia	Delta Cervia	Fondo suburbano	1	8	0	0	1
		Ravenna	Caorle	Fondo urbano	0	7	0	0	0
		Alfonsine	Ballirana	Fondo rurale	0	2	0	0	0
	Forlì-Cesena	Forlì	Parco Resistenza	Fondo urbano	3	0	5	0	14
		Savignano sul Rubicone	Savignano	Fondo suburbano	6	0	0	0	0
	Rimini	Rimini	Marecchia	Fondo urbano	0	///	6	0	0
		Verucchio	Verucchio	Fondo suburbano	0	5	29	0	0
San Clemente		San Clemente	Fondo rurale	0	0	0	0	0	
Appennino	Piacenza	Corte Brugnatella	Corte Brugnatella	Fondo rurale	0	3	1	0	5
	Reggio Emilia	Villa Minozzo	Febbio	Fondo rurale	///	0	0	0	0
	Bologna	Porretta Terme	Castelluccio	Fondo rurale	0	0	0	3	0
	Forlì-Cesena	Sogliano al Rubicone	Savignano di Rigo	Fondo rurale	///	0	0	0	0
	Rimini	San Leo	San Leo	Fondo rurale	///	0	0	0	0

LEGENDA

Massimo giornaliero
pari a 180 µg/m³

≤ 10	> 10 ≤ 25	> 25 ≤ 50	> 50 ≤ 75	> 75
------	-----------	-----------	-----------	------



raccolta minima
di dati non sufficiente

Concentrazione media annuale Benzene andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura ovest	Piacenza	Giordani-Farnese	Traffico urbano	1,1	1	0,9	1	0,9
	Parma	Montebello	Traffico urbano	1,2	1,1	1,1	1,1	1
	Reggio Emilia	Timavo	Traffico urbano	1,3	1,1	1	1	1,1
	Modena	Mo - Via Giardini	Traffico urbano	1	1	1,1	1,2	1,1
	Modena	Circ. San Francesco	Traffico urbano	1	0,9	-	-	-
Agglomerato	Bologna	Porta San Felice	Traffico urbano	1,4	1,1	0,9	0,9	0,9
Pianura est	Bologna	De Amicis	Traffico urbano	0,8	0,7	-	-	-
	Ferrara	Isonzo	Traffico urbano	1,1	1,1	1	0,9	1
	Ravenna	Zalamella	Traffico urbano	1	1	1	0,9	0,9
	Forlì-Cesena	Roma	Traffico urbano	1,2	1	0,9	0,9	0,9
	Rimini	Flaminia	Traffico urbano	1,6	1,5	1,4	1,4	1,4

LEGENDA

Limite di legge:
5 µg/m³

Superamenti del valore limite orario di Monossido di carbonio (10 mg/m³) per il max giornaliero della media su 8 ore (ore), andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura ovest	Piacenza	Giordani-Farnese	Traffico urbano	0	0	0	0	0
	Parma	Montebello	Traffico urbano	0	0	-	-	-
	Reggio Emilia	Timavo	Traffico urbano	0	0	0	0	0
	Modena	Mo - Via Giardini	Traffico urbano	0	0	-	-	-
	Modena	Circ. San Francesco	Traffico urbano	0	0	-	-	-
Agglomerato	Bologna	Porta San Felice	Traffico urbano	0	0	0	0	0
Pianura est	Bologna	De Amicis	Traffico urbano	0	0	-	-	-
	Ferrara	Isonzo	Traffico urbano	0	0	-	-	-
	Ravenna	Zalamella	Traffico urbano	0	0	0	0	0
	Forlì-Cesena	Roma	Traffico urbano	0	0	-	-	-
	Rimini	Flaminia	Traffico urbano	0	0	0	0	0

Superamenti del valore limite orario di Biossido di zolfo (350 µg/m³) (ore) andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura est	Ravenna	Caorle	Fondo urbano	0	0	0	0	0

Superamenti del valore limite orario di Biossido di zolfo (125 µg/m³) (giorni) andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura est	Ravenna	Caorle	Fondo urbano	0	0	0	0	0

Concentrazione media annuale Benzo(a)pirene andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura ovest	Parma	Cittadella	Fondo urbano	0,1782	0,1992	0,1185	0,1791	0,1771
	Modena	MO - Parco Ferrari	Fondo urbano	0,2552	0,2564	0,1876	0,1663	0,2411
Agglomerato	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	0,1192	0,1328	0,1071	0,0293	0,1167
Pianura est	Ferrara	Isonzo	Traffico urbano	0,2120	0,4122	0,1964	0,1282	0,2119
	Rimini	Marecchia	Fondo urbano	0,2793	0,3525	0,2746	0,2114	0,3403

