

INQUINAMENTO DA OZONO: IL CASO PADANO



Danno da ozono su vegetazione forestale. Photo credit WSL – Istituto federale delle foreste CH

Rapporto realizzato nell'ambito della collaborazione di Legambiente con Methane Matters Coalition (www.methanematters.eu).

A cura di Damiano Di Simine e Gemma Chiaffarelli, Legambiente Lombardia

Ringraziamenti

ad ARPA Lombardia per i dati di concentrazione al suolo di metano,

a Enrico Maria Zini per la consulenza cortesemente offerta sulla valutazione dei dati emissivi

Milano, giugno 2025

INDICE

EXECUTIVE SUMMARY	1
SINTESI	5
LA PIANURA PADANA, 'HOTSPOT' EUROPEO DELL'INQUINAMENTO DA OZONO	6
LA FORMAZIONE DELL'OZONO TROPOSFERICO	6
INQUINAMENTO DA OZONO: TREND IN EUROPA	7
I PRECURSORI DELL'OZONO	9
IL CRESCENTE PESO DEL METANO COME PRECURSORE DELL'OZONO	11
IMPATTI SANITARI ED ECONOMICI DELL'INQUINAMENTO DA OZONO	13
L'OZONO COME GAS SERRA	14
OZONO IN ATMOSFERA: VALORI, LIMITI E OBIETTIVI DI QUALITÀ DELL'ARIA	15
INQUINAMENTO DA OZONO IN ITALIA E NELLA REGIONE PADANA: DATI E MAPPE	17
EMISSIONI E CONCENTRAZIONI DI METANO NELLA REGIONE PADANA	21
INDICAZIONI CONCLUSIVE	25
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	26

EXECUTIVE SUMMARY

OZONE POLLUTION: Insights from the Po Valley (Italy)

Maps produced by the European Environment Agency reveal a highly concerning picture of ground-level ozone pollution across Northern Italy ([EEA, 2025a](#)), with the **Po Valley** and its foothills ranking as Europe's worst for summer air quality. This critical situation for both human health and ecosystem integrity is driven in part by natural conditions hindering air circulation, but the root causes must be traced to **precursors emissions** (gaseous pollutants from road traffic, industrial processes, agriculture, and livestock farming) and their complex chemical reactions fostered by higher summer temperatures and solar radiation ([EEA, 2025b](#)).

This briefing explores the possible role of local methane emissions in sustaining elevated summer ozone levels, taking as a reference case the Po Valley, a densely urbanised and livestock-intensive region at the heart of Italy's ozone crisis.

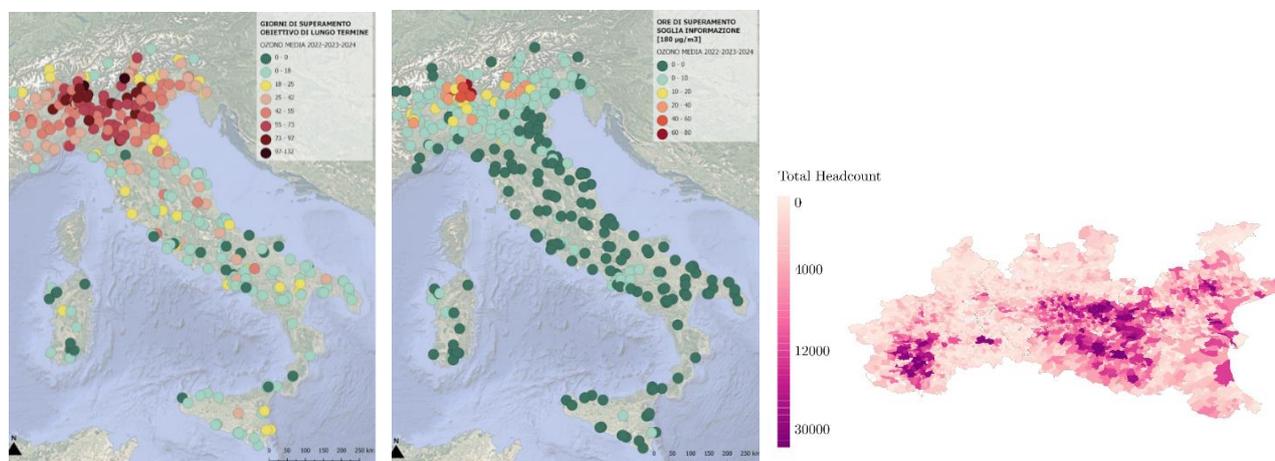
Tropospheric ozone directly interacts with living organisms damaging biological structures: it impacts **human respiratory health, agricultural crops and forest ecosystems**. Across Europe, over-threshold ozone exposure in 2022 is linked to an estimated 70,000 premature deaths, with the highest ozone-related mortality recorded in Germany (15,200 deaths), Italy (13,600), and France (9,000) ([EEA 2024a](#)). Italy showed the highest mortality rate -29 deaths per 100,000 inhabitants- surpassed only by some Balkan countries.

In 2022, one-third of Europe's agricultural land was exposed to ozone levels above the critical threshold for vegetation protection, with estimated losses of over €2 billion, based on wheat and potato yields alone ([ETC HE 2025](#)). Forests are not spared: global forest primary productivity is estimated to be reduced by 11% ([Wittig et al. 2009](#)). Moreover, ozone is a greenhouse gas which, to date, contributed approximately 0.23°C to the rise in global average temperatures ([IPCC 2021](#)).

Despite substantial efforts over recent decades to cut emissions of ozone precursors -e.g. nitrogen oxides, volatile organic compounds, carbon monoxide-, **atmospheric ozone levels have shown little improvement**. This highlights the complex chemistry of ozone formation, where even sharp reductions in precursor emissions may not lead to lower ozone concentrations.

European data reveal a largely stable trend in average ozone concentrations, with increases at urban sites and the highest values in rural and suburban stations ([EEA, 2025b](#)). Italy reflects this pattern, showing no clear signs of decline over the past decade ([ISPRA 2024](#)). Over the past three years, ozone levels in Italy have remained critically high ([ISPRA 2023, 2024, 2025](#)). Only 14% of monitoring stations met the Long-Term Objective (LTO) (www.snpambiente.it). Nearly half of stations exceeded the LTO on more than 25 days per year, the EU's legal threshold. 90% of urban background stations of district capitals surpassed this limit. Exceedances of the information threshold (180 µg/m³ hourly mean) were frequent and widespread, while those of the alarm threshold (240 µg/m³) were rare to non-existent. Exceptionally, by June 2025, Lombardy region already reported 6 alarm threshold exceedances ([ARPA Lombardia](#)).

The spatial distribution indicates higher ozone concentrations and exceedances in suburban and rural areas downwind of major emission sources (urban centres and intensive livestock farming zones). The altitude also remains a relevant factor, amplifying the effect of elevated precursor emissions. The largest exceedances occur in Lombardy, Italy's most urbanised and livestock-dense region.



Left side: days exceeding the human health threshold (=25 days) for maximum daily 8-hour ozone average; middle: hours exceeding the information threshold ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) for maximum hourly ozone concentration; 2022–2024 three-year average, with a focus on the Po Valley. Source: Legambiente elaboration based on ISPRA data (ISPRA 2022, 2023, 2024). Right side: Cattle Herds distribution in Po Valley Regions. Source: Lunghi et al. 2023

This data highlights two key issues: first, the persistent severity of ozone pollution in Northern Italy's urban and rural areas, which raises questions on **the role of local precursors concentration and seasonality**; second, the strong dependence of ozone formation on **summer weather patterns** - an issue likely to worsen under ongoing **climate change**.

Under current policy scenarios, ozone exposure levels are not expected to change substantially by 2050 (EEA, 2025b), with a projected moderate increase in UNECE countries. This is expected to result in a rise in ozone-related mortality: approximately 9,000 additional deaths (Belis and Van Dingenen, 2023). Among the precursors, **methane** shows the clearest correlation with this increase, with atmospheric concentrations nearly tripled at the global level since the pre-industrial era (NOAA Global Monitoring Laboratory). In the Northern Hemisphere, it accounts for at least **41% of anthropogenic ozone formation** (Bessagnet et al., 2024). The most relevant contribution reflects global atmospheric concentrations, with a cumulative effect from local sources.

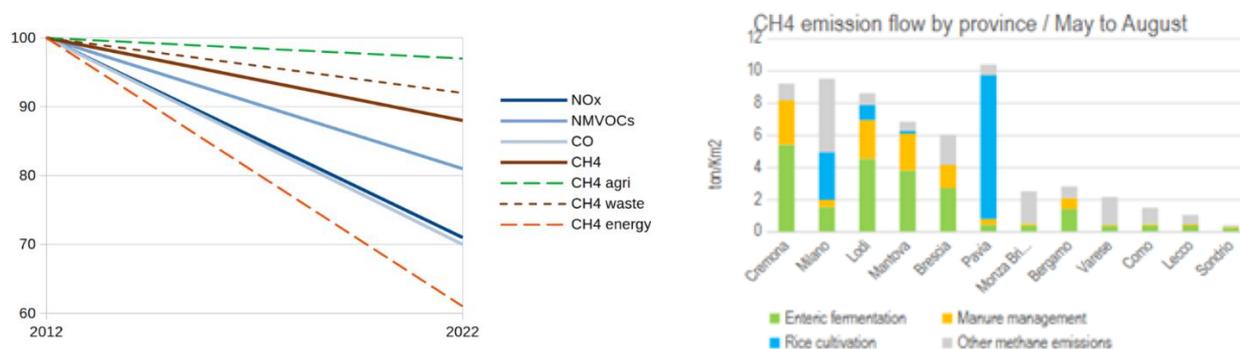
In line with European trends, methane emissions from Italy's industrial, energy, and waste sectors show a slight decline, while **agricultural emissions** remain stable (46%), driven mainly by **livestock** and, to a lesser extent, **rice cultivation** (ISPRA 2025a). The Po Valley is undoubtedly a methane emission hotspot, accounting for nearly half of Italy's total emissions due to its high cattle density and, to a lesser extent, to the presence of Europe's largest rice cultivation area (50% of European rice production). Current policies have proven insufficient to significantly curb agriculture methane emissions, which mostly originate from enteric fermentation in ruminants: meaningful reductions would require a

decrease in the overall number of raised animals. On the rice side, the adoption of low-emission irrigation practices -such as alternate wet and drying- would help locally mitigate summer peaks of methane emissions

While global methane concentrations are the key metric for assessing its role as an ozone precursor, regional emissions should not be overlooked.

A first indication in this direction comes from the spatial overlap between high cattle density areas ([Lunghi et al. 2024](#)) and high ozone levels in the Po Valley. This link is reinforced by the “**drift effect**”, whereby ozone concentrations tend to peak in rural and mountainous areas downwind of precursor emission sources. Due to the absence of a dedicated **ground-level methane monitoring network** - recommended by EU Directive 2881/2024 but not yet implemented in Italy - it is currently not possible to further investigate this potential relationship.

Provisional, spotted atmospheric methane concentration data from background, urban and rural stations in Lombardy Region ([ARPA](#)) show a 15-20% rise in methane levels in the rural station coupled to the rice paddy flooding season. Rice cultivation only contributes to 7.3% of national methane emissions. However, its concentrated spatial distribution and seasonal timing suggest possible relevant links to ozone formation. Provincial data from Lombardy region ([INEMAR 2021](#)) highlight the weight of rice-related methane emissions during the rice growing season (May to August) in rice districts (mainly, Pavia and Milan).



Left side: Emission trends of ozone precursors in Italy between 2012-2022 (2012=100). Source: Legambiente elaboration based on ISPRA data (ISPRA 2025a). Right side: Emissions flows by province and sector on May-August period, Lombardy Region – Po Valley, Northern Italy. Source: Legambiente elaboration based on INEMAR 2021 data

There is a pressing need for environmental agencies to establish ground-level methane monitoring networks - on par with those used for other key air pollutants - to better understand the dynamics at play near the earth surface and in the lower atmosphere. A clearer picture of these interactions seems essential to address the serious air quality issues observed.

