

QUALITA' DELL'ARIA E PRINCIPALI INQUINANTI URBANI



Caratteristiche della troposfera

✓ T decrescente con la quota (a meno di inversioni termiche)

✓ rapido mescolamento verticale

✓ lenta diffusione verso la stratosfera

} accumulo di inquinanti

✓ radiazione solare a $\lambda > 290$ nm

→ reazioni fotochimiche

✓ concentrazione relativamente alta di vapor d'acqua

✓ ingredienti importanti della chimica troposferica: O_3 , NO_x , OH^*

Principali inquinanti antropogenici

Per importanza storica, concentrazione ed effetti sugli ecosistemi (piante, animali, uomo, ambiente), si possono distinguere 3 principali inquinanti gassosi antropogenici:

- **SO₂**

Inquinanti primari

Inquinanti secondari

- **NO_x (NO+NO₂)**

- **O₃**

A essi si aggiungono poi numerosi altri composti, es. CO, CH₄, VOC, NH₃, PAH, H₂S, metalli, ecc. e il particolato atmosferico.

Inquinamento atmosferico

Inquinante = Sostanza che concorre ad alterare il normale stato chimico-fisico dell'aria



Stato di Qualità dell'Aria



Normative

- Inquinanti
- Metodi e strategie di misura
- Indicatori statistici e riferimenti temporali ad essi correlati
- Standard di qualità

Contesto normativo

Direttiva 2008/50/EC relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa

Direttiva 2004/107/EC concernente l'arsenico, il cadmio, il mercurio, il nickel e gli idrocarburi policiclici aromatici nell'aria ambiente



La strategia europea riguardo alla qualità dell'aria mira a soddisfare i valori guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità.

Contesto normativo

La norma quadro in materia di controllo dell'inquinamento atmosferico è rappresentata dal **D.Lgs n.155/2010** (valori limite, valori obiettivo, soglie di informazione e di allarme, livelli critici, obiettivi a lungo termine).

- NO_2 , NO_x ,
- SO_2 ,
- CO ,
- O_3 ,
- Benzene, Benzo(a)pirene,
- Piombo, Arsenico, Cadmio, Nichel, Mercurio,
- precursori di ozono,
- PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$



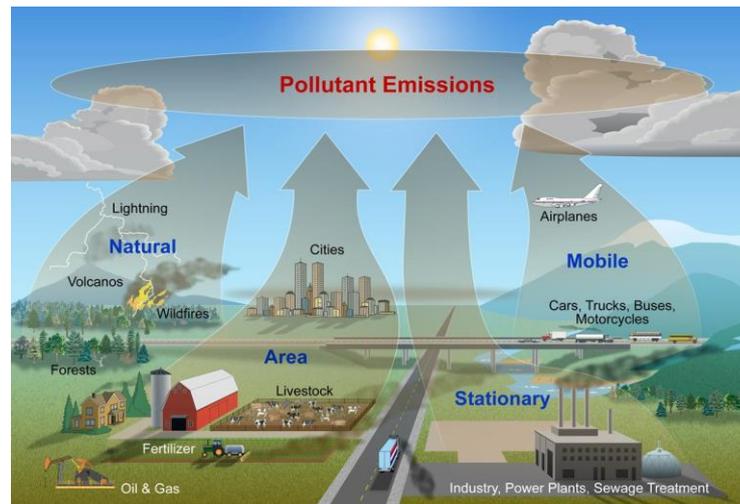
Successivamente sono stati emanati vari decreti che integrano il D.Lgs n.155/2010, es. individuando stazioni speciali di misurazione della qualità dell'aria (DM 29nov2012), metodi di riferimento per la misura di VOC (D.Lgs. N.250/2012), metodi di riferimento per la determinazione degli inquinanti, procedure per la garanzia di qualità per le reti e la comunicazione dei dati rilevati, criteri di scelta e documentazione dei siti di monitoraggio (DM 26gen2017).

Sorgenti di emissione

Le sorgenti di emissione di inquinanti atmosferici possono essere naturali o antropogeniche.

Le sorgenti antropogeniche di emissione possono essere classificate in:

- sorgenti stazionarie (fisse), distinguibili in:
 - sorgenti puntuali (es. ciminiere di impianti industriali)
 - sorgenti areali (es. discariche, aree urbane)
 - sorgenti lineari (es. arterie stradali)
- sorgenti mobili (es. automobili)



Strategie di misura degli inquinanti atmosferici

La selezione dei siti di misura/campionamento degli inquinanti atmosferici dipende dallo scopo del monitoraggio, es. rispondenza a standard di qualità dell'aria, valutazione dell'impatto di una sorgente, monitoraggio dell'esposizione della popolazione, ricerca scientifica su processi chimici o fisici in atmosfera.

Il monitoraggio della qualità dell'aria può essere effettuato tramite:

- reti di monitoraggio stazionarie
- piattaforme mobili



Strategie di misura degli inquinanti atmosferici

Reti di monitoraggio stazionarie

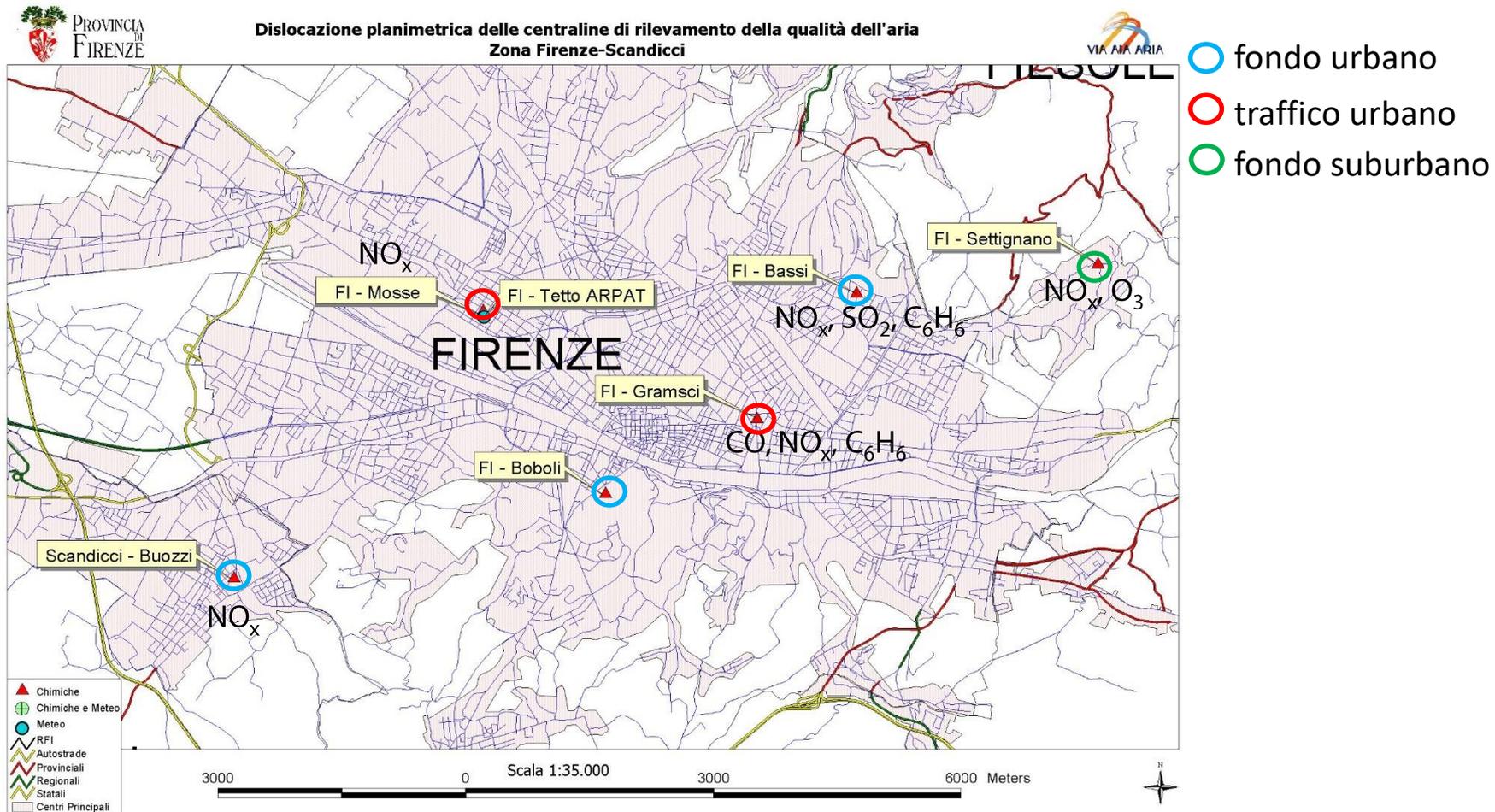
I siti di monitoraggio per la valutazione della qualità dell'aria sono generalmente organizzati in reti di monitoraggio.