LEGENDA Limite di legge: 1 ng/m³

Concentrazione media annuale Arsenico andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura ovest	Parma	Cittadella	Fondo urbano	0,244	0,232	0,266	0,510	0,222
	Modena	MO - Parco Ferrari	Fondo urbano	0,659	0,658	0,604	0,372	0,479
Agglomerato	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	0,260	0,208	0,265	0,203	0,267
Pianura est	Ferrara	Isonzo	Traffico urbano	0,372	0,384	0,437	0,248	0,361
	Rimini	Marecchia	Fondo urbano	0,231	0,293	0,267	0,208	0,219

LEGENDA Limite di legge: 6 ng/m³

Concentrazione media annuale Cadmio andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura ovest	Parma	Cittadella	Fondo urbano	0,083	0,085	0,089	0,117	0,114
	Modena	MO - Parco Ferrari	Fondo urbano	0,093	0,099	0,181	0,132	0,104
Agglomerato	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	0,071	0,070	0,080	0,040	0,076
Pianura est	Ferrara	Isonzo	Traffico urbano	0,133	0,164	0,127	0,092	0,116
	Rimini	Marecchia	Fondo urbano	0,099	0,131	0,121	0,168	0,159

LEGENDA Limite di legge: 5 ng/m³

Concentrazione media annuale Nichel andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura ovest	Parma	Cittadella	Fondo urbano	1,248	1,399	1,205	1,029	1,730
	Modena	MO - Parco Ferrari	Fondo urbano	1,899	1,360	1,161	1,142	1,246
Agglomerato	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	1,312	2,836	0,866	0,811	1,107
Pianura est	Ferrara	Isonzo	Traffico urbano	1,282	1,221	1,136	1,310	1,367
	Rimini	Marecchia	Fondo urbano	1,506	1,250	0,837	0,936	1,101

LEGENDA Limite di legge: 20 ng/m³

Concentrazione media annuale Piombo andamento 2018-2022

ZONA	PROVINCIA	STAZIONE	TIPOLOGIA	2018	2019	2020	2021	2022
Pianura ovest	Parma	Cittadella	Fondo urbano	0,003372	0,003290	0,003690	0,003812	0,003009
	Modena	MO - Parco Ferrari	Fondo urbano	0,004194	0,003958	0,004497	0,003886	0,003456
Agglomerato	Bologna	Giardini Margherita	Fondo urbano	0,002782	0,003073	0,002395	0,000725	0,002515
Pianura est	Ferrara	Isonzo	Traffico urbano	0,004242	0,004348	0,004463	0,00347	0,003897
	Rimini	Marecchia	Fondo urbano	0,003016	0,008479	0,002637	0,002499	0,002328

LEGENDA Limite di legge: 0,5 µg/m³

I TREND

FIGURA A
 Stima del trend delle concentrazioni giornaliere di PM_{10} , calcolato per ciascuna stazione di misura sui dati delle stazioni di monitoraggio selezionate disponibili nel periodo 2013-2022. I cerchietti indicano il trend, il colore esprime la significatività statistica (blu = diminuzione significativa; rosso = aumento significativo; grigio = trend non significativo). La barra grigia identifica l'intervallo di confidenza del 95%