This situation further underscores the urgency of meeting the targets set under the **Global Methane Pledge**, a voluntary agreement signed in 2021 by over 160 countries, aiming to cut global methane emissions by at least 30% by 2030 compared to 2020 levels. It is important to remember that methane is not only a driver of ozone formation but also a powerful greenhouse gas - just like ozone itself. Together, they have so far contributed to a

rise in global mean temperature comparable to carbon dioxide's contribution. Reducing methane emissions from agriculture will require **coordinated reduction efforts at both the national, European and global levels**. On this path, a key step is the inclusion of methane in the **National Emission Commitments Directive (NECD)**, binding member states to include methane, as ozone precursor, in their National Air Pollution Control Programs: this is crucial to achieve the Ambient Air Quality Directive and **Gothenburg Protocol** commitments, while tackling climate change. At regional level, for areas like northern Italy, this path includes intervention on emission factors: scaling down livestock densities where current levels are unsustainably high, alongside improved management of manure and slurry, and changes in water management in rice cultivation.

Report produced as part of the collaboration between Legambiente and the Methane Matters Coalition
(www.methanematters.eu)
By *Damiano Di Simine* and *Gemma Chiaffarelli*, Legambiente Lombardia
June 2025

SINTESI

L'ozono è un gas noto per la sua rilevante tossicità, che si esprime sulla salute respiratoria umana, ma anche sulle colture agricole e sulle vegetazioni forestali. Dalle mappe europee basate sui dati raccolti dalle autorità ambientali nazionali e regionali, emerge un quadro estremamente preoccupante per l'inquinamento da ozono troposferico a carico del Nord Italia, ed in particolare della pianura Padano Veneta e delle sue fasce pedemontane. Questa regione è infatti quella che presenta la peggior qualità dell'aria estiva, nel confronto con tutti gli altri territori europei.

Il quadro è aggravato dal dato di una sostanziale stabilità, nel tempo, dei livelli atmosferici medi, nonostante gli sforzi significativi per ridurre le emissioni di inquinanti primari che fungono da **precursori** della formazione di ozono: le emissioni, e di conseguenza le concentrazioni, di ossidi di azoto (NOx), composti organici volatili (VOC), ossido di carbonio (CO) sono state tutte ridotte in misura significativa negli scorsi decenni, ma a ciò non è corrisposta una significativa riduzione dei livelli di ozono. Ciò è in gran parte legato alla complessità delle reazioni chimiche in cui intervengono le molecole dei precursori. Ma una parte della spiegazione è associata al **metano**, gas anch'esso precursore dell'ozono, le cui concentrazioni sono in continua crescita a livello globale. Il presente rapporto esplora in particolare il possibile ruolo delle emissioni e delle concentrazioni locali di metano, gas che nella pianura Padano Veneta deriva primariamente dal settore agricolo, ed in particolare dal comparto zootecnico. I picchi estivi di ozono potrebbero essere in parte spiegati anche dalle emissioni legate alla coltura del riso, le cui emissioni sono complessivamente minori, ma fortemente concentrate nei mesi più caldi in cui sono più frequenti i superamenti delle soglie per l'ozono.

Emerge la necessità, per le Agenzie Ambientali, di dotarsi di una rete di monitoraggio delle concentrazioni al suolo del metano, analoga a quelle di altri inquinanti correntemente monitorati, per una migliore comprensione delle dinamiche che sottendono alla situazione riscontrata di grave inquinamento.

E' in ogni caso necessario e urgente dare seguito agli impegni assunti con la sottoscrizione del **Global Methane Pledge**, l'accordo volontario con cui 160 Paesi si sono impegnati, nel 2021, a cooperare per ridurre del 30% le emissioni di metano entro il 2030 rispetto ai livelli del 2020: ricordiamo che il metano è un gas serra, così come lo è lo stesso ozono, e che insieme questi due gas determinano un effetto riscaldante sul clima che è dello stesso ordine di grandezza di quello della CO₂.

La riduzione delle emissioni di metano nel comparto agricolo richiede strategie che puntino a ridimensionare il carico zootecnico nelle aree, come quella del Nord Italia, in cui la densità di capi allevati è eccessiva, unitamente alla diffusione di buone pratiche per la gestione degli effluenti zootecnici e al miglioramento delle tecniche e dei periodi di allagamento delle risaie.

LA PIANURA PADANA, 'HOTSPOT' EUROPEO DELL'INQUINAMENTO DA OZONO

I più recenti dati dell'Agencia Europea per l'Ambiente (EEA, 2025a) confermano lo stato di severo inquinamento da ozono che interessa il bacino Padano-Veneto, ed in modo particolarmente accentuato la sua porzione centrale, coincidente in larga misura con i territori di pianura e le fasce pedemontane e prealpine della Lombardia, dell'Emilia, del Veneto e del Piemonte orientale (Fig. 1). A questo quadro particolarmente critico per la salute umana e degli ecosistemi concorrono *condizioni naturali favorevoli* caratterizzate da scarsa ventilazione, che rallentando la dispersione degli inquinanti e ne favoriscono l'accumulo con la formazione di quello che è noto come **smog fotochimico**. Nel caso specifico tuttavia le *cause* del fenomeno vanno ricercate nelle emissioni di **precursori**, sostanze inquinanti derivanti da varie fonti: traffico, attività industriali, agricoltura e allevamento. L'ozono infatti non viene emesso in misura significativa da alcuna fonte, trattandosi di un inquinante secondario che si origina in complesse cascate di reazioni chimiche atmosferiche, attivate dalla radiazione solare energeticamente più intensa (nelle frequenze dell'ultravioletto) e che coinvolgono molecole gassose, di origine naturale o antropica. L'inquinamento da ozono alle latitudini europee è associato alla stagione calda, in cui la radiazione solare è più intensa e la durata diurna è maggiore.

Con questo report intendiamo approfondire e aggiornare il quadro dell'inquinamento da ozono in base ai dati forniti dalle stazioni di misura e dagli inventari regionali e nazionali delle emissioni, ed inoltre indagare sulle possibili cause dei valori misurati, occupandoci dunque dei precursori e, in modo più specifico, del metano.

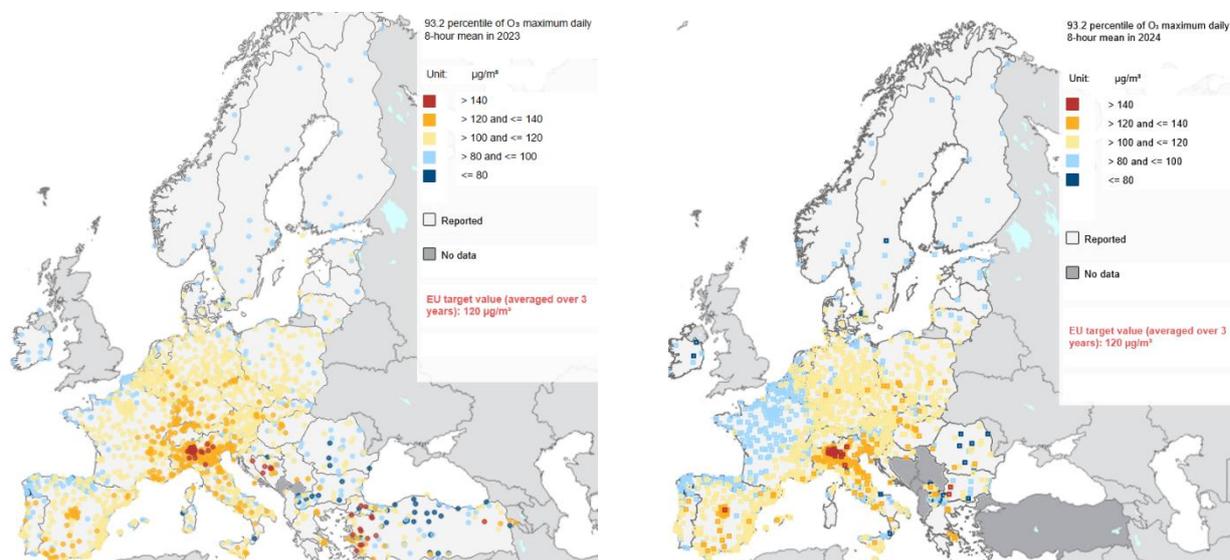


Fig. 1. Mappa dei dati di MM8 (massima media giornaliera calcolata su 8 ore) di concentrazione di ozono per i giorni di picco di inquinamento (valori al 93,2 percentile annuo) nel 2023 e 2024. Fonte: EEA, 2025a

LA FORMAZIONE DELL'OZONO TROPOSFERICO

Quando parliamo di inquinamento da ozono ci occupiamo delle concentrazioni di questo gas che si riscontrano nella troposfera, ovvero lo strato dell'atmosfera più prossimo al suolo,

a contatto con gli esseri viventi. Questa precisazione è necessaria poiché l'ozono è presente anche negli strati esterni dell'atmosfera (stratosfera), dove viceversa la sua azione è fondamentale per la vita sulla Terra, in quanto l'ozono stratosferico funziona da 'schermo protettivo' nei confronti della radiazione ultravioletta. Questa funzione in passato ha rischiato di essere compromessa a causa dell'immissione in atmosfera di grandi quantità di gas fluorurati (CFC) e altre molecole ozono-lesive: l'attuazione del protocollo di Montreal (entrato in vigore nel 1989) per ridurre la produzione e l'immissione in atmosfera di questi gas è risultata efficace ed oggi la problematica nota come 'buco nell'ozono' è in via di progressiva risoluzione e in ogni caso non è oggetto di questo report.

L'ozono (O_3) è una molecola costituita da tre atomi di ossigeno, legati tra loro da legami fortemente instabili: la ragione della tossicità dell'ozono è precisamente nella sua attitudine a ripristinare la forma stabile dell'ossigeno gassoso (O_2) liberandosi dell'atomo di ossigeno in eccesso nella forma di radicale ossigeno ($O\cdot$), una specie chimica estremamente reattiva e aggressiva anche nei confronti delle matrici biologiche (mucose nasali, vie respiratorie e congiuntive, tessuti fotosintetici nelle piante, ecc.).

La 'cascata' di reazioni chimiche da cui dipendono tanto la formazione quanto la distruzione dell'ozono atmosferico, rappresentata in modo semplificato in Fig. 2, coinvolge diverse molecole o famiglie di molecole inquinanti. Alcune di queste molecole hanno origini naturali: è il caso di diversi composti organici gassosi prodotti e rilasciati in atmosfera dalle vegetazioni, come i terpeni. L'ozono è dunque un gas inquinante che, sia pure a basse concentrazioni, è possibile reperire in località assai remote e distanti da punti emissivi riconducibili alla presenza di attività umane. Tuttavia, le concentrazioni problematiche, capaci di determinare effetti tossici più o meno severi, sono generalmente legati alla presenza di importanti fonti emissive antropogeniche.

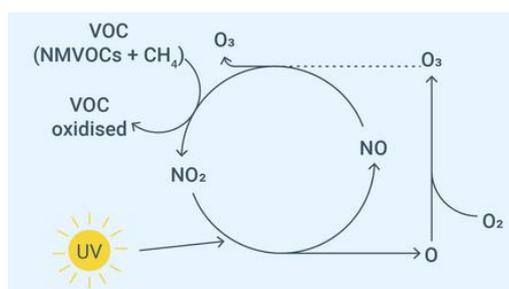


Fig. 2. Formazione dell'ozono per effetto della luce solare sulle molecole dei precursori gassosi. Fonte: EEA, 2025b

INQUINAMENTO DA OZONO: TREND IN EUROPA

L'inquinamento da ozono fino ad oggi si è rivelato scarsamente responsivo alle misure di riduzione delle emissioni. Ciò è da collegarsi in parte al peculiare meccanismo di formazione e di distruzione di questo gas: la riduzione di concentrazione di alcuni precursori molto reattivi, quali sono in particolare gli ossidi di azoto (che, nella stagione estiva, derivano principalmente dal traffico veicolare), limita allo stesso tempo le reazioni

che determinano la distruzione dell'ozono, favorendone l'accumulo. Un'altra ragione è nel ruolo crescente determinato dal metano, le cui concentrazioni regionali sono solo in parte determinate da emissioni locali, in un quadro globale di aumento delle concentrazioni di fondo di questo gas. I dati rilevati a livello europeo mostrano una sostanziale stabilità delle concentrazioni medie di ozono, con un aumento nelle stazioni urbane, in particolare in siti ad elevato traffico veicolare in cui si è verificata una riduzione delle concentrazioni di ossidi di azoto. Lievemente migliore è il dato tendenziale per quanto riguarda le concentrazioni di picco, che mostrano un trend di riduzione sia pure con una forte variabilità interannuale. Tale miglioramento è meno percepibile nei siti interessati da intenso traffico, e ciò produce una riduzione della divaricazione anche tra i valori di picco misurati nelle stazioni rurali e suburbane (più alti) e quelli misurati nelle stazioni ad intenso traffico (Fig. 3).