Le stazioni di misura fisse sono utilizzate per monitoraggi a lungo termine. Le reti sono organizzate in modo tale da fornire le seguenti informazioni:

1. Livelli di concentrazione di background
2. Livelli di concentrazione in aree sensibili (es. altamente popolate)
3. Impatto di sorgenti locali
4. Impatto di sorgenti remote
5. Impatto relativo di sorgenti naturale ed antropogeniche

Strategie di misura degli inquinanti atmosferici

Reti di monitoraggio stazionarie



Strategie di misura degli inquinanti atmosferici

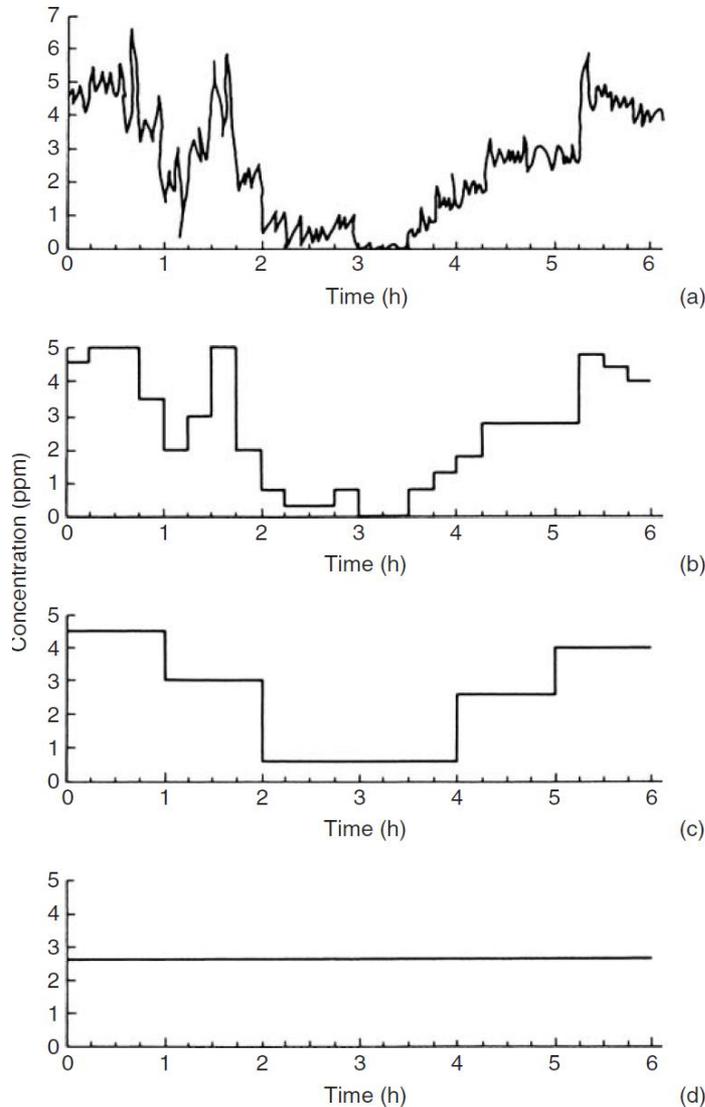
Stazioni mobili di misura

Le misure effettuate da piattaforme mobili (es. automobili, aeroplani, ecc) forniscono informazioni su processi di trasporto, trasformazione chimica e rimozione di inquinanti tra sorgente e recettori, sulla deposizione acida, sulla dispersione di inquinanti atmosferici dalle sorgenti.

Il principale vantaggio di sistemi di monitoraggio mobile è la possibilità di ottenere informazioni sulla qualità dell'aria in regioni intermedie tra la sorgente e le stazioni di monitoraggio fisse . Permettono di "seguire" i plume urbani.

Richiedono la disponibilità di strumenti con tempi di risposta rapidi.

Tempi di mediazione



I processi di trasporto e dispersione, la variabilità nel tempo delle emissioni dalle sorgenti, i meccanismi di rimozione e conversione in atmosfera risultano in una grande variabilità delle concentrazioni di un inquinante in arrivo a un recettore.

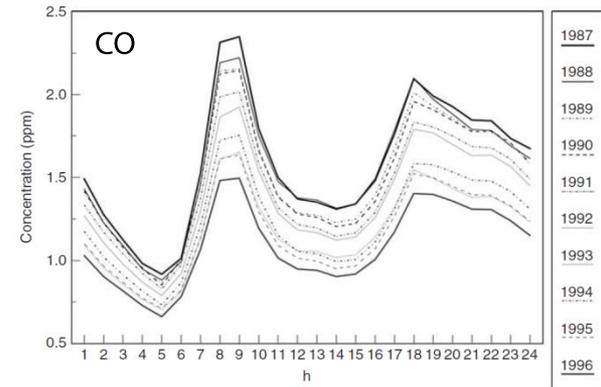
Il record delle concentrazioni di un inquinante in un sito di monitoraggio sarà molto diverso in funzione dei tempi di risposta del metodo di misura adottato.

Guidelines e valori di legge sono sempre espressi come concentrazioni mediate su intervalli di tempo precisi.