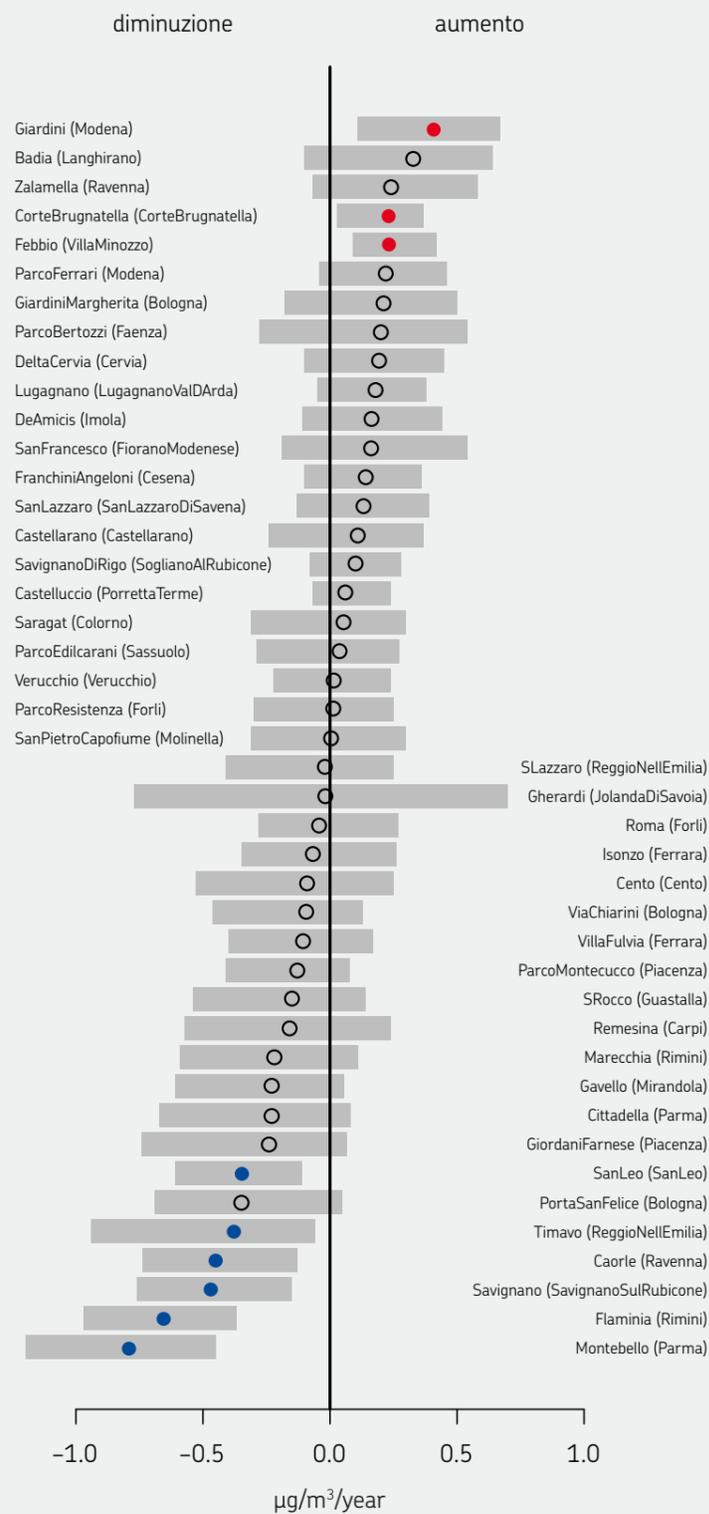


FIGURA B
 Stima del trend delle concentrazioni giornaliere di $PM_{2.5}$, calcolato per ciascuna stazione di misura sui dati delle stazioni di monitoraggio selezionate disponibili nel periodo 2013-2022. I cerchietti indicano il trend, il colore esprime la significatività statistica (blu = diminuzione significativa; rosso = aumento significativo; grigio = trend non significativo). La barra grigia identifica l'intervallo di confidenza del 95%