Secondo i dati raccolti dall'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA 2025b), nello scenario a politiche correnti il quadro dell'esposizione a ozono da qui al 2050 non è destinato a modificarsi in modo sostanziale: l'effetto della riduzione delle emissioni di precursori risulta infatti sostanzialmente neutralizzato dall'aumento delle concentrazioni di fondo di metano. Risultati molto significativi (ancorché insufficienti a raggiungere il valore guida indicato dall'OMS per la tutela della salute umana) sono conseguibili solo in uno scenario che contempli sforzi di riduzione dei precursori sia a livello europeo che globale, in particolare perseguendo la riduzione delle concentrazioni di fondo del metano e di quelle regionali degli altri precursori, attraverso interventi sulla filiera energetica e miglioramenti di carattere gestionale e tecnologico nei settori responsabili delle emissioni di metano. Un ulteriore miglioramento è conseguibile con un'azione che contempli anche un intervento sui sistemi agroalimentari, con riduzione dei consumi alimentari di carne e di prodotti di origine animale (scenario LOW, Fig. 4)

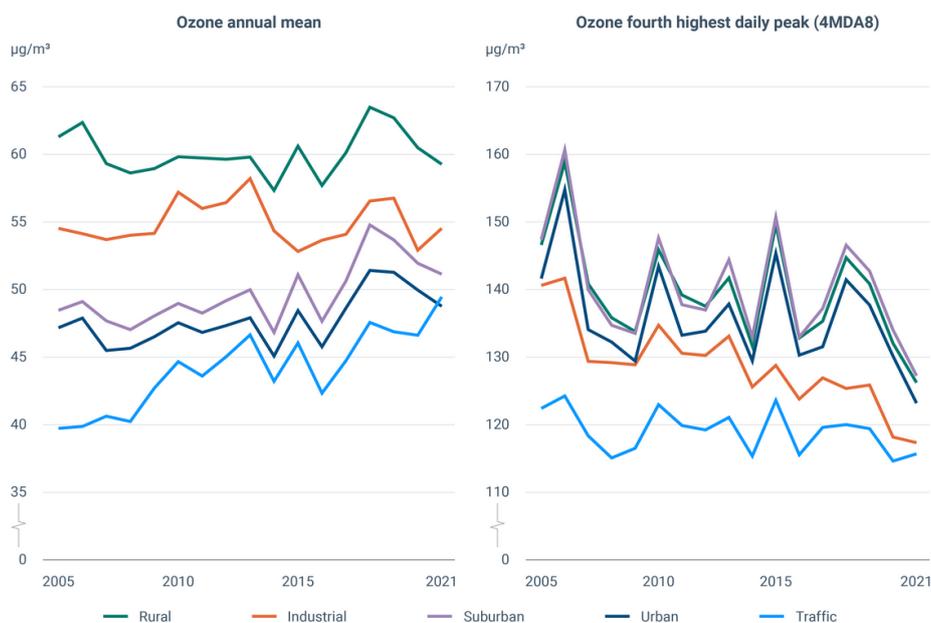


Fig. 3. Andamenti registrati a livello europeo per le concentrazioni di ozono medie (sx) e di picco (dx) nelle stazioni di misura ubicate in siti rurali, industriali, suburbani, di fondo urbani e di traffico. Fonte: EEA 2025b

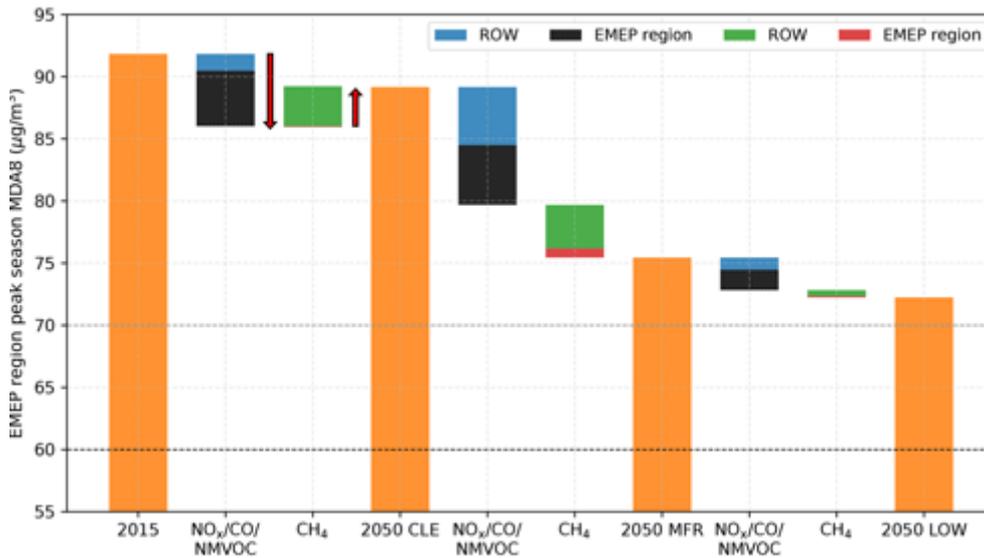


Fig. 4. Confronto a lungo termine tra due scenari per il livello di esposizione ad ozono in Europa CLE = Current Legislation; MFR = Maximum Feasible Scenario; LOW=ulteriori riduzioni riferite al sistema agri-food. EMEP = European data; ROW = Rest Of the World. Fonte: Van Caspel et al. 2024

I PRECURSORI DELL'OZONO

I precursori dell'ozono sono prevalentemente emessi dall'utilizzo di combustibili fossili, dai consumi energetici civili e dai processi industriali, dal settore agricolo e dai trasporti (Fig. 5).

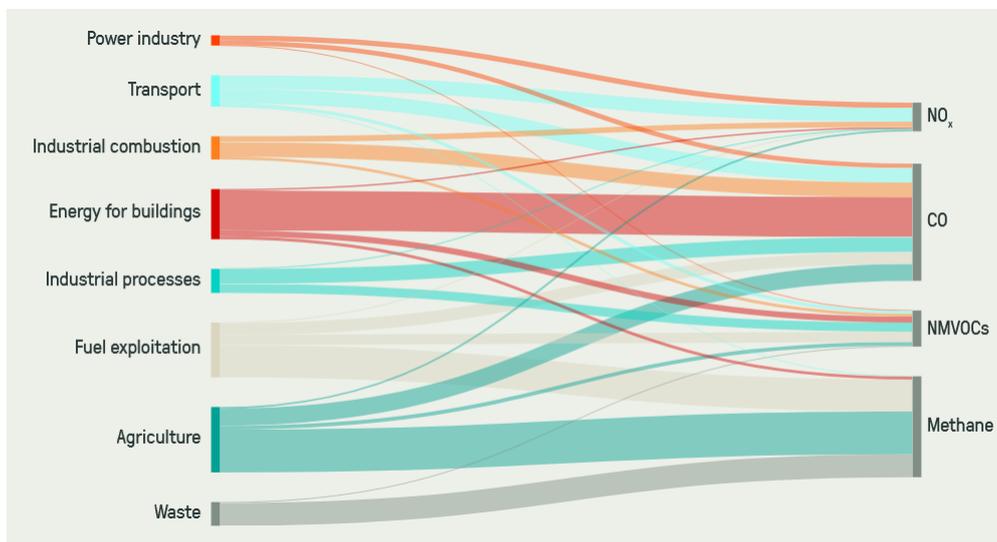


Fig. 5. Relazione tra le emissioni dei precursori dell'ozono e le loro fonti emissive, in riferimento ai diversi settori, a livello globale. Fonte: Clean Air Fund, 2024

NO_x, ossidi d'azoto. Molecole gassose che partecipano alla composizione dello smog nella stagione invernale, sono anche estremamente reattive nella catena di reazioni che portano alla formazione di ozono. Presentano una importante tossicità, in particolare il diossido d'azoto (NO₂) e sono anche precursori della formazione di particolato secondario (PM₁₀, PM_{2.5}). Si formano come prodotti secondari delle reazioni di combustione, ed in

particolare nei motori a combustione interna, soprattutto a ciclo diesel. Il settore dei trasporti è responsabile di quasi due terzi delle emissioni. Le concentrazioni atmosferiche di questi gas sono in calo in Europa come effetto di un trend emissivo in riduzione verificatosi in tutti i Paesi soprattutto grazie al miglioramento delle motorizzazioni e all'introduzione di dispositivi di abbattimento dei NO_x (Italia: - 29% nel decennio 2012-2022, EEA 2024) (Fig. 6). La molecola meno ossidata (NO, ossido d'azoto) è presente nelle emissioni, in particolare da traffico, ma tende a venire rapidamente ossidata a NO₂; pertanto, si rileva soprattutto in prossimità delle fonti emissive (elevato traffico veicolare). Sebbene i NO_x costituiscano fondamentali precursori per la formazione di ozono, la presenza di significative concentrazioni di NO determina reazioni che comportano una riduzione delle concentrazioni di ozono (fenomeno noto come *ozone titration*, Real et al. 2024), ragione per cui le stazioni di misura ubicate in contesti ad alto traffico sovente misurano livelli di ozono marcatamente inferiori rispetto alle stazioni di fondo urbano o rurale. Almeno in parte, questo comportamento dell'ossido d'azoto spiega la scarsa risposta delle concentrazioni atmosferiche di ozono alla riduzione delle emissioni di NO_x.

NMVOC (Non-Methane Volatile Organic Compounds). La categoria include tutti i composti organici presenti in atmosfera in forma di gas o vapore, con l'esclusione del metano. Si tratta di migliaia di specie chimiche differenti, alcune delle quali, ad esempio il benzene e in generale gli idrocarburi aromatici, esprimono tossicità e/o cancerogenicità. Una parte di questi composti sono di origine naturale, in quanto derivano dal metabolismo di organismi viventi, in particolare vegetali; tuttavia, le emissioni di fonte antropica hanno assunto un ruolo estremamente rilevante, derivando in particolare da emissioni del settore industriale, dei trasporti, dell'energia e dell'agricoltura. Una quota rilevante di emissioni di NMVOC deriva dall'evaporazione di solventi e combustibili, impiegati nel settore industriale, nella lavorazione e utilizzo di derivati petroliferi, negli usi domestici e nei trasporti. Le emissioni di fonte agricola esalano in larga maggioranza dalle attività di allevamento. In Europa il trend emissivo è in calo in tutti i settori esclusa l'agricoltura, dove le emissioni di NMVOC sono stabili. In Italia nel decennio 2012-2022 le emissioni complessive di NMVOC sono calate del 19% (Fig. 6), in virtù di normative sempre più stringenti relative al settore industriale, mentre la quota emissiva di NMVOC di fonte agricola è passata dal 12 al 15% del totale (EEA 2024)

CO, Ossido di Carbonio. Anche l'ossido di carbonio, molecola che si forma nelle combustioni, in particolare in carenza di ossigeno, è un precursore della formazione di ozono. A livello globale le emissioni di CO hanno raggiunto un picco negli anni '90 legato soprattutto al ricorso crescente a combustibili fossili solidi e liquidi in processi di combustione (Hoesly et al. 2024). Da allora le emissioni globali sono in calo, oltre che per il miglioramento dei processi produttivi e delle motorizzazioni, anche per la crescita dell'impiego del gas naturale in sostituzione di carbone e petrolio. A livello globale la combustione di biomasse e le pratiche agricole basate sulla bruciatura dei residui colturali o sulla rigenerazione del pascolo tramite incendio costituiscono una causa rilevante di emissioni di CO. In Italia la riduzione delle emissioni di CO è stata particolarmente accentuata negli anni '90 del secolo scorso e prosegue fino ad oggi, guidata in larga misura

dai miglioramenti delle motorizzazioni nel settore dei trasporti. Nel decennio 2012-2022 le emissioni si sono ridotte del 30% (Fig. 6) (ISPRA 2025b).