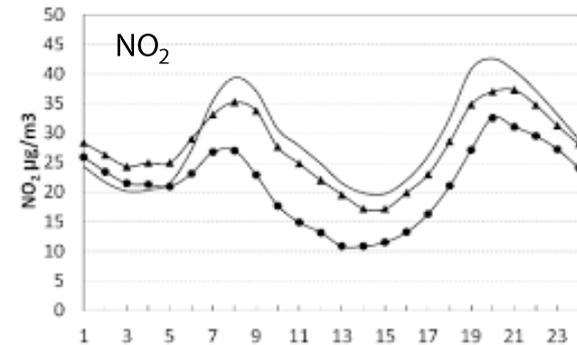
Variazioni cicliche

Le concentrazioni degli inquinanti in aria possono essere interessate da variazioni cicliche:

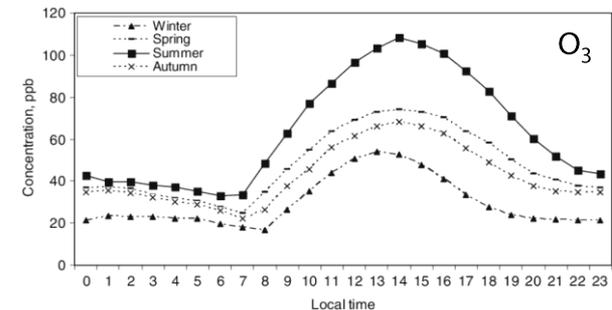
- cicli diurni (sorgenti antropogeniche; meccanismi di trasporto e dispersione)
- cicli giorni feriali/festivi (sorgenti antropogeniche)
- cicli stagionali (sorgenti antropogeniche; meccanismi di trasporto e dispersione)



— Weekdays ◆ Saturdays ◆ Sundays



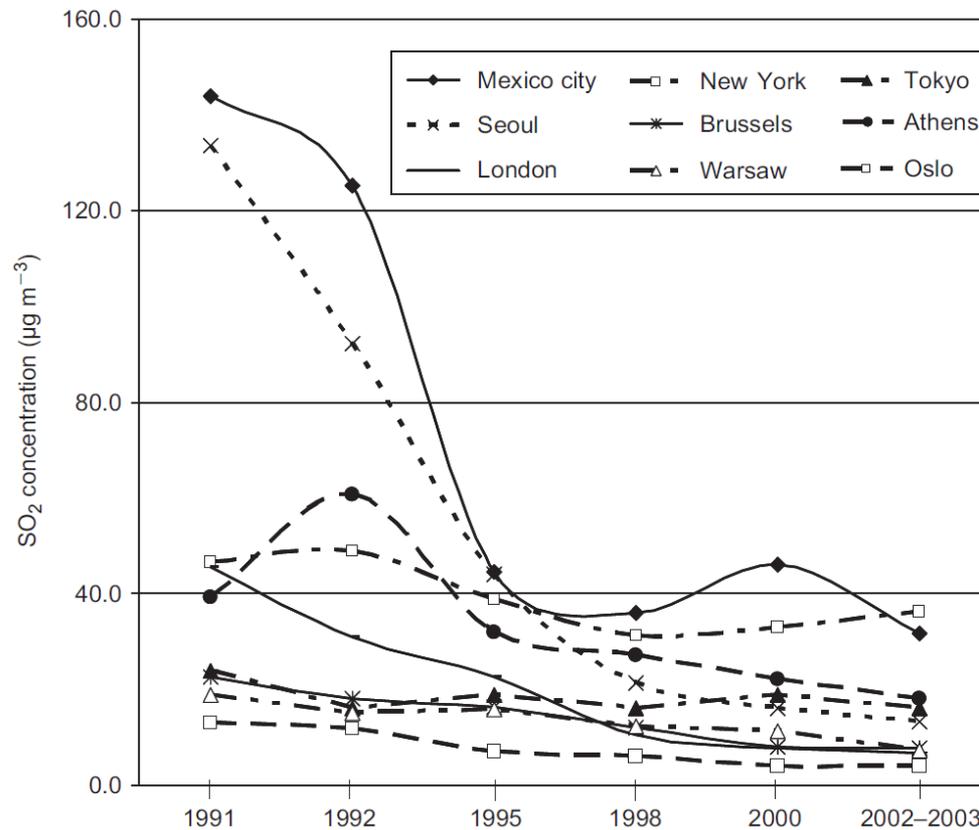
Time



Concentration, ppb

Variazioni annuali

I cambiamenti da un anno ad un altro determinano i trend (sorgenti antropogeniche).



Anidride solforosa (SO_2)



Anidride solforosa (SO₂)

L'anidride solforosa, o biossido di zolfo, è un gas incolore, irritante, non infiammabile, molto solubile in acqua e dall'odore pungente. Più pesante dell'aria, tende a stratificarsi nelle zone depresse.

Le emissioni naturali di SO₂ sono principalmente legate all'attività vulcanica (circa 10 Tg di SO₂ nel 2010).

Le emissioni antropogeniche (circa 60 Tg di SO₂ nel 2010), superiori a quelle naturali, sono dovute principalmente ai processi di combustione dei combustibili fossili, solidi e liquidi.

Le concentrazioni di background di SO₂ sono generalmente <5 µg/m³.

Anidride solforosa (SO₂)

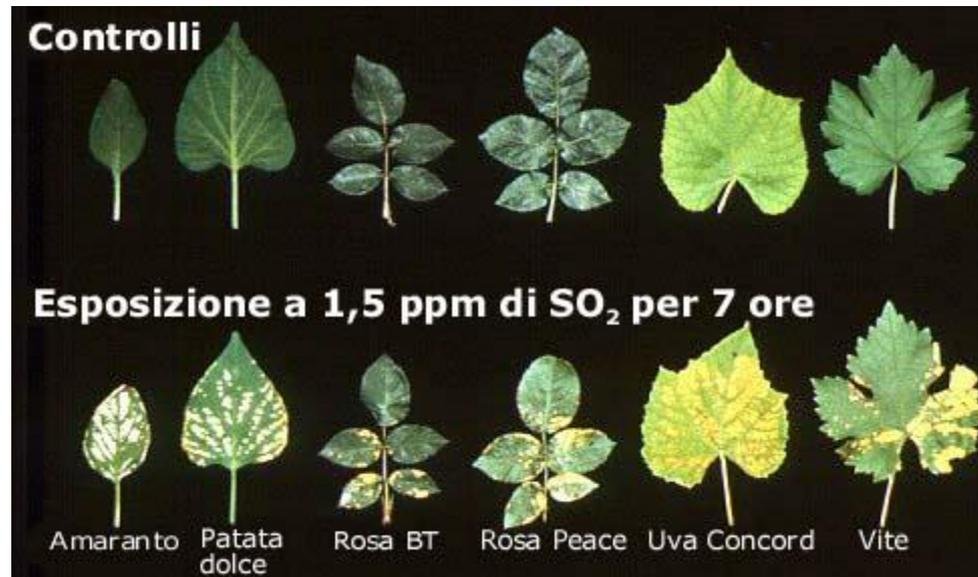
Effetti sull'uomo:

- per l'elevata solubilità in acqua, SO₂ viene facilmente assorbito dalle mucose del naso e del tratto superiore dell'apparato respiratorio;
- L'alta reattività lo rende estremamente irritante;
- A basse concentrazioni gli effetti del biossido di zolfo sono principalmente legati a patologie dell'apparato respiratorio come bronchiti, asma e tracheiti e ad irritazioni della pelle, degli occhi e delle mucose;
- Il caratteristico odore pungente del biossido di zolfo viene percepito dal naso alla concentrazione di 0.8-2.6 mg/m³;
- Brevi esposizioni di 10' a concentrazioni di 3 mg/m³ provocano un aumento del ritmo respiratorio e del battito cardiaco; concentrazioni di 25 mg/m³ provocano irritazioni agli occhi, al naso ed alla gola, oltre ad un aumento della frequenza cardiaca. Concentrazioni maggiori di 5 g/m³ producono asfissia tossica con morte per collasso cardiocircolatorio.

Anidride solforosa (SO₂)

Effetti sull'ambiente:

- per l'elevata solubilità in acqua, SO₂ contribuisce all'acidificazione delle precipitazioni meteorologiche con la conseguente compromissione dell'equilibrio degli ecosistemi interessati e corrosione anche di monumenti, materiali da costruzione, metalli, vernici.
- A basse concentrazioni provoca un rallentamento nella crescita delle piante, mentre ad alte concentrazioni ne provoca la morte alterandone la fisiologia in modo irreparabile.



Anidride solforosa (SO₂)

Valori guida e normativa:

Europa: 125 µg/m³ 24-hour mean (max 3 exceedences per year)
350 µg/m³ 1-hour mean (max 24 exceedences per year)

Italia: 125 µg/m³ media giornaliera (max 3 superamenti in un anno)
350 µg/m³ media oraria (max 24 superamenti in un anno)

misurato in continuo attraverso un analizzatore basato sul principio della misura dell'intensità della radiazione emessa per fluorescenza dalle molecole di SO₂ quando queste vengono attivate per irraggiamento con radiazioni ultraviolette. L'aria ambiente prelevata viene inviata in una cella ed irradiata da una radiazione ultravioletta resa monocromatica da un filtro, le molecole di SO₂ eccitate da queste radiazioni ultraviolette. a loro volta emettono una radiazione specifica a lunghezza d'onda più grande.

Guidelines

SO ₂ :	20 µg/m³ 24-hour mean 500 µg/m³ 10-minute mean
-------------------	---

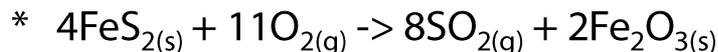
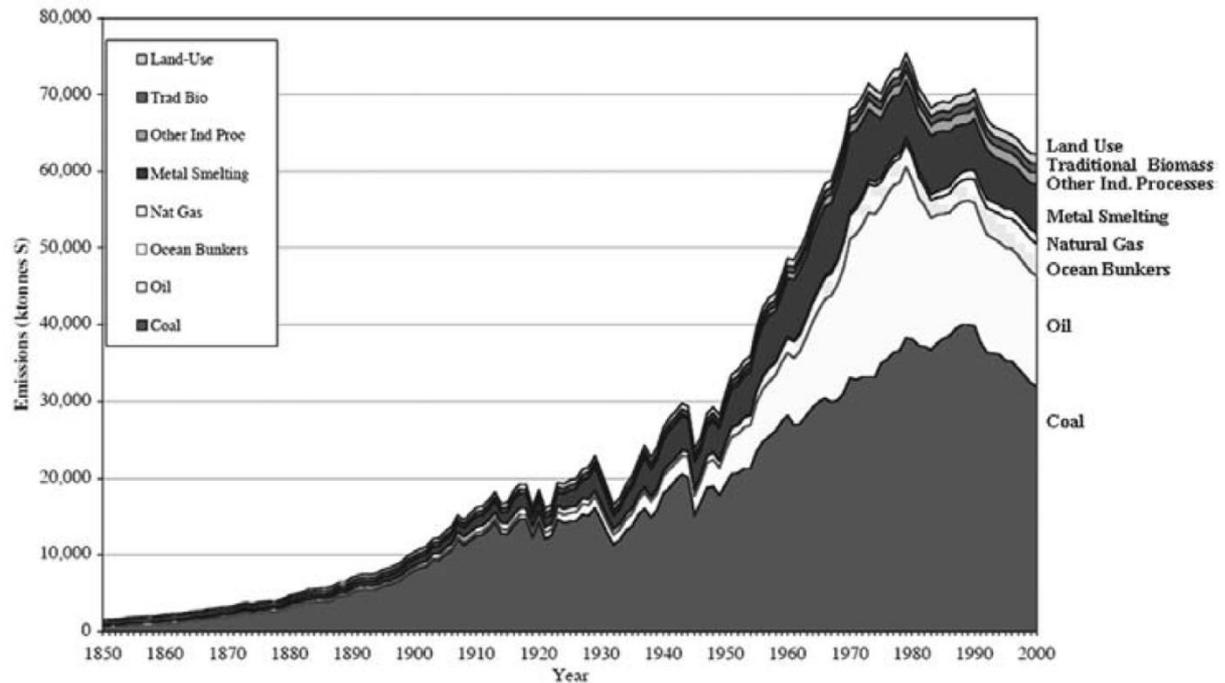
WHO, 2006

Anidride solforosa (SO₂)

La combustione di combustibili fossili rappresenta la principale sorgente antropica di SO₂.

Tutti i combustibili fossili contengono zolfo (che per lo più viene emesso come SO₂ durante la combustione), anche se il tenore di zolfo varia in base alla tipologia di combustibile fossile.

Il carbone contiene 0.1-4% di zolfo come impurità (principalmente come pirite* o tiofene**), mentre nel petrolio il contenuto di zolfo è trascurabile.