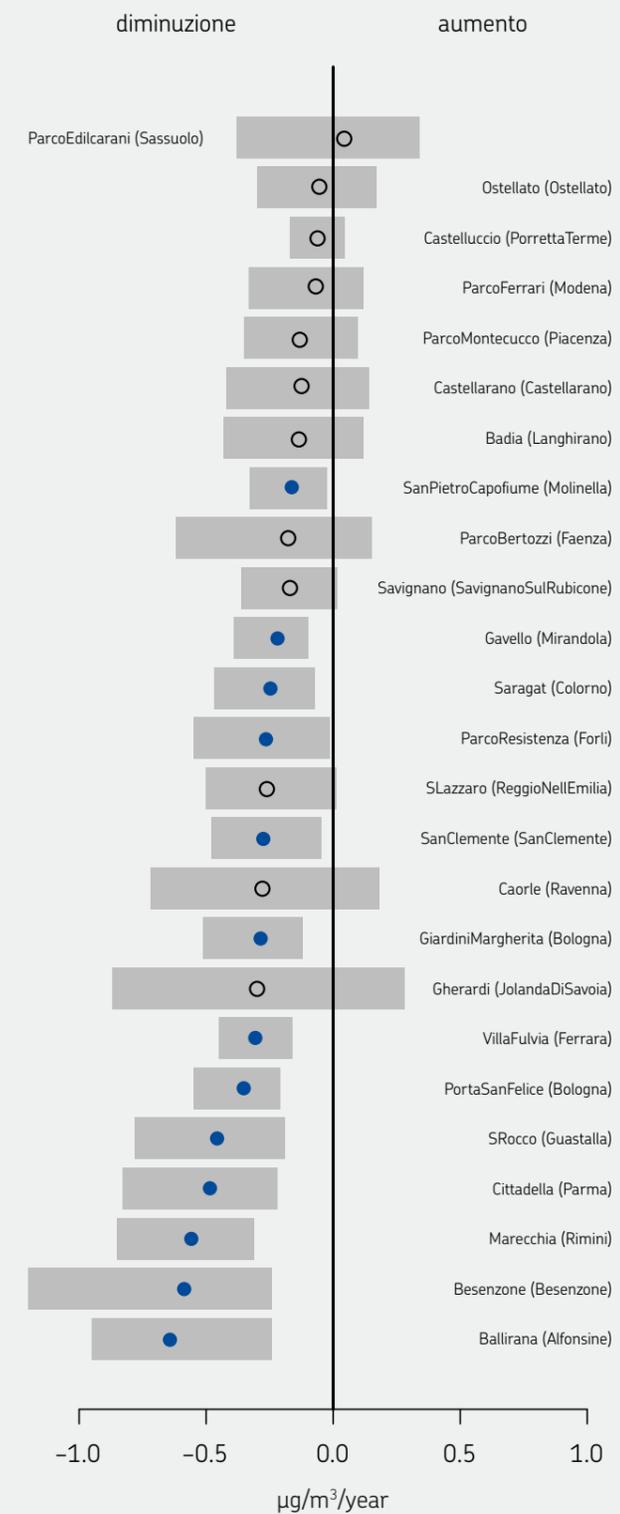


FIGURA C
 Stima del trend delle concentrazioni giornaliere di Ozono, calcolato per ciascuna stazione di misura sui dati delle stazioni di monitoraggio selezionate disponibili nel periodo 2013-2022. I cerchietti indicano il trend, il colore esprime la significatività statistica (blu = diminuzione significativa; rosso = aumento significativo; grigio = trend non significativo). La barra grigia identifica l'intervallo di confidenza del 95%