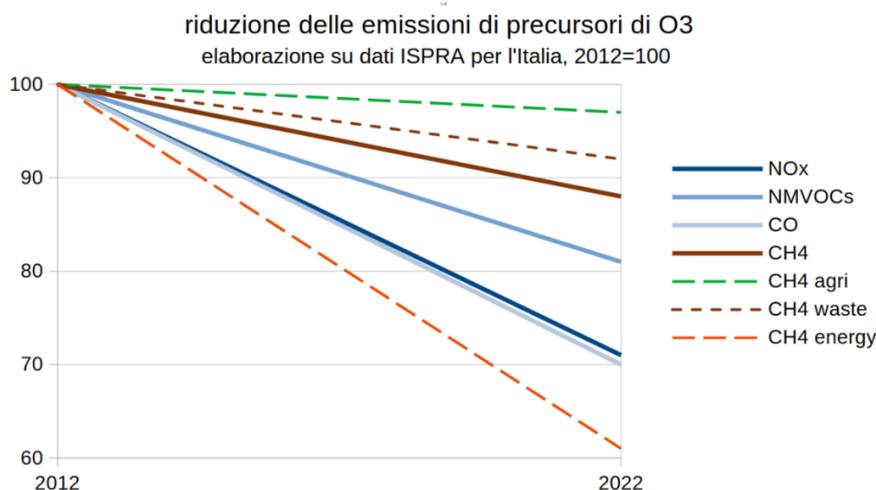


Fig. 6. Tendenza delle emissioni di precursori di O₃ in Italia, dal 2012 al 2022. Fonte: elaborazione dati Ispra (ISPRA 2025a e 2025b)

IL CRESCENTE PESO DEL METANO COME PRECURSORE DELL'OZONO

Sebbene il metano sia meno reattivo rispetto agli altri precursori dell'ozono, il suo ruolo nella formazione di questo inquinante è in continua crescita, correlata alle crescenti concentrazioni atmosferiche di questo gas, sia pure in presenza di trend emissivi che sono in calo a livello europeo e nazionale, almeno per quanto riguarda la fonte industriale/energetica (Fig. 6). In lieve calo anche le emissioni provenienti dalla gestione dei rifiuti mentre sono stazionarie le emissioni del settore agricolo derivanti principalmente dal settore zootecnico (metano enterico e derivante da gestione delle deiezioni) e secondariamente dalla coltivazione del riso (ISPRA 2025a, Fig. 6). Nonostante ciò, le concentrazioni del metano sono in crescita, per effetto delle concentrazioni di fondo legate alle emissioni globali: a livello globale, le concentrazioni atmosferiche di metano sono quasi triplicate rispetto a quelle dell'era preindustriale, e i dati più recenti collocano la concentrazione media annua a circa 1935 ppb (parti per miliardo, frazione molare) (Fig. 7). Nell'emisfero Nord, le concentrazioni di questo gas serra aumentano con la riduzione della latitudine, e i dati di fondo per il nord Italia, misurati presso la stazione di misura del Monte Cimone in Emilia Romagna afferente alla piattaforma europea di osservazione ICOS (www.icos-cp.eu), si attestano a valori superiori a 2000 ppb (Fig. 8): si tratta di valori di gran lunga superiori, circa due ordini di grandezza, rispetto a quelli degli altri precursori, e questo spiega il peso crescente del metano come precursore di ozono. Si stima che, nell'emisfero Nord, il metano determini la formazione di una quota di ozono pari ad almeno il 41% del totale attribuibile a fonti antropogeniche (Bessagnet et al. 2024).

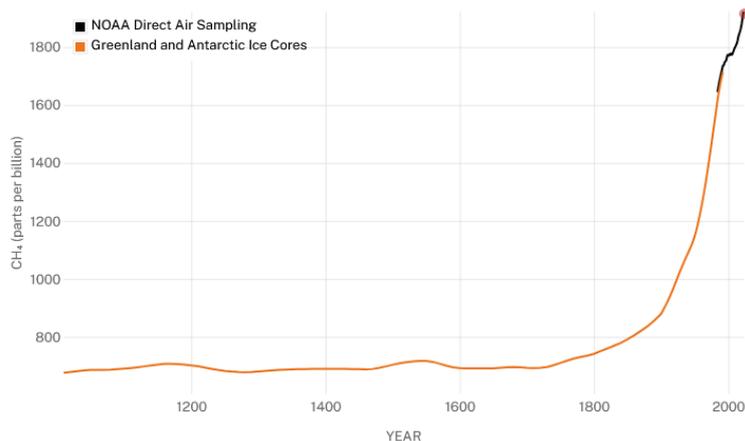


Fig. 7. Concentrazioni di metano medie globali, da misure di carote di ghiaccio e rilevamenti atmosferici diretti.
Fonte: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/methane/>

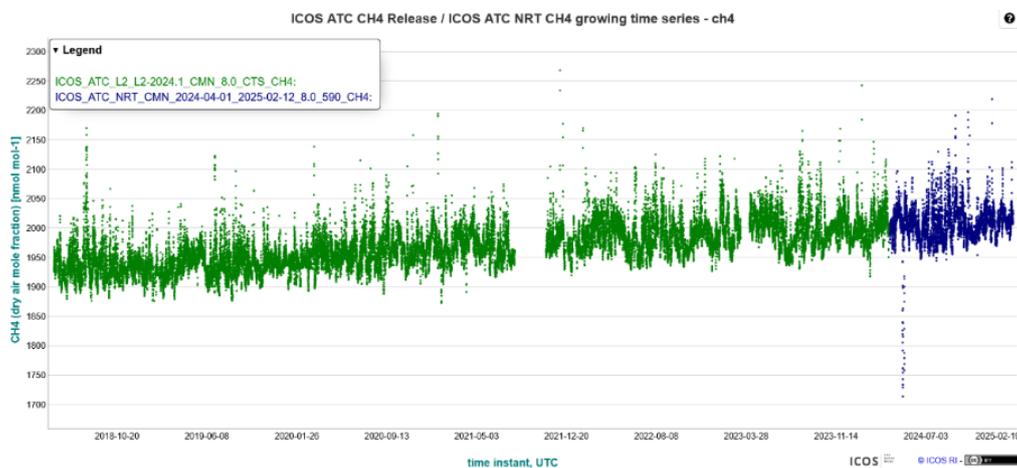


Fig. 8. Concentrazioni di metano di fondo, Nord Italia, M.te Cimone https://data.icos-cp.eu/dygraphlight/?objId=JeHHxSu8J1XeP9PiQoZeUNS,KINnAboi_kHTvSu6nWPTXtTS&x=TIMESTAMP&ty pe=point&linking=overlap&y=ch4

Nei Paesi UNECE (Nord America ed Europa), pur a fronte di una significativa riduzione delle emissioni di altri precursori, per l'ozono il dato tendenziale, a politiche correnti, indica al 2050 un moderato aumento dei livelli di esposizione, a cui corrisponde un aumento della mortalità ozono-correlata (+9.000 rispetto ai 64.000 morti/anno stimati in Europa nel 2020) (Belis e Van Dingenen 2023). Tra i precursori, è il metano il gas a cui appare più chiaramente correlato l'aumento, con un ruolo prevalente attribuito alle emissioni prodotte nel resto del mondo rispetto a quello prodotto nei paesi UNECE in cui il peso delle emissioni di altri precursori, sebbene in calo, continua ad essere più rilevante (Belis e Van Dingenen 2023, Fig. 9).

È evidente dai dati qui esposti come la sfida della riduzione delle concentrazioni atmosferiche di metano (e, conseguentemente, dell'inquinamento da ozono) non possa prescindere da uno sforzo coordinato a livello globale, di cui il Global Methane Pledge (GMP) rappresenta ad oggi il primo concreto approccio. L'impegno alla riduzione (del 30% nel decennio 2020-2030) continua purtroppo ad apparire difficilmente raggiungibile a meno di una moltiplicazione degli sforzi che, soprattutto per l'Europa e l'Italia, non possono

continuare ad essere circoscritti al solo efficientamento nell'estrazione, distribuzione e utilizzo del gas naturale, ma devono includere tutte le fonti emmissive rilevanti di metano, che non sono solo fonti fossili ma si riferiscono al settore dei rifiuti e a quello dell'agricoltura e, in particolare, della zootecnia.

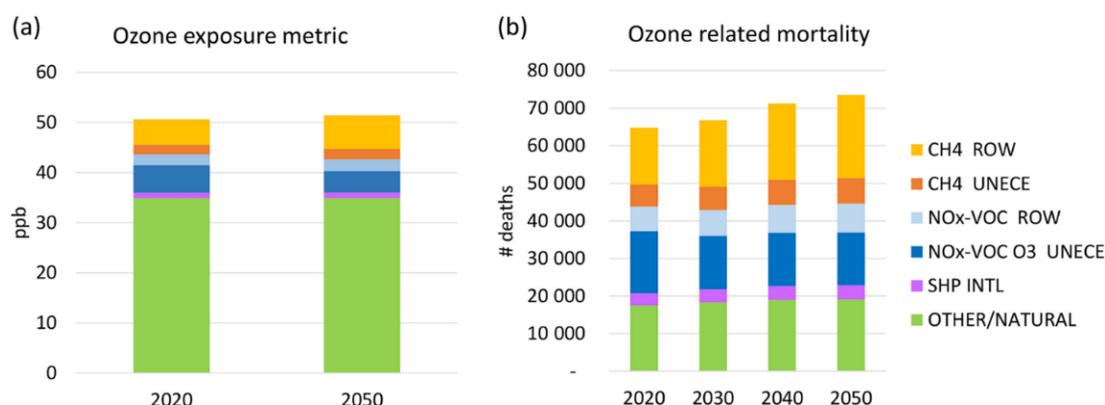


Fig. 9. Livelli di esposizione e mortalità ozono-correlata, stime al 2050 ripartita per tipologia di precursori nei Paesi UNECE (ROW, Rest Of the World; SHP INTL precursori da navigazione marittima e aerea internazionale). Fonte: Belis e Van Dingenen 2023

IMPATTI SANITARI ED ECONOMICI DELL'INQUINAMENTO DA OZONO

Gli impatti dell'ozono si esprimono sia a livello di salute umana (malattie respiratorie e mortalità) che di salute delle piante, e quindi delle produzioni agricole.

A livello europeo 70.000 morti premature all'anno sono imputate all'esposizione a concentrazioni di ozono superiori alle soglie di lungo termine di $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (EEA 2024a). Le nazioni con la maggiore mortalità dovuta all'ozono nel 2022 sono state la Germania (15.200), Italia (13.600) e Francia (9.000) (Tab. 1). Tra le tre, l'Italia registra il tasso di mortalità più elevato (29 morti ogni 100.000 abitanti), tasso superato a livello europeo solo nell'area balcanica (Croazia, Albania, Bosnia Erzegovina, Montenegro, Serbia). La situazione non è differente per quanto riguarda il numero di anni di vita persi (EEA 2024a). Non sono inclusi nel computo gli impatti indiretti sulla salute umana imputabili ai suoi effetti sull'innalzamento delle temperature, in quanto gas a effetto serra, legati ad esempio alla crescita di malattie infettive, problemi cardiovascolari e cardiaci.

Tab. 1. Morti stimate nel 2022 attribuibili all'inquinamento da ozono in Italia, Germania, Francia, le nazioni coi maggiori tassi di mortalità, confrontati col dato per l'Unione Europea-27 (EEA 2024a).