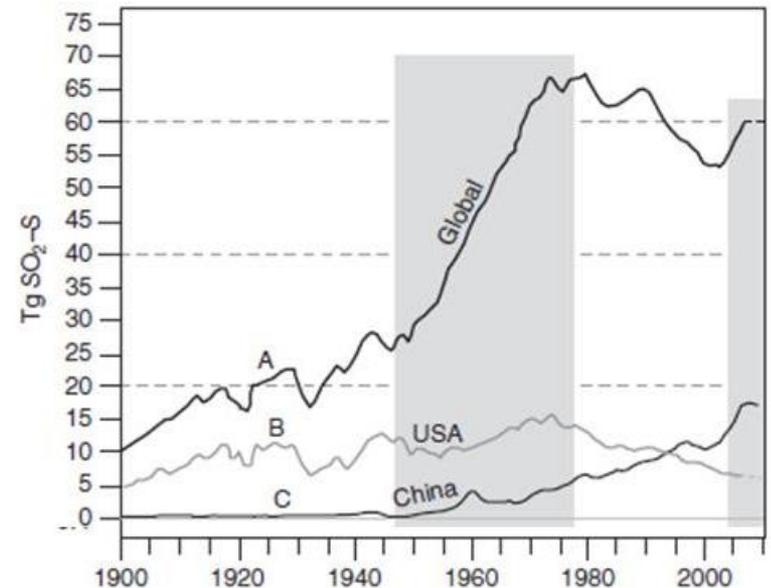
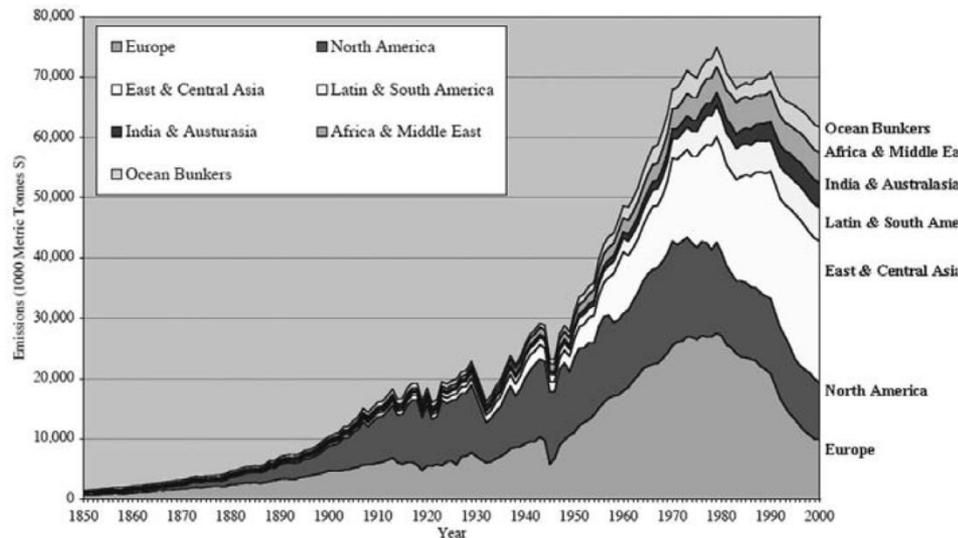


Anidride solforosa (SO₂)

Le emissioni antropogeniche globali di SO₂ hanno raggiunto un picco intorno agli anni 1970s-1980s.

Successivamente, si è osservato un generale decremento delle emissioni antropogeniche dovuto all'effetto combinato di:

- utilizzo di combustibili a minor tenore di zolfo
- passaggio dal carbone a combustibili liquidi e gas
- aumento dell'efficienza energetica



Anidride solforosa (SO₂)

SO₂ è uno dei principali inquinanti primari tradizionali nello smog di Londra.

Lo smog di Londra, detto anche smog tradizionale, smog riducente o smog sulfureo, è prodotto dalla combustione di combustibili fossili, in particolare carbone, e aggravato da condizioni di elevata umidità.



Londra, 1952

TABLE 1.2 Historical Aspects of Sulfurous (London) and Photochemical (Los Angeles) Air Pollution

Characteristics	Sulfurous (London)	Photochemical (Los Angeles)
First recognized	Centuries ago	Mid-1940s
Primary pollutants	SO ₂ , soot particles	VOC, NO _x
Secondary pollutants	H ₂ SO ₄ , sulfate aerosols, etc.	O ₃ , PAN, HNO ₃ , aldehydes, particulate nitrate and sulfate, etc.
Temperature	Cool (< 35°C)	Hot (> 75°F)
Relative humidity	High, usually foggy	Low, usually hot and dry
Type of inversion	Radiation (ground)	Subsidence (overhead)
Time air pollution peaks	Early morning	Noon to evening

Anidride solforosa (SO₂)

Lo smog di tipo tradizionale rappresenta ancora oggi un problema in città in cui è ancora diffuso l'uso del carbone.



Londra, 1952

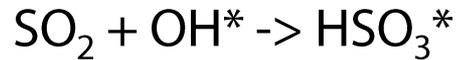


Pechino (Cina)

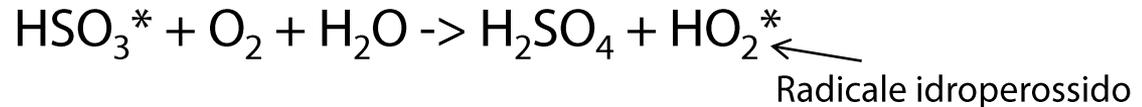
Anidride solforosa (SO₂)

Una volta emesso in atmosfera, SO₂ va incontro ad ossidazione (da S⁴⁺ a S⁶⁺) tramite un'ampia varietà di reazioni.

Una reazione comune è quella con il radicale ossidrile OH*:



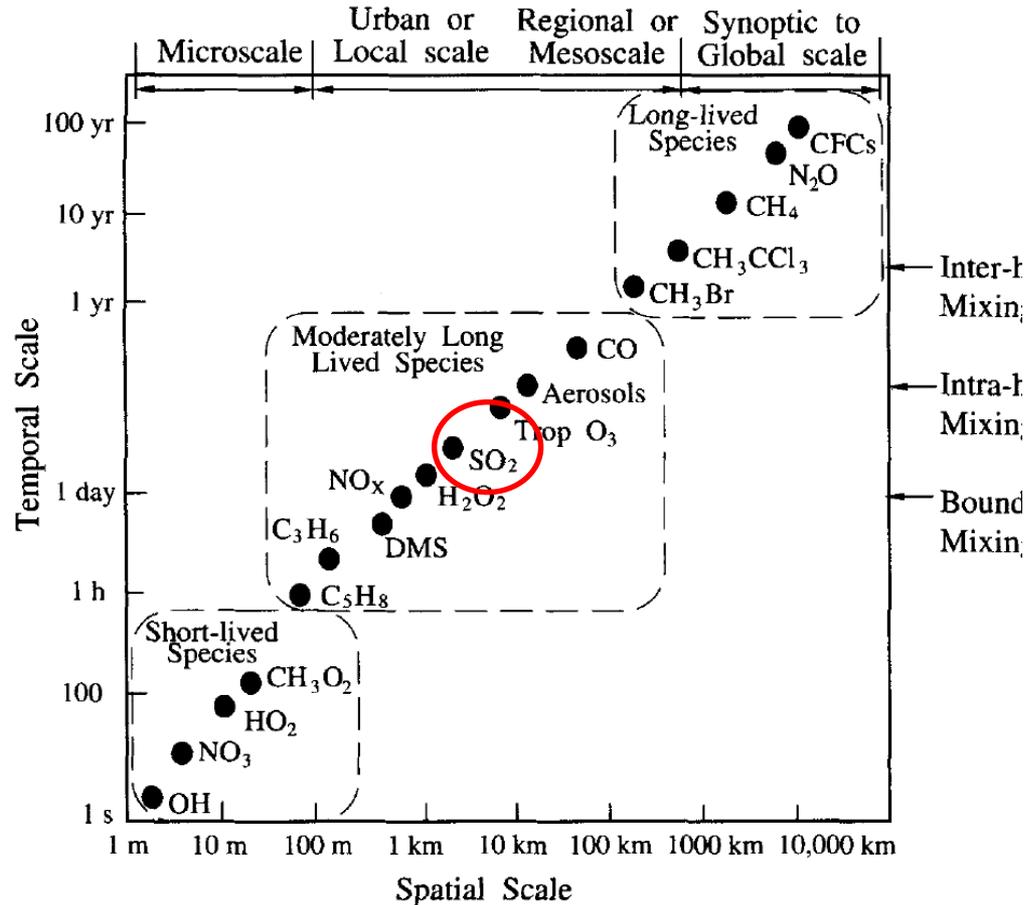
HSO₃* (S⁵⁺) viene ossidato ad acido solforico H₂SO₄ (S⁶⁺, i.e. la forma più stabile in atmosfera) tramite la seguente reazione:



H₂SO₄ si solubilizza nelle gocce d'acqua presenti in atmosfera e viene rimosso tramite deposizione umida, contribuendo al fenomeno delle **piogge acide**:



Anidride solforosa (SO₂)



La cinetica di queste reazioni fa sì che il tempo di residenza di SO₂ in atmosfera vari da 2 a 8 giorni.

Anidride solforosa (SO₂)

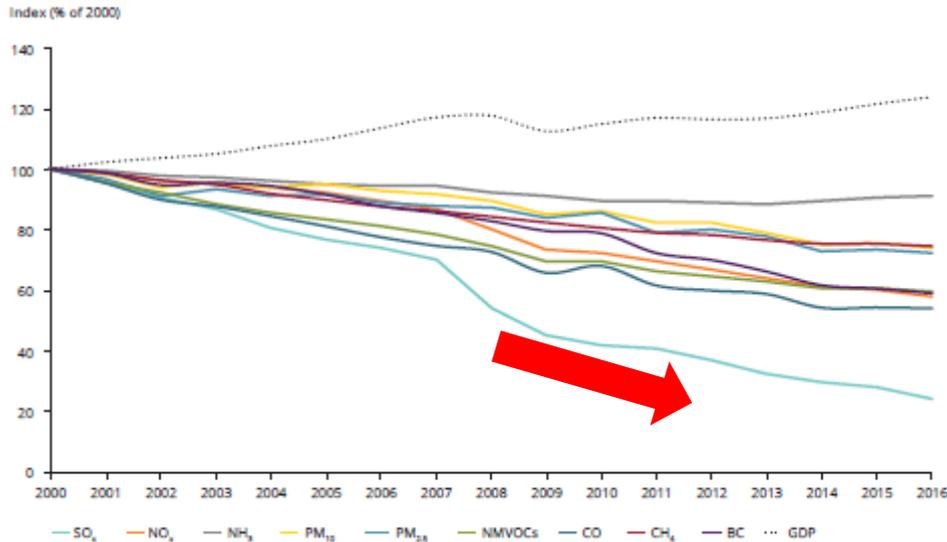


Figure 3.7 SO_x emissions in the EU: (a) trend in emissions from the five most important key categories, 1990-2017; (b) share by sector group, 2017; (c) sectoral trends in emissions

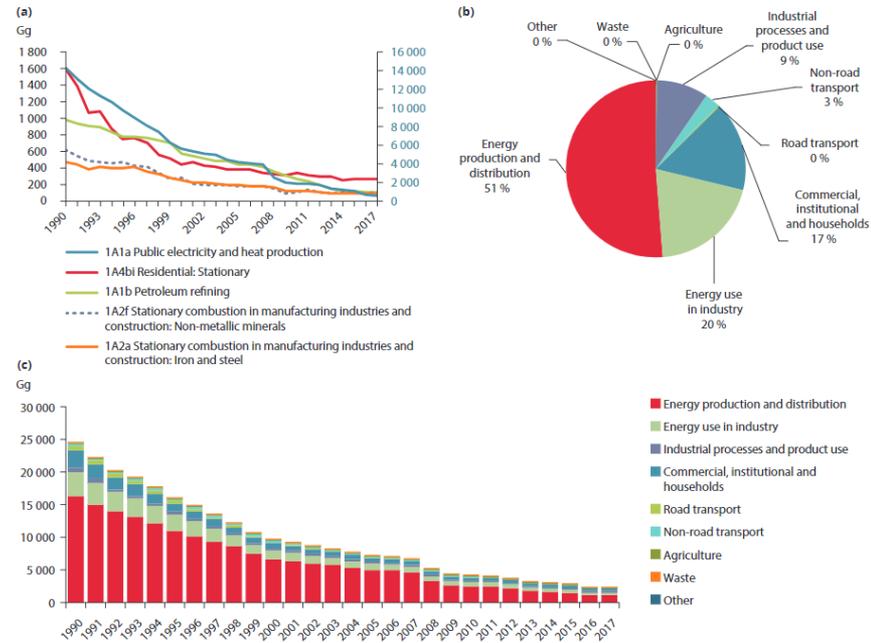
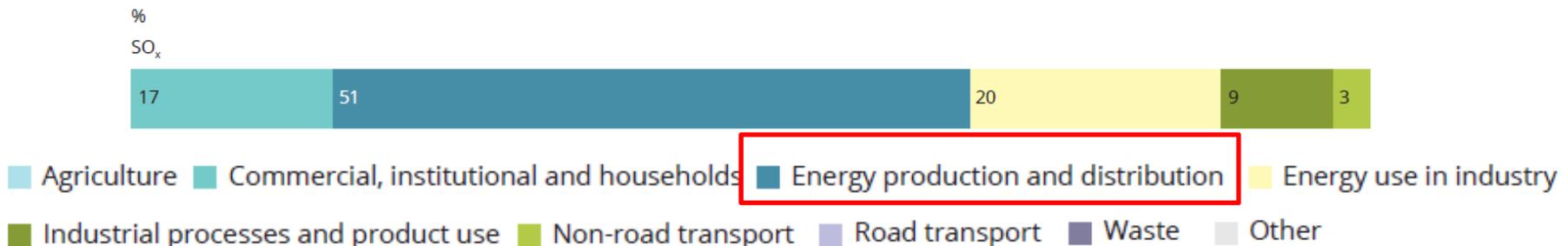
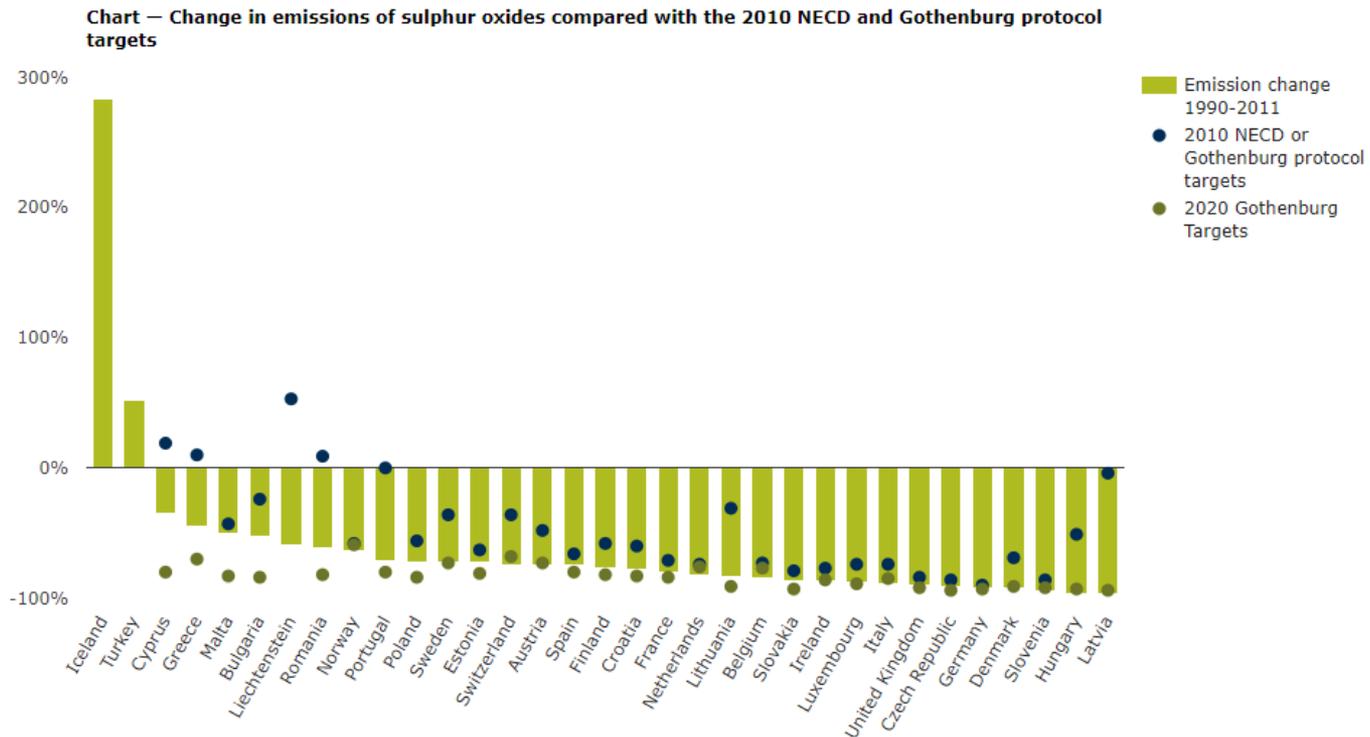