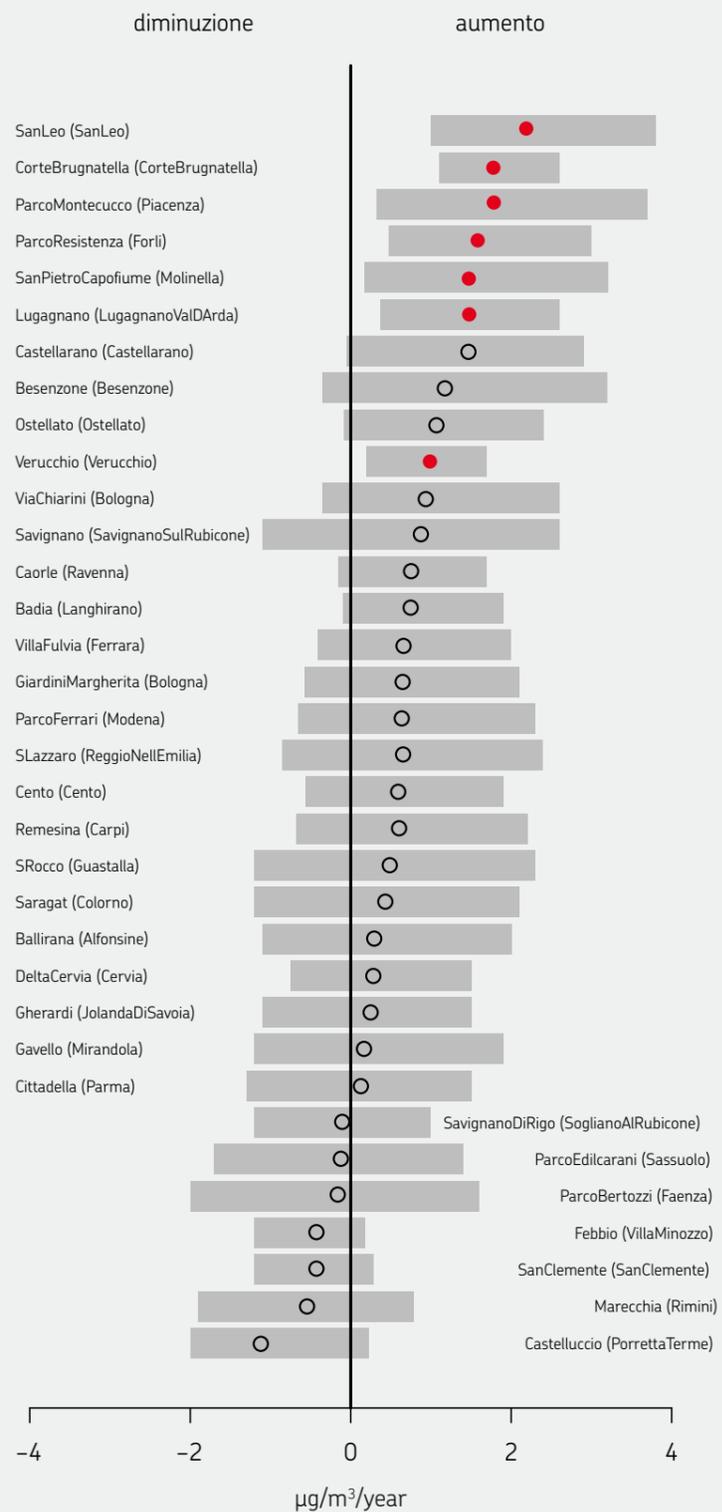
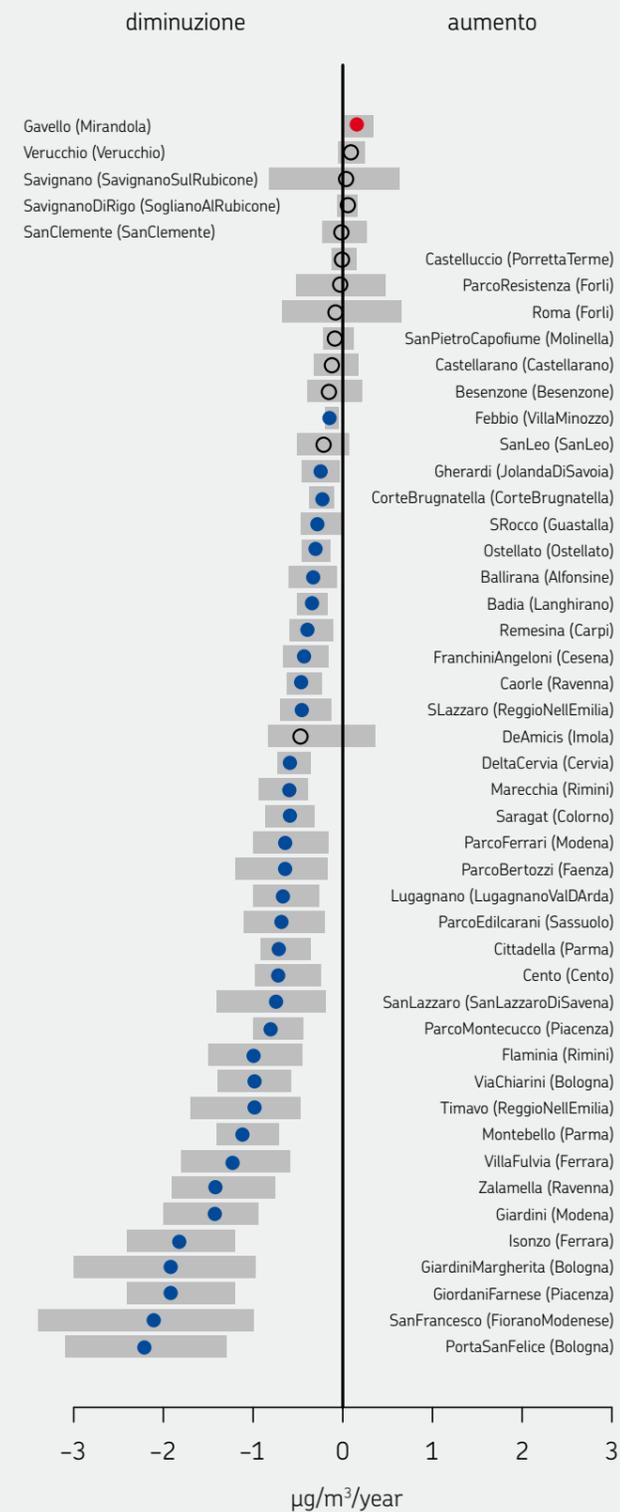


FIGURA D
 Stima del trend delle concentrazioni giornaliere di Biossido di Azoto, calcolato per ciascuna stazione di misura sui dati delle stazioni di monitoraggio selezionate disponibili nel periodo 2013-2022. I cerchietti indicano il trend, il colore esprime la significatività statistica (blu = diminuzione significativa; rosso = aumento significativo; grigio = trend non significativo). La barra grigia identifica l'intervallo di confidenza del 95%



Bibliografia



Capitolo 1

A systematic assessment of city-level climate change mitigation and air quality improvement in China

Li Zhang, Pengcheng Wu, Muchuan Niu, Yixuan Zheng, Junxia Wang, Guangxia Dong, Zhe Zhang, Zixuan Xie, Mengbing Du, Hanying Jiang, Hui Liu, Libin Cao, Lingyun Pang, Chen Lv, Yu Lei, Bofeng Cai, Yifang Zhu - *Science of The Total Environment*, Volume 839, 15 September 2022