	Popolazione totale (migliaia)	Popolazione > 30 anni (migliaia)	O ₃ media semestrale MM8 (media mobile oraria)	Morti attribuibili a O ₃		Anni di vita persi (YLL) dovuti a O ₃	
				N.	N./100.000	N.	N./100.000
Italia	59.030	42.749	103,7	13.600	29	119.700	261
Germania	83.235	58.386	93,5	15.200	24	146.300	231
Francia	65.795	42.817	92,8	9.000	19	94.100	202
UE27	441.561	303.974	92,2	70.000	21	689.000	209

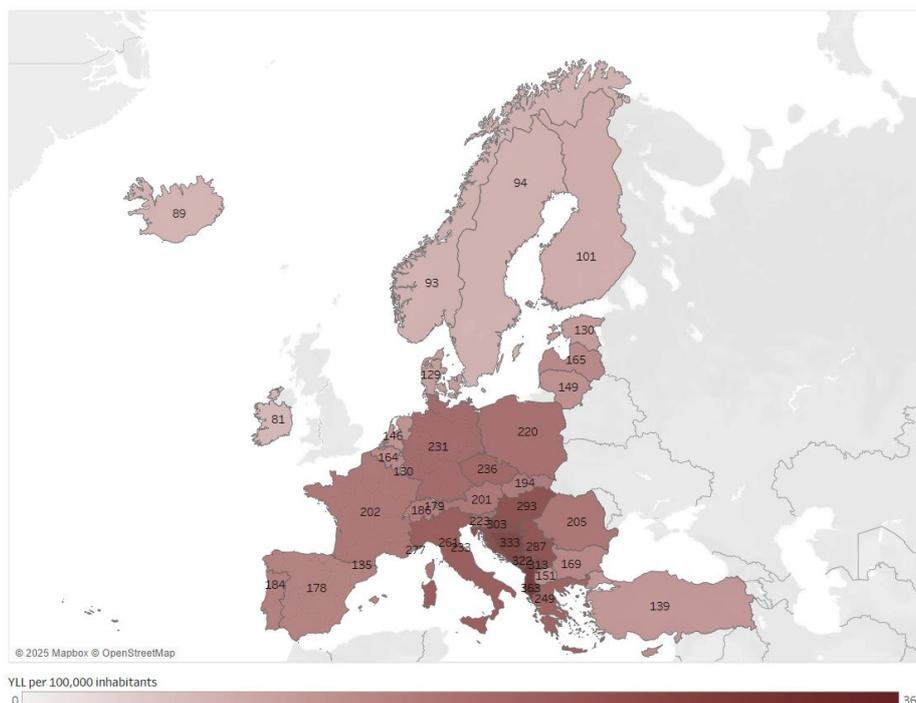


Fig. 10. Mortalità dovuta a esposizione a lungo termine a O₃

(<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/harm-to-human-health-from-air-pollution-2024?activeTab=9b9e0a51-6df8-45c4-ae95-0e3d35d4406f>)

L'effetto ossidante dell'ozono altera le funzioni fisiologiche delle piante, generando danni visibili come clorosi, necrosi e invecchiamento fogliare anticipato. Questi effetti compromettono le attività fotosintetiche e di trasporto dei nutrienti con conseguente riduzione dei tassi di crescita, produttività in termini di numero e dimensione dei semi. Questi effetti, oltre a intaccare la salute degli ecosistemi naturali, comportano impatti significativi sulle produzioni agricole. Nel 2022, un terzo delle terre coltivate a livello europeo è stato esposto a valori di ozono superiori alla soglia per la protezione della vegetazione, comportando una perdita di almeno 2 miliardi di euro (stime basate sulle sole produzioni di grano e patate) (ETC HE 2025). Se le emissioni di precursori non venissero ridotte, al 2030 si avrebbe il 5-26% di perdite nei raccolti globali di grano, il 15-19% di soia, il 4-9% di mais, esclusivamente imputabili ai danni da ozono (Avnery et al. 2011).

In parallelo, la produttività primaria delle foreste è a sua volta impattata, con una riduzione stimata dell'11% a livello globale dovuta all'ozono, compromettendo le loro funzioni di sequestro del carbonio atmosferico e quindi riducendo la loro efficacia nella mitigazione del cambiamento climatico (Wittig et al. 2009).

L'OZONO COME GAS SERRA

Oltre agli impatti come inquinante, l'ozono è anche un gas a effetto serra incluso insieme al metano, al protossido di azoto, al *black carbon* e ai gas fluorurati tra i "super inquinanti", per

il loro potenziale di riscaldamento climatico significativamente maggiore della CO₂. Rispetto alla CO₂, la sua emivita in atmosfera è però molto più breve.

Le concentrazioni troposferiche dell'ozono sono aumentate in maniera significativa nell'ultimo secolo: si stima un aumento del 2-12% per decade, dal 1995 ad oggi, con forte variabilità regionale (Clean Air Fund 2024). All'azione climalterante dell'ozono è attribuito un aumento di circa 0,23°C della temperatura media globale rispetto ai valori preindustriali (1750) (Fig. 11, IPCC 2021). A livello globale, il 40% di questo riscaldamento è attribuibile al metano in quanto precursore dell'ozono (dato che si somma al potere climalterante proprio del metano, e che complessivamente determina, per il metano, un contributo al riscaldamento climatico di circa 0,5°C, IPCC 2021), mentre il 56% è attribuibile alla somma di NMVOC, CO e NO_x. La distribuzione regionale delle concentrazioni di ozono fa sì che gli effetti climalteranti siano maggiormente percepiti nelle regioni con maggiori livelli di ozono troposferico.

Nonostante questo suo ruolo non secondario nei confronti del riscaldamento climatico, l'ozono non è incluso nelle agende per il clima né globali (tra cui l'accordo di Parigi), né nazionali o regionali; così come i suoi precursori non sono presi in considerazione dei report climatici della UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).

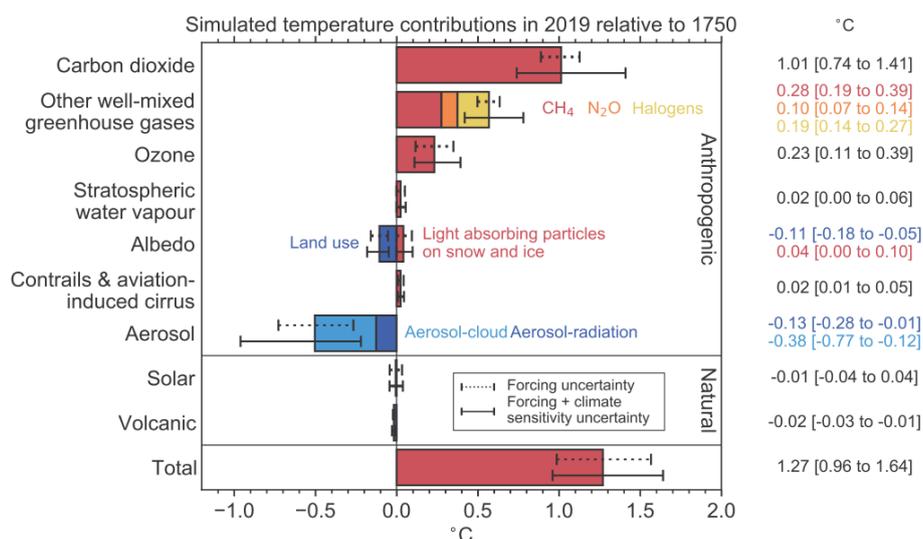


Fig. 11. Il contributo climalterante dell'ozono (cambiamento della temperatura media globale al 2019 rispetto al 1750), confrontato coi contributi degli altri principali gas serra. Fonte: Ipcc 2021

OZONO IN ATMOSFERA: VALORI, LIMITI E OBIETTIVI DI QUALITÀ DELL'ARIA

L'ozono è un inquinante particolare, a causa della sua genesi e della sua distruzione ad opera di reazioni chimiche che avvengono in atmosfera e che richiedono l'esposizione a luce solare. In conseguenza di ciò, i livelli di inquinamento sono soggetti a spiccata variabilità sia stagionale (coerentemente con la durata diurna) che giornaliera (riduzione nelle ore di buio, aumento e accumulo nelle ore di luce). Inoltre la complessità dell'interazione con le molecole di precursori e il trasporto delle masse d'aria a lunga

distanza determinano effetti macroscopicamente differenti che possono apparire spazialmente controintuitivi: ad esempio nell'aria delle città, con intense emissioni da traffico, l'ozono viene prodotto rapidamente ma altrettanto rapidamente distrutto dai medesimi precursori (in particolare gli ossidi di azoto, NO_x); mentre lo stesso gas, trasportato in aree rurali o montane prossime a grandi concentrazioni di fonti emmissive, ma dove le concentrazioni di altri inquinanti sono più basse, risulta molto più stabile e tende ad accumularsi, con la possibilità di determinare concentrazioni decisamente più elevate di quelle urbane.

Nel valutare gli impatti, inoltre, occorre considerare che l'ozono è tossico sia per gli animali che per i vegetali; dunque, riguarda la salute ma anche la produttività delle vegetazioni, forestali e coltivate, con effetti e condizioni di esposizione differenti. A questa complessità corrisponde un composito sistema di indicatori e di valori di riferimento.

Gli indicatori e i livelli di riferimento

- MM8. La sigla indica la media mobile oraria, calcolata giornalmente, come media su un intervallo delle 8 ore consecutive con concentrazioni maggiori di ozono (solitamente negli orari pomeridiani e serali). Può essere calcolato anche come media semestrale riferita ai 6 mesi consecutivi con la più alta concentrazione media mobile di O₃.

- NET60 (Number of Exceedances above a Threshold of 60ppb). È la media triennale del numero di giorni di superamento della vigente soglia critica di 120 µg/m³ (=60 ppb) basata sul parametro MM8. Il massimo attuale nella UE è fissato a 25 (93,2^{mo} percentile dell'anno solare), e a 18 (95^{mo} percentile) per gli anni successivi al 2030 per effetto del recepimento della direttiva 2024/2881 UE, con obiettivo a lungo termine di zero superamenti.

- AOT40 (Accumulated exposure Over Threshold of 40 ppb). È il parametro di riferimento per gli effetti dell'ozono sulla vegetazione, si ottiene dalla somma delle differenze positive tra le misure orarie effettuate tra le ore 8.00 e le ore 20.00 CET e il valore di 80 µg/m³(=40 ppb) nell'arco dell'anno o di una definita stagione vegetativa.

- AOT40-v. È il parametro di AOT40 per le colture agricole, elaborato come media su 5 anni e calcolato dal 1 maggio al 31 luglio.

- AOT40-f. È il parametro di AOT40 per le vegetazioni forestali, elaborato come media su 5 anni e calcolato dal 1 aprile al 30 settembre.

- AOT60 (Accumulated exposure Over Threshold of 60 ppb). È un parametro per gli effetti dell'ozono sulla salute umana, si ottiene dalla somma delle differenze positive tra le misure orarie e il livello critico di 120 µg/m³ (=60 ppb) nell'arco dell'anno. Previsto dalla direttiva 2001/81/EC (NEC – National Emission Ceilings – Directive) con l'obiettivo di riduzione di 2/3 del valore entro il 2010, non è stato ripreso dalle successive direttive.

- Soglia di informazione è il valore numerico della singola media oraria delle concentrazioni di ozono, superato il quale si determina un obbligo di informazione alla cittadinanza.

- Soglia di allarme è il valore numerico della singola media oraria delle concentrazioni di ozono, superato il quale (per almeno 3 ore consecutive) si determina un obbligo di attivazione di misure di limitazione per la protezione della salute umana.

La tab. 2 riepiloga le soglie di riferimento adottate a livello normativo per i principali indicatori.

Tab. 2. Soglie identificate a livello normativo per i principali indicatori dell'ozono.

Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	MM8 valore medio semestrale	MM8 giornaliero	Soglia di informazione (dato orario)	Soglia di allarme (dato orario)	AOT40-c media di 5 anni	AOT40-f media di 5 anni
Normativa vigente Dir 2008/50/CE		120 da non superare più di 25 gg/anno	180	240	18.000	18.000
Nuova Direttiva UE 2024/2881		120 da non superare più di 18 gg/anno (=95° percentile, dal 2030) 100 al 99°percentile, valore ob, 2050	180	240	18.000 6.000 (ob. 2050)	
Soglie OMS (WHO 2021) e UNECE	60	100 (al 99° percentile)				10.000 (UNECE)

INQUINAMENTO DA OZONO IN ITALIA E NELLA REGIONE PADANA: DATI E MAPPE

Trend

In linea con le tendenze registrate a livello europeo, l'ozono non mostra trend di diminuzione, diversamente da altri gas inquinanti tra cui i suoi precursori. L'ultimo rapporto Ispra "Qualità dell'aria nel 2024" evidenzia come non sia possibile individuare tendenze statisticamente significative per questo gas nell'ultimo decennio (dati 2014-2023, ISPRA 2025c). Le oscillazioni che si osservano tra un anno e l'altro sono fortemente influenzate dalle fluttuazioni dei fattori stagionali.

Sempre in linea col dato europeo, i valori di picco vedono invece una diminuzione, associata a una riduzione degli episodi di superamento delle soglie di informazione e allarme, ovvero al superamento circoscritto ad alcune ore nel periodo estivo di livelli medi orari particolarmente elevati, al punto di determinare effetti di tossicità acuta.

Se consideriamo i centri cittadini principali del bacino padano (capoluoghi di provincia per le regioni Piemonte, Lombardia, Veneto, Emilia-Romagna), i valori di fondo delle stazioni urbane mostrano un trend tendenzialmente stabile negli ultimi 30 anni (dati Ispra 1992-2022), per quanto riguarda il superamento della soglia di obiettivo di lungo termine (OLT: $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di MM8 giornaliero) (Fig. 12). I superamenti vedono importanti fluttuazioni tra un anno e l'altro. I maggiori picchi sono in concomitanza di annualità con condizioni meteorologiche estreme: le alte temperature del 2003 e 2022 sono associate a picchi nei

superamenti, mentre il 2014, anno che ha registrato una forte piovosità primaverile-estiva, registra un crollo nei valori di ozono sopra soglia.

Questi dati da un lato evidenziano l'elevata e persistente criticità legata all'inquinamento da ozono nel Nord Italia (tutti i valori medi sono superiori al limite massimo di 25 superamenti all'anno della soglia OLT); dall'altro lato, confermano la forte dipendenza delle concentrazioni di ozono dalle condizioni meteorologiche estive, criticità che appare destinata ad accentuarsi a causa dei cambiamenti climatici in atto, con crescita delle condizioni di disagio termico acuite dagli effetti dell'inquinamento da ozono.

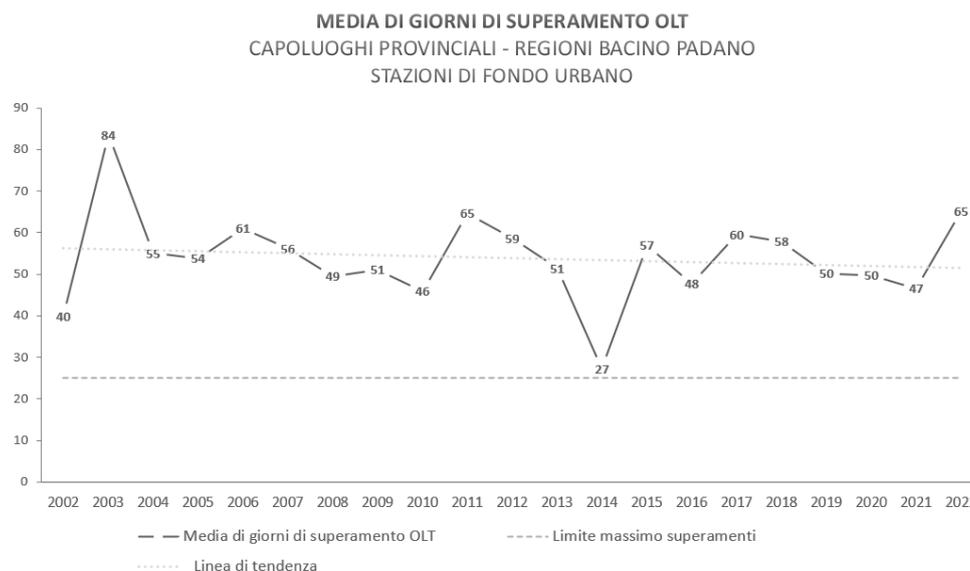


Fig. 12. Media di giorni di superamento dell'obiettivo di lungo termine (OLT) in stazioni di fondo urbano collocate nei capoluoghi di provincia delle 4 regioni del bacino padano (Piemonte, Lombardia, Veneto, Emilia-Romagna) (elaborazione da dati ISPRA).

I dati più recenti

Le concentrazioni di ozono negli ultimi 3 anni (2022-2024) mostrano una situazione fortemente critica, in linea con le tendenze descritte: in media, solo il 14% delle stazioni di rilevamento presenti sul territorio italiano ha rispettato l'obiettivo di lungo termine (OLT) (<https://www.snpambiente.it>). In media, il 48% delle stazioni ha registrato un superamento dell'OLT per più di 25 giorni, con un picco massimo nel 2022 (57% delle stazioni), anno caratterizzato da estremi di temperature e aridità estiva (<https://www.snpambiente.it>).

I superamenti della soglia di informazione ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ come media oraria) sono stati numerosi e diffusi, mentre i superamenti della soglia di allarme (oltre $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sono stati fortunatamente molto episodici, almeno nelle aree urbane.

I dati dei centri urbani

Considerando le aree urbane del bacino padano, l'area maggiormente impattata a livello nazionale, negli ultimi 3 anni (2022-2024), la quasi totalità (90%) dei capoluoghi di provincia ha registrato più di 25 superamenti dell'obiettivo di lungo termine (Tab. 3).

Tab. 3. Media dei giorni di superamento dell'obiettivo di lungo termine (OLT: 120 µg/m³) negli anni 2022, 2023 e 2024 nelle stazioni urbane dei capoluoghi di provincia delle quattro regioni del bacino padano. Fonte: elaborazione su dati Ispra (ISPRA 2022, 2023, 2024).

Comune	Nome stazione	Giorni di superamento OLT
Bergamo	BERGAMO - VIA MEUCCI	90
Piacenza	PARCO MONTECUCCO	78
Vercelli	Vercelli - CONI	75
Milano	MILANO - VERZIERE	74
Lecco	LECCO VIA SORA	73
Lodi	LODI S.ALBERTO	71
Modena	PARCO FERRARI	70
Verona	VR- Giarol Grande	67
Vicenza	VI - Quartiere Italia	64
Brescia	BRESCIA VILLAGGIO SERENO	63
Torino	Torino - Rubino	62
Padova	PD - Mandria	62
Cremona	CREMONA VIA FATEBENEFRATELLI	61
Reggio nell'Emilia	S. LAZZARO	57
Rovigo	RO - Borsea	56
Varese	VARESE - VIA VIDOLETTI	56
Como	COMO - VIALE CATTANEO	55
Pavia	PAVIA - VIA FOLPERTI	55
Vicenza	VI - Ferrovieri	55
Mantova	MANTOVA SANT'AGNESE	52
Torino	Torino Lingotto	52
Forlì	PARCO RESISTENZA	51
Parma	CITTADELLA	50
Monza	MONZA - VIA MACHIAVELLI	50
Bologna	GIARDINI MARGHERITA	48
Venezia	VE - Parco Bissuola	47
Novara	Novara - Arpa	47
Treviso	TV - Via Lancieri di Novara	46
Asti	Asti - D'Acquisto	44
Alessandria	Alessandria - Volta	44
Ferrara	VILLA FULVIA	43
Verbania	Verbania - Gabardi	38
Milano	MILANO PASCAL CITTA' STUDI	35
Venezia	VE - Sacca Fisola	33
Biella	Biella - Sturzo	27
Cuneo	Cuneo - Alpini	26
Ravenna	CAORLE	24
Belluno	BL - Parco Città di Bologna	22
Sondrio	SONDRIO - VIA PARIBELLI	17
Rimini	MARECCHIA	15

Il 55% dei capoluoghi ha registrato ben più di 50 giorni di superamento dell'OLT, con picchi massimi (oltre 70 superamenti) nelle città di Bergamo (90), Piacenza (78), Vercelli (75), Milano (74), Lecco (73), Lodi (71) e Modena (70) (Tab. 2, dati ISPRA 2023, 2024, 2025). Solo le località romagnole di Ravenna e Rimini, e quelle alpine (Belluno e Sondrio) rispettano i limiti normativi vigenti (meno di 25 superamenti annui)

Nell'ultimo triennio i superamenti della soglia di informazione (180 µg/m³) sono stati cospicui: l'80% delle stazioni urbane ha registrato almeno un superamento nel 2022, il 68% nel 2023, il 38% nel 2024, con un andamento coerente con la meteorologia stagionale. Solo nel 2023 si è registrato un superamento della soglia di allarme (città di Bergamo).

Le mappe

La distribuzione spaziale delle concentrazioni critiche di ozono (Fig. 12) mette in evidenza la loro chiara dipendenza dalla congiunzione di elevate concentrazioni di fattori emissivi con fattori geografici, geomorfologici e climatici predisponenti all'accumulo di precursori stessi. La maggior quota di superamenti critici dell'OLT (oltre 25 giorni/anno) si colloca nelle regioni del bacino padano, con valori particolarmente elevati nell'alta pianura e fascia prealpina lombarda, nell'alta pianura e zone collinari del vicentino e veronese (Fig. 13), nella fascia pedeappenninica emiliana e nell'Est Piemonte

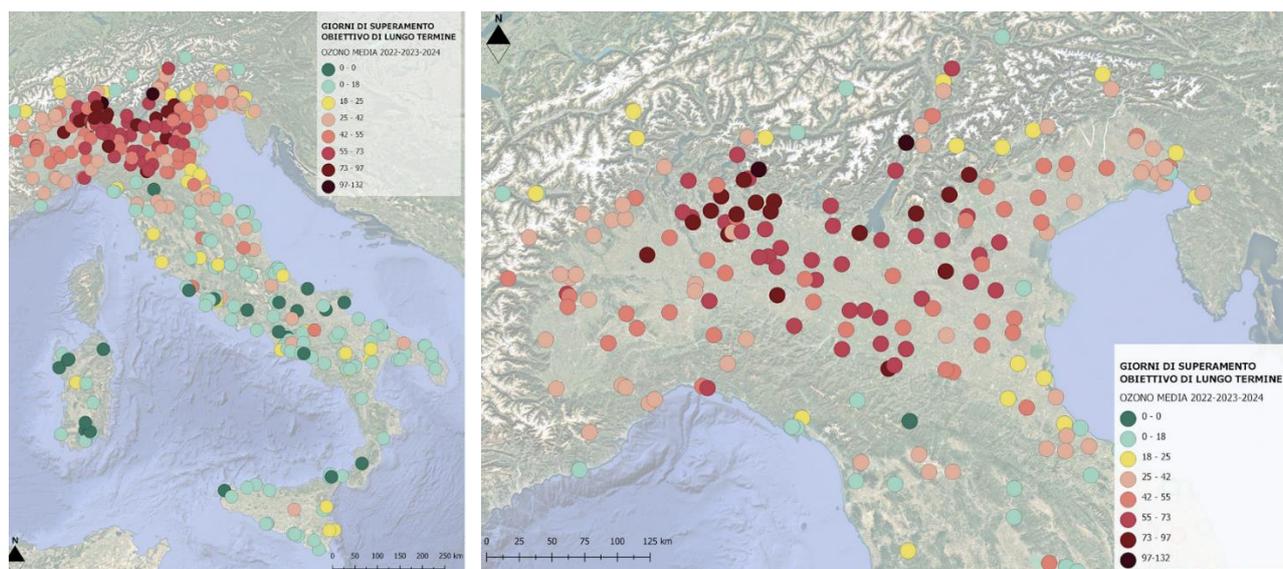


Fig. 12. Giornate di superamento del limite per la salute umana ($=25 \mu\text{g}$) per la massima media oraria di ozono, media del triennio 2022-2023-2024, con dettaglio sulla Pianura Padana. Fonte: Elaborazione Legambiente su dati Ispra (ISPRA 2022, 2023, 2024)