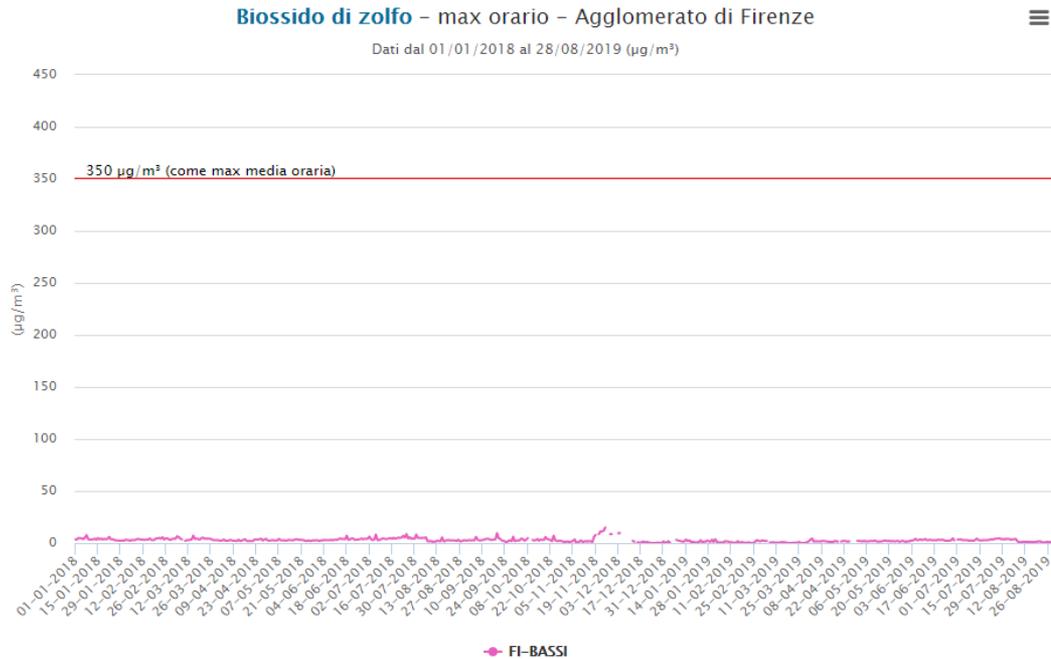
Figure 1.1 Contribution to EU-28 emissions of NO_x, PM₁₀ and PM_{2.5} from main source sectors in 2016



Anidride solforosa (SO₂)

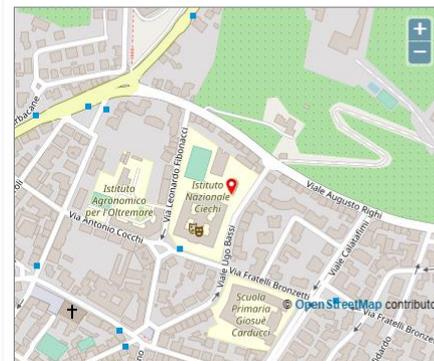


Anidride solforosa (SO₂)



Stazione FI-BASSI
Fondo urbano

Coordinate (Gauss Boaga Fuso Est): N:4850623 - E:1684020 - Comune: FIRENZE - Provincia: FIRENZE



Monossido di carbonio (CO)



Monossido di carbonio (CO)

Il monossido di carbonio (CO) è un gas incolore, inodore e molto tossico. Si forma principalmente per incompleta combustione di sostanze organiche. Si distinguono 3 sorgenti principali (>75 % delle emissioni di CO in atmosfera):

- incompleta combustione di biomassa (700 Tg CO/anno)
- incompleta combustione di combustibili fossili (650 Tg/anno)
- ossidazione di CH₄ da parte del radicale ossidrilico (800 Tg/anno)

Altre sorgenti includono la parziale ossidazione di composti organici in aria ed emissioni da oceani e vegetazione.

Principali emissioni naturali: incendi delle foreste, eruzioni vulcaniche, emissioni da oceani e paludi, ossidazione di CH₄ e degli idrocarburi emessi naturalmente in atmosfera.