Impact of Climate Change and Air Pollution Forecasting Using Machine Learning Techniques in Bishkek Isaev, E., Ajikeev, B., Shamyrganov, U., Kalnur, K., Maisalbek, K., Sidle, R.C. (2022). Impact of Climate Change and Air Pollution Forecasting Using Machine Learning Techniques in Bishkek. *Aerosol Air Quality Research* 22, 210336

No miracles needed Mark. Z. Jacobson - Book Cambridge University Press 2023

Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs S. Fuzzi, U. Baltensperger, K. Carslaw, S. Decesari, H. Denier van der Gon, M. C. Facchini, D. Fowler, I. Koren, B. Langford, U. Lohmann, E. Nemitz, S. Pandis, I. Riipinen, Y. Rudich, M. Schaap, J. G. Slowik, D. V. Spracklen, E. Vignati, M. Wild, M. Williams, and S. Gilardoni *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 8217–8299, 2015

Air quality and climate change: designing new win-win policies for Europe Michela Maione, David Fowler, Paul S. Monks, Stefan Reis, Yinon Rudich, Martin L. Williams, Sandro Fuzzi *Environmental Science, Policy* Vol 65, 2016, 48–57

IPCC sixth assesment report (AR6) "Climate change 2023" - Synthesis report - Fifty-eighth session of the IPCC Interlaken, Switzerland, 13 – 17 March 2023

Air quality and climate – synergies and trade-offs E. von Schneidemesser, P.S. Monks 2013 *Environmental Sciences : Processes, Impacts*, 15, 1315–1325

Megacities, air quality and climate Alexander Baklanov, Luisa T. Molina, Michael Gauss *Atmospheric Environment* Volume 126, February 2016, Pages 235–249

Chemistry and the Linkages between Air Quality and Climate Change Erika von Schneidemesser, Paul S. Monks, James D. Allan, Lori Bruhwiler, Piers Forster, David Fowler, Axel Lauer, William T. Morgan, Pauli Paasonen, Mattia Righi, Katerina Sindelarova, and Mark A. Sutton *Chem. Rev.* 2015, 115, 10, 3856–3897

Rethinking Air Quality and Climate Change after COVID-19 Joseph Ching, and Mizuo Kajino *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17(14), 5167

Capitolo 3

S. Zauli Sajani, P. Bonasoni, P. Cristofanelli, A. Marinoni P. Lauriola "Only Coarse Particles From the Sahara?", *Epidemiology* 23(4):642-3, 2012

S. Zauli Sajani, A. Trentini, S. Rovelli, I. Ricciardelli, S. Marchesi, C. Maccone, D. Bacco, S. Ferrari, F. Scotto, C. Zigola, A. Cattaneo "Is particulate air pollution at the front door a good proxy of residential exposure?" *Environmental Pollution* 213, 347e358, 2016.

S. Zauli Sajani, I. Ricciardelli, A. Trentini, D. Bacco, C. Maccone, S. Castellazzi, P. Lauriola, V. Poluzzi, R. M. Harrison "Spatial and indoor/outdoor gradients in urban concentrations of ultrafine particles and PM_{2.5} mass and chemical components" *Atmospheric Environment* 103, 307e320, 2015

Monteiro A. Durka, P., Flandorfer, C., Georgieva, Emilia, Guerreiro, Cristina, Kushta, Jonilda, Malherbe, Laure, Maiheu, Bino, Miranda, A., Santos, Gabriela, Stocker, Jenny, Trimpeneers, E., Tognet, Frédéric, Stortini, Michele, Jp, Wesseling, Janssen, Stijn, Thunis, P. (2018). Strengths and weaknesses of the FAIRMODE benchmarking methodology for the evaluation of air quality models. *Air Quality, Atmosphere, Health*. 11. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0554-8>

Stortini, M.; Arvani, B.; Deserti, M. Operational Forecast and Daily Assessment of the Air Quality in Italy: A Copernicus-CAMS Downstream Service. *Atmosphere* 2020, 11, 447. <https://doi.org/10.3390/atmos11050447>

Thunis P, Degraeuwe B, Pisoni E, Ferrari F and Clappier A 2016 On the Design and Assessment of Regional Air Quality Plans: The SHERPA Approach, *Journal of Environmental Management* 183 (Pt 3) 952–958

Mailler S., L. Menut, D. Khvorostyanov, M. Valari, F. Couvidat, G. Siour, S. Turquety, R. Briant, P. Tuccella, B. Bessagnet, A. Colette, L. Letinois, and F. Meleux, CHIMERE-2017: from urban to hemispheric chemistry-transport modeling, *Geosci. Model Dev.*, 10, 2397–2423, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2397-2017>, 2017

Baldauf, Michael, Seifert, Axel, Förstner, Jochen, Majewski, Detlev, Raschendorfer, Matthias, Reinhardt, Thorsten. (2011). Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO Model: Description and Sensitivities. *Monthly Weather Review*. 139. 3887–3905. [10.1175/MWR-D-10-05013.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05013.1).