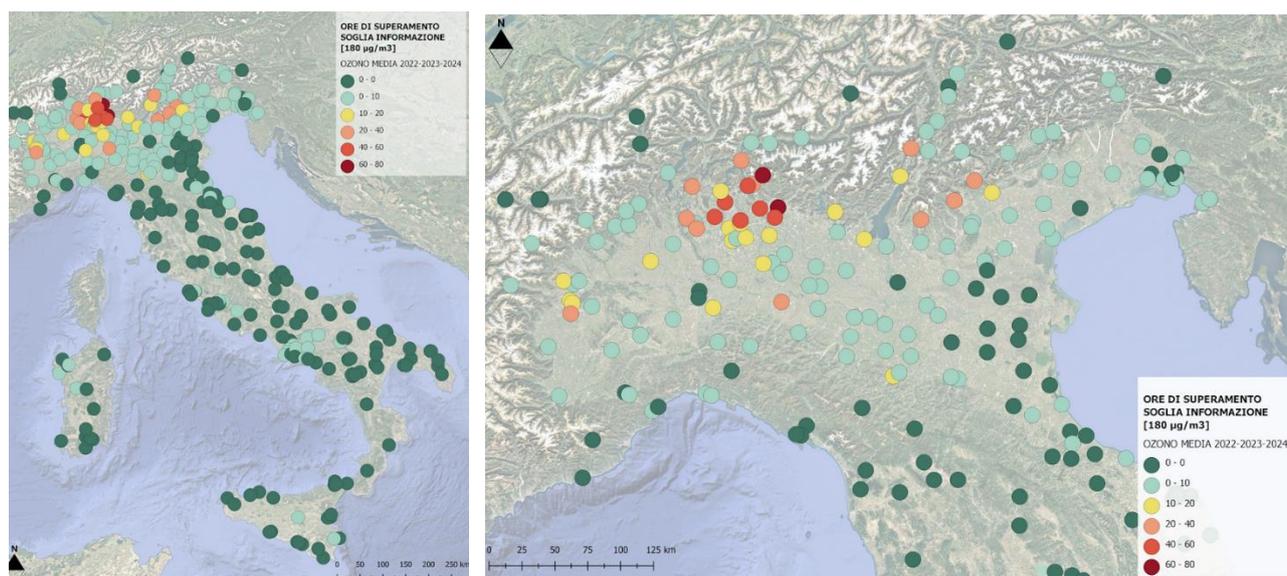


Fig. 13. Ore di superamento della soglia di informazione ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) per la massima media oraria di ozono, media del triennio 2022-2023-2024, con dettaglio sulla Pianura Padana. Fonte: Elaborazione Legambiente su dati Ispra (ISPRA 2022, 2023, 2024)

In particolare, la distribuzione spaziale suggerisce una tendenza a maggiori concentrazioni di ozono nelle aree suburbane e rurali sottovento alle masse d'aria provenienti dalle aree a maggior emissione di precursori (aree più urbanizzate o a maggiore concentrazione di allevamenti). In queste aree infatti l'ozono troposferico, trasportato dalle correnti aeree, ha maggiore persistenza a causa della minore concentrazione delle molecole che ne determinano la distruzione, come gli ossidi di azoto.

Il fattore altitudinale mantiene una sua rilevanza: l'effetto della quota (e quindi della maggiore radiazione UV) tende a sommarsi all'effetto di trasporto, operato dalle brezze, da zone ad elevata concentrazione di fattori emissivi dei precursori dell'ozono, come avviene per le zone prealpine maggiormente connesse con le aree ad alta intensità di insediamenti del bacino padano (Fig. 12). I valori più elevati si registrano infatti nella fascia prealpina.

La distribuzione spaziale dei superamenti della soglia di informazione (Fig. 13) mostra nuovamente un primato delle aree del bacino padano, l'unica zona dove a livello nazionale si registrano più di 10 ore/anno di superamento della soglia, con episodi più numerosi nella fascia dell'alta pianura e Prealpi lombarde e del vicentino e veronese, ed in corrispondenza di importanti centri cittadini di pianura, come Torino e Piacenza. I superamenti più rilevanti (dalle 40 alle 80 h/anno) rimangono concentrati in Lombardia, regione a più intensa ed estesa urbanizzazione e concentrazione di allevamenti intensivi.

EMISSIONI E CONCENTRAZIONI DI METANO NELLA REGIONE PADANA

A determinare la condizione di forte inquinamento da ozono nella Pianura Padano Veneta certamente concorrono, oltre alle condizioni morfologiche e climatiche del territorio (alta insolazione estiva, modesta ventilazione), la concentrazione di fonti emissive legata alla elevata densità di popolazione, industrie e traffico stradale, responsabili delle emissioni di tutti i principali precursori dell'ozono. Per quanto riguarda il metano, invece, si assume che il contributo più rilevante non derivi dalle fonti locali, bensì da quelle presenti a livello di intera atmosfera, trattandosi di un gas le cui concentrazioni hanno un tempo di dimezzamento stimato tra 10 e 12 anni dal momento dell'emissione. Ciò dovrebbe motivare ogni Paese a fare la propria parte per attuare gli impegni assunti con il Global Methane Pledge, l'accordo globale sul metano sottoscritto da 160 Nazioni, in virtù del quale è stabilito un obiettivo di riduzione del 30% per le emissioni globali di metano rispetto ai livelli del 2020, da conseguire entro il 2030.

Per quanto riguarda l'Italia, le **emissioni di metano** seguono un trend di **riduzione**, sostenuto però quasi esclusivamente dal settore degli **utilizzi energetici** e quindi dalla riduzione delle perdite fuggitive degli impianti e delle emissioni nei processi di combustione (Fig. 14). Per le altre, e principali, fonti emissive, in particolare la gestione dei **rifiuti** e le emissioni **agricole** e zootecniche, **i progressi sono invece scarsi o nulli**. Nel settore dei rifiuti è attesa, nei prossimi anni, una riduzione legata ai sensibili miglioramenti occorsi nella raccolta e trattamento del rifiuto organico che, in Italia, è stato in gran parte sottratto al conferimento a discarica. Non sono invece attesi miglioramenti significativi nel settore

agricolo, ed in particolare zootecnico, dove le politiche fino ad oggi attivate non sono in grado di incidere in modo significativo sulle emissioni. Ricordiamo che la gran parte del metano di fonte agricola deriva dalle emissioni enteriche nei ruminanti; pertanto, il conseguimento di importanti miglioramenti richiede una riduzione del numero complessivo dei capi bovini allevati, affiancata da misure di buona gestione delle deiezioni zootecniche che però costituiscono la seconda fonte emissiva, per importanza.

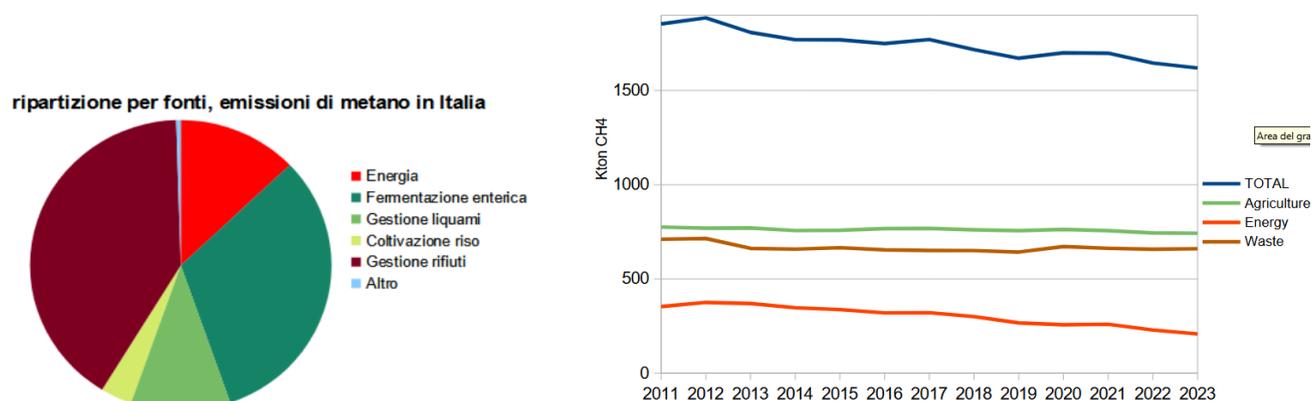


Fig. 14. Ripartizione per fonti ed andamento delle emissioni di metano (migliaia di tonnellate/anno) in Italia. Fonte: Elaborazione Legambiente su dati ISPRA 2025a

La Pianura Padano-Veneta è sicuramente un **hotspot emissivo di metano**: nelle quattro regioni amministrative che condividono questo territorio (Piemonte, Lombardia, Emilia Romagna e Veneto) si concentra infatti quasi la **metà delle emissioni nazionali** di metano (Tab. 4), e questo primato è riconducibile in gran parte all'elevata densità di capi bovini presenti negli allevamenti (Fig. 15), e in minor misura alla presenza della più importante area di coltivazione del riso presente in Europa, estesa per circa 2200 km² di monocoltura nelle province piemontesi e lombarde di Novara, Vercelli, Pavia e Milano.

Tab. 4. Emissioni di metano totali e da fonte agricola delle regioni del bacino padano e incidenza sulle emissioni nazionali. Fonte: elaborazione Legambiente su dati ISPRA 2025 (dati riferiti al 2023) e INEMAR (ARPA Lombardia, Piemonte, Emilia Romagna, Veneto, dati 2021)

	CH ₄ emissioni kt/anno	Incidenza	CH ₄ di fonte agricola kt/anno	Incidenza
Lombardia	343	21,3%	235	31,6%
Veneto	141	8,7%	83	11,2%
Piemonte	164	10,2%	114	15,3%
Emilia R.	129	8,0%	82	11,0%
Tot bacino padano	777	48,2%	514	69,2%
Italia	1613	100%	743	100%

Per quanto il dato con cui valutare il potenziale di precursore di ozono sia quello di concentrazione di metano a livello globale, non è da escludere che le emissioni delle regioni padane, oltre a concorrere al dato globale, determinino significativi incrementi nelle concentrazioni a livello del suolo. Un primo elemento suggestivo in tal senso deriva dalla sovrapposibilità tra le aree di forte concentrazione di allevamenti bovini (Fig. 15) e quelle di elevata concentrazione di ozono troposferico, tenendo conto anche dell'effetto di deriva per

cui le misure di ozono troposferico risultano usualmente più elevate nelle aree rurali e montane collocate sottovento rispetto ai punti di emissione dei precursori.

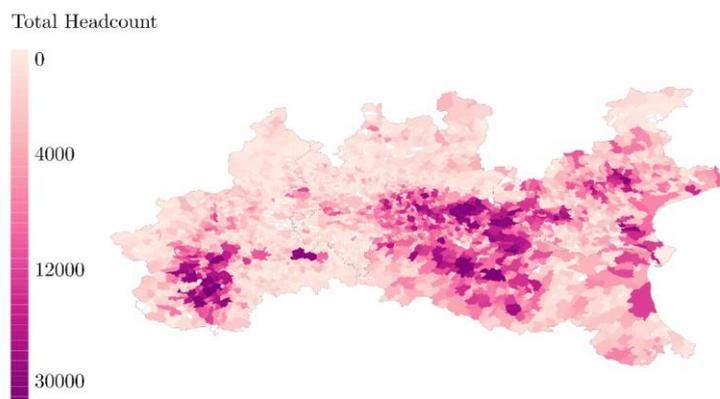


Fig. 15. Distribuzione dei capi bovini allevati nelle regioni Piemonte, Lombardia, Emilia-Romagna e Veneto. Fonte: Lunghi et al. 2023

A causa della mancanza di una rete di rilevamento delle concentrazioni di metano al suolo, raccomandata dalla Dir. UE 2881/2024 ma non ancora istituita in Italia, non è possibile approfondire questa possibile relazione. Tuttavia, ARPA in Lombardia rileva i valori di metano in quattro centraline, di cui una di fondo in area montana, due nella città di Milano ed una a Motta Visconti (MI), località rurale prossima alle aree di coltivazione intensiva del riso poste immediatamente a ovest del capoluogo metropolitano. La registrazione di dati da queste stazioni soffre di severe discontinuità e non è agevole operare dei confronti, possibili solo per una parte dell'anno 2023. Dal confronto si riscontra nella stazione di misura di Motta Visconti un dato di concentrazione normalmente ben allineato con quello della città fino al mese di maggio, poco dopo l'inizio della stagione di allagamento delle risaie, allorché le concentrazioni di metano a Motta Visconti assumono valori del 15-20% più alti di quelli cittadini, con un accentuato picco estivo in luglio-agosto, alla conclusione del ciclo fenologico della coltura del riso, allorché l'aumento di temperatura delle acque di risaia vi favorisce la metanogenesi (Fig. 16).

Il dato può apparire sproporzionato rispetto alla quota di emissioni attribuita alla risicoltura (a livello nazionale solo il 7,3% delle emissioni di settore agricolo derivano da coltivazione del riso), ma occorre considerare il dato areale, che vede il territorio risicolo nazionale quasi per intero racchiuso in un territorio relativamente circoscritto, ed il dato di stagionalità, per cui le emissioni di metano da questa fonte, a differenza di quelle zootecniche che si distribuiscono in tutte le mensilità, si verificano esclusivamente nel II quadrimestre, periodo in cui le risaie vengono allagate, coincidente con il periodo dell'anno in cui più intensa è l'attività fotochimica che determina formazione di ozono. Basandosi sui dati INEMAR 2021, è possibile osservare per la Lombardia che la provincia risicola per eccellenza (Pavia), pur avendo emissioni di metano più basse se misurate su base annua rispetto alle province a specializzazione zootecnica (Brescia, Cremona, Lodi e Mantova), o ad alta intensità di emissioni da fonti non agricole (Milano), è quella in cui le emissioni sono più alte nel quadrimestre maggio-agosto, quindi nel periodo più critico per i superamenti delle soglie di concentrazione di ozono troposferico (Fig. 17). Il picco emissivo coincidente con il periodo

di allagamento delle risaie concorda con i maggiori livelli di concentrazione di metano rilevati al suolo a Motta Visconti, e potrebbe costituire una parte della spiegazione per i livelli di concentrazione di ozono estremamente elevati che si rilevano nell'area sottovento alla Lombardia Occidentale, considerando anche che l'area risicola si colloca a ridosso del centro metropolitano lombardo.

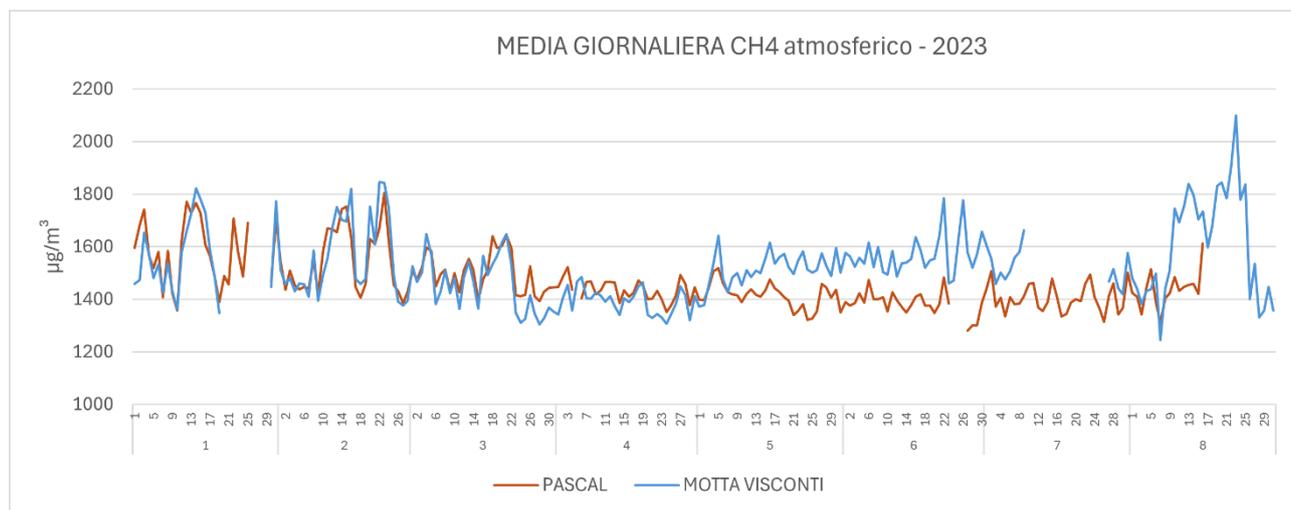


Fig. 16. Confronto tra le concentrazioni misurate alla centralina ARPA di Milano Pascal (urbano di fondo) e quelle misurate a Motta Visconti (rurale). Fonte: elaborazione Legambiente su dati ottenuti da ARPA Lombardia



Fig. 17. Flussi emissivi per provincia (Regione Lombardia) su base annua e per i quadrimestri gennaio-aprile, maggio-agosto, settembre-dicembre. Fonte: rielaborazione Legambiente su dati INEMAR 2021

INDICAZIONI CONCLUSIVE

I livelli di inquinamento critico da ozono troposferico a livello nazionale, ed in particolare nel bacino padano, congiunti all'assenza di trend significativi di diminuzione delle sue concentrazioni rendono urgente un'azione mirata alla sua mitigazione. A livello europeo, l'Italia si colloca tra i paesi maggiormente colpiti per quanto riguarda gli impatti sulla salute umana, con superamenti delle soglie di legge particolarmente addensati nel territorio delle quattro regioni (Piemonte, Lombardia, Veneto ed Emilia Romagna) che definiscono il bacino padano,

Tra i precursori dell'ozono, l'unico a non mostrare trend di decrescita delle concentrazioni atmosferiche è il metano, gas climalterante le cui emissioni, per quanto riguarda l'Italia, sono anch'esse concentrate nel bacino padano, ed in prevalenza dovute alle attività agricole. Considerata la complessità della catena di reazioni chimiche che porta alla formazione e distruzione dell'ozono troposferico, risulta innanzitutto necessario colmare il gap di conoscenze sulla relazione tra fattori emissivi del metano, sue concentrazioni e livelli di ozono. Le attività zootecniche hanno senz'altro un ruolo centrale su questo precursore, ma anche la risicoltura potrebbe avere un ruolo influente sui trend della stagione estiva, la più critica per i valori di ozono.

Per affrontare questi impatti in maniera efficace occorre:

- attivare reti di monitoraggio regionali sulle concentrazioni di metano atmosferico per meglio comprendere le sue relazioni con le concentrazioni di ozono;
- intervenire sui fattori emissivi dei precursori, in particolare sul metano, adempiendo agli sforzi richiesti dal Global Methane Pledge attraverso una strategia nazionale che miri a:
 - o un progressivo ridimensionamento del carico zootecnico nel bacino padano in funzione delle risorse foraggere e dei limiti territoriali all'impiego dei nutrienti derivanti dalle deiezioni;
 - o sviluppare in parallelo strategie e approcci di riduzione dei fattori emissivi del sistema zootecnico padano (dalla ottimizzazione della razione e gestione sostenibile dei sistemi foraggeri, all'opportuna gestione e stoccaggio delle deiezioni, mitigabile anche attraverso l'ottimizzazione dei sistemi impiantistici per la gestione della biomassa, in particolare con il ricorso alla digestione anaerobica, minimizzandone le perdite fugitive). A tal fine occorre anche una correzione delle politiche rivolte al settore della produzione di biogas/biometano, affinché queste sostengano, attraverso incentivi mirati, non tanto la produzione e l'immissione in rete di biometano, quanto la riduzione delle emissioni di gas serra conseguibile con il ricorso alle migliori pratiche impiantistiche e gestionali;
 - o identificare una strategia coordinata sulle regioni risicole per promuovere l'adozione di pratiche di gestione irrigua delle risaie volte a minimizzarne gli impatti locali sulle concentrazioni di ozono nelle stagioni di massimo picco, corrispondenti con la stagione irrigua, preservando al contempo una sostenibilità ambientale ad ampio spettro per la risicoltura padana.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Avnery, S., Mauzerall, D., Liu, J., & Horowitz, L., *Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 2. Year 2030 potential crop production losses and economic damage under two scenarios of O₃ pollution*. Atmospheric Environment, 45, 2297-2309, 2011

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.002>

Belis A, Van Dingenen R, Air quality and related health impact in the UNECE region: source attribution and scenario analysis, Atmospheric Chemistry and Physics, 23, 2023

<https://doi.org/10.5194/acp-23-8225-2023>

Bessagnet, B., Belis, C. A., Crippa, M., Dentener, F., Van Dingenen, R. et al., *Trends of methane emissions and their impact on ozone concentrations at the European and global levels*, Publications Office of the European Union, 2024, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/376659>

Clean Air Fund, Clean Air Institute, Clean Air Task Force, The case for action on tropospheric ozone, Hill Consulting, Nov. 2024 www.cleanairfund.org/resource/action-on-tropospheric-ozone/

EEA, Harm to human health from air pollution in Europe: burden of disease status, 2024, 2024a <https://doi.org/10.2800/3950756>

EEA, National Air Pollutant Emissions data viewer 2005-2022, publ. 2024b

<https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution/national-air-pollutant-emissions-data-viewer-2005-2022>

EEA, Air Quality Status Report, 2025a <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-status-report-2025/ozone>

EEA, Briefing No 01, Methane, climate change and air quality in Europe: exploring the connections, 2025b www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/methane-climate-change-and-air-quality-in-europe-exploring-the-connections

ETC HE, *European surface ozone: the potential of mitigating methane and other precursors*, 2025 <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-reports/etc-he-report-2024-16-european-surface-ozone-the-potential-of-mitigating-methane-and-other-precursors>

Hoesly et al., Global anthropogenic carbon monoxide emissions, 1750-2022, Boston University Inst for Global Sustainability, 2024 <https://visualizingenergy.org/global-anthropogenic-carbon-monoxide-emissions-1750-2022/>

IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2021 <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

ISPRA, Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2023. National Inventory Document, 2025a https://www.isprambiente.gov.it/files2025/pubblicazioni/rapporti/nid2025_italy_stampa.pdf

ISPRA, Italian Emission Inventory 1990-2023, Informative Inventory report, 2025b

https://www.isprambiente.gov.it/files2025/pubblicazioni/rapporti/iir_2025_finale_def.pdf

Ispra 2025c, La qualità dell'aria in Italia nel 2024 <https://www.snpambiente.it/temi/aria/qualita-dellaria-nel-2024/>

Ispra 2024, La qualità dell'aria in Italia nel 2023 <https://www.snpambiente.it/la-qualita-dellaria-in-italia-nel-2023/>

Ispra 2023, La qualità dell'aria in Italia nel 2022 <https://www.snpambiente.it/snpa/la-qualita-dellaria-in-italia-nel-2022/>

Lunghi J, Malpede M, Aleluia Reis L, Exploring the impact of livestock on air quality: A deep dive into Ammonia and particulate matter in Lombardy, *Env Imp Ass Rev*, 105, 2024
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107456>

Real E, et al., Atlas of ozone chemical regimes in Europe. *Atmospheric Environment*, 2024,
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120323>

Van Caspel W, et al., Impact of methane and other precursor emission reductions on surface ozone in Europe: scenario analysis using the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) Meteorologica Synthesizing Centre – West (MSC-W) Model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 2024 <https://doi.org/10.5194/acp-24-11545-2024>

WHO, Global air quality guidelines, 2021 <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Wittig, V. E., Ainsworth, E. A., Naidu, S. L., Karnosky, D. F., & Long, S. P., *Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis*. *Global Change Biology*, 15(2), 396-424, 2009
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01774.x>