Veratti, G.; Stortini, M.; Amorati, R.; Bressan, L.; Giovannini, G.; Bande, S.; Bissardella, F.; Ghigo, S.; Angelino, E.; Colombo, L.; et al. Impact of NO_x and NH₃ Emission Reduction on Particulate Matter across Po Valley: A LIFE-IP-PREPAIR Study. *Atmosphere* 2023, 14, 762. <https://doi.org/10.3390/atmos14050762>

Vitali, L., Cuvelier, K., Piersanti, A., Monteiro, A., Adani, M., Amorati, R., Bartocha, A., D'Ausilio, A., Durka, P., Gama, C., Giovannini, G., Janssen, S., Przybyła, T., Stortini, M., Vranckx, S., and Thunis, P.: A standardized methodology for the validation of air quality forecast applications (F-MQO): lessons learnt from its application across Europe, *Geosci. Model Dev.*, 16, 6029–6047, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-6029-2023>, 2023.

Sahu S. K., Yip S., Holland D. M. (2009): Improved space-time forecasting of next day ozone concentrations in the eastern US. *Atmos. Environ.*, 43, 494–501.

Bakar, K. S. and S. K. Sahu (2015): spTimer: Spatio-Temporal Bayesian Modeling Using R. *J. Stat. Soft.*, 63, 1–32.

Wackernagel H (2003) *Multivariate geostatistics: an introduction with applications*. Springer, Berlin

Cressie NAC (1993). *Statistics for Spatial Data*. 2nd. New York: Wiley

SITOGRAFIA

Modello Cosmo:

<http://www.cosmo-model.org/content/model/>

Modello Chimere:

<https://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>

<http://www.riatplus.eu/html/ita/home.html>

<https://www.lifeprepare.eu/index.php/azioni/air-quality-and-emission-evaluation/#toggle-id-27>

<https://www.climaera.eu/it/>

Capitolo 4

J. Sandradewi, A. Prevot, S. Sonkeszidt, N. Perron, M. R. Alfarra, V. Lanz, E. Weingartner, U. Baltensperger. Using Aerosol Light Absorption Measurements for the Quantitative Determination of Wood Burning and Traffic Emission Contributions to Particulate Matter. *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42, 3316–3323.

J. Martinsson, H. Azeem, M. K. Sporre, R. Bergström, E. Ahlberg, E. Öström, A. Kristensson, E. Swietlicki, and K E Stenström. Carbonaceous aerosol source apportionment using the Aethalometer model – evaluation by

radiocarbon and levoglucosan analysis at a rural background site in southern Sweden. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 4265–4281, 2017.

G. Lonati, M. Crippa, V. Gianelle, R. Van Dingenen "Daily patterns of the multi-modal structure of the particle number size distribution in Milan, Italy" *Atmospheric Environment* 45, 2434e2442, 2011

S. Rodriguez, R. Van Dingenen, J.-P. Putaud, A. Dell'Acqua, J. Pey, X. Querol, A. Alastuey, S. Chenery, K.-F. Ho, R. Harrison, R. Tardivo, B. Scarnato, and V. Gemelli "A study on the relationship between mass concentrations, chemistry and number size distribution of urban fine aerosols in Milan, Barcelona and London" *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2217–2232, 2007

S. Zauli Sajani, P. Bonasoni, P. Cristofanelli, A. Marinoni P. Lauriola "Only Coarse Particles From the Sahara?", *Epidemiology* 23(4):642-3, 2012

S. Zauli Sajani, A. Trentini, S. Rovelli, I. Ricciardelli, S. Marchesi, C. Maccone, D. Bacco, S. Ferrari, F. Scotto, C. Zigola, A. Cattaneo "Is particulate air pollution at the front door a good proxy of residential exposure?" *Environmental Pollution* 213, 347e358, 2016.

S. Zauli Sajani, I. Ricciardelli, A. Trentini, D. Bacco, C. Maccone, S. Castellazzi, P. Lauriola, V. Poluzzi, R. M. Harrison "Spatial and indoor/outdoor gradients in urban concentrations of ultrafine particles and PM_{2.5} mass and chemical components" *Atmospheric Environment* 103, 307e320, 2015

S. Zauli Sajani, S. Marchesi, A. Trentini, D. Bacco, C. Zigola, S. Rovelli, I. Ricciardelli, C. Maccone, P. Lauriola, D. Maria Cavallo, V. Poluzzi, A. Cattaneo, R. M. Harrison "Vertical variation of PM_{2.5} mass and chemical composition, particle size distribution, NO₂, and BTEX at a high rise building" *Environmental Pollution*, 235, 339–349, 2018.

Clemens von Bismarck-Osten, Wolfram Birmili, Matthias Ketzel, Andreas Massling, Tuukka Petäjä, Stephan Weber "Characterization of parameters influencing the spatio-temporal variability of urban particle number size distributions in four European cities" *Atmospheric Environment* 77, 415e429, 2013

Tuan V. Vu, Juana Maria Delgado-Saborit, Roy M. Harrison "Review: Particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies" *Atmospheric Environment* 122, 114e132, 2015

Capitolo 5

Chen J, Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*. 2020 Oct;143;

Huangfu P, Atkinson R. Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*. 2020 Oct;144

EEA, Air quality in Europe 2022. Health impacts of air pollution in Europe, 2022. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>

Global Burden of Disease Study, Injuries Collaborators. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*. 2020;396(10258):1204-22

Hill W, Lim EL, Weeden CE, Lee C, Augustine M, Chen K, Kuan FC, Marongiu F, Evans EJ Jr, Moore DA, Rodrigues FS, Pich O, Bakker B, Cha H, Myers R, van Maldegem F, Boumelha J, Veeriah S, Rowan A, Naceur-Lombardelli C, Karasaki T, Sivakumar M, De S, Caswell DR, Nagano A, Black JRM, Martínez-Ruiz C, Ryu MH, Huff RD, Li S, Favé MJ, Magness A, Suárez-Bonnet A, Priestnall SL, Lüchtenborg M, Lavelle K, Pethick J, Hardy S, McDonald FE, Lin MH, Troccoli CI, Ghosh M, Miller YE, Merrick DT, Keith RL, Al Bakir M, Bailey C, Hill MS, Saal LH, Chen Y, George AM, Abbosh C, Kanu N, Lee SH, McGranahan N, Berg CD, Sasieni P, Houlston R, Turnbull C, Lam S, Awadalla P, Grönroos E, Downward J, Jacks T, Carlsten C, Malanchi I, Hackshaw A, Litchfield K; TRACERx Consortium; DeGregori J, Jamal-Hanjani M, Swanton C. Lung adenocarcinoma promotion by air pollutants. *Nature*. 2023 Apr;616(7955):159-167. doi: 10.1038/s41586-023-05874-3. Epub 2023 Apr 5. PMID: 37020004

IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Outdoor Air Pollution. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum*. 2016;109:9-444. PMID: 29905447; PMCID: PMC7682275.

Li T, Yu Y, Sun Z, Duan J. A comprehensive understanding of ambient particulate matter and its components on the adverse health effects based from epidemiological and laboratory evidence. *Part Fibre Toxicol*. 2022 Nov 29;19(1):67. doi: 10.1186/s12989-022-00507-5. PMID: 36447278; PMCID: PMC9707232.

Manisalidis I, Stavropoulou E, Stavropoulos A, Bezirtzoglou E. Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Front Public Health*. 2020 Feb 20;8:14. doi: 10.3389/fpubh.2020.00014. PMID: 32154200; PMCID: PMC7044178.

Vineis P, Alfano R, Ancona C, Carra L, de' Donato F, Iavarone I, Mangone L, Martuzzi M, Michelozzi P, Petiti L, Ranzi A, Romanello M, Silenzi A, Stafoggia M (Ed.). Mitigation of climate change and health prevention in Italy: the co-benefits policy. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2021. (Rapporti ISTISAN 21/20).

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>

World Health Organization. Regional Office for Europe. (2006). Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. World Health Organization. Regional Office for Europe. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823>



Che cosa fa la Regione

ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/aria/aria



Verso il nuovo PAIR2030

ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/aria/temi/verso-il-nuovo-pair2030-1



Il sito tematico aria Arpae

www.arpae.it/it/temi-ambientali/aria



Il sito dati ambientali Arpae - capitolo aria

webbook.arpae.it/aria/index.html



La qualità dell'aria in Emilia-Romagna

EDIZIONE 2023

A cura di:



Direzione Tecnica

Largo Caduti del Lavoro, 6 - 40122 Bologna
051.5281211
urp@arpae.it
www.arpae.it
www.arpae.it/rifiuti



**Direzione Generale
Cura del Territorio e dell'Ambiente**

Via della Fiera, 8 - 40127 Bologna
051.5276078
Ambiente@Regione.Emilia-Romagna.it
www.regione.emilia-romagna.it
<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/rifiuti>