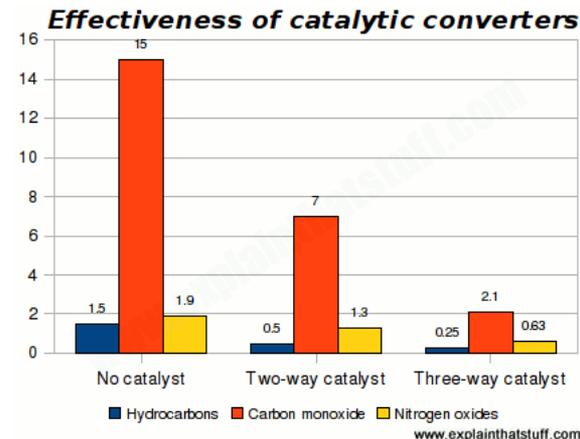
Principali emissioni antropiche: incompleta combustione di combustibili fossili (scarichi veicolari e industriali), combustione di biomasse, centrali elettriche, inceneritori.

Concentrazione di background: 100-200 ppb in emisfero Nord, 40-60 ppb in emisfero Sud. (>1-10 ppm in aree urbane e fino a 500 ppm in gallerie stradali)

Monossido di carbonio (CO)



Le concentrazioni di CO nei gas di scarico delle auto sono maggiori quando il motore funziona al minimo. Nelle zone urbane, dove il traffico procede lentamente e le fermate ai semafori sono frequenti, la concentrazione di CO può raggiungere punte particolarmente elevate.



Le concentrazioni di CO (così come quelle di NO_x e VOC) in atmosfera sono diminuite a partire dagli anni 1990s con l'adozione delle marmitte catalitiche.

Monossido di carbonio (CO)

Effetti sull'uomo:

- Il CO ha un'affinità con l'emoglobina 220 volte superiore a quella dell'ossigeno, formando un composto inattivo fisiologicamente (carbossiemoglobina) che non è in grado di garantire l'ossigenazione ai tessuti, in particolare al cervello ed al cuore.

Sono considerate fisiologiche concentrazioni di carbossiemoglobina minori dell'1% dell'emoglobina circolante nel sangue; (100-200 ppb) in aree urbane (CO 10-50 ppm), fino al 10% dei siti di legame dell'emoglobina sono occupati da CO.

- Esposizioni prolungate a concentrazioni di qualche decina di ppm possono provocare aumento delle pulsazioni cardiache, aumento della frequenza respiratoria e disturbi psicomotori. A 100 ppm di esposizione per diverse ore compaiono vertigini, cefalea e senso generale di spossatezza, che possono essere seguiti da collasso. A 250 ppm si verifica la perdita di coscienza, mentre la morte sopravviene a ≥ 750 ppm.

Effetti sull'ambiente:

- Gli effetti sull'ambiente sono da considerarsi trascurabili.

Monossido di carbonio (CO)

Valori guida e normativa:

Europa: 10 mg/m³ max daily 8-hour mean

Italia: 10 mg/m³ massima giornaliera calcolata su 8 ore

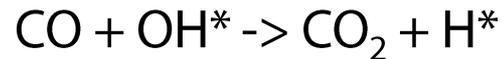
Il monossido di carbonio viene misurato mediante un analizzatore in continuo basato sulla tecnica spettrofotometrica dell'assorbimento non-dispersivo di radiazioni infrarosse attorno ai 4600 nm.

WHO Guidelines:

- 100 mg/m³ (90 ppm) for 15 minutes
- 60 mg/m³ (50 ppm) for 30 minutes
- 30 mg/m³ (25 ppm) for 1 hour
- 10 mg/m³ (10 ppm) for 8 hours.

Monossido di carbonio (CO)

Una volta emesso in atmosfera, CO va incontro ad ossidazione principalmente per reazione col radicale ossidrile OH*:



Il radicale idrogeno così prodotto si combina velocemente con O₂ formando il radicale idroperossido HO₂*:

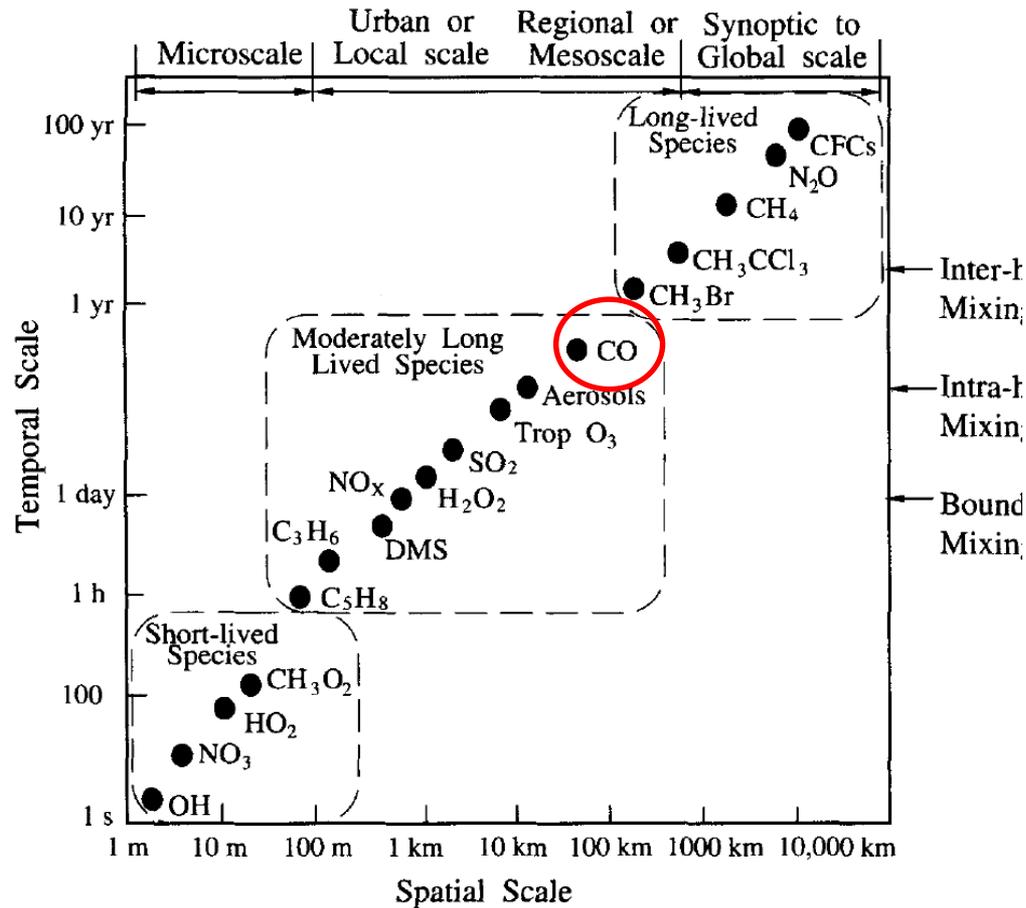


Quando NO è presente, la più importante reazione atmosferica a cui va incontro HO₂* è:



reazione che, come vedremo in seguito, ha un ruolo cruciale nella formazione di ozono troposferico (smog fotochimico).

Monossido di carbonio (CO)



Il tempo di residenza medio in atmosfera varia da 30 a 100 giorni.

Monossido di carbonio (CO)

Figure 3.11 CO emissions in the EU: (a) trend in emissions from the five most important key categories, 1990-2017; (b) share by sector group, 2017; (c) sectoral trends in emissions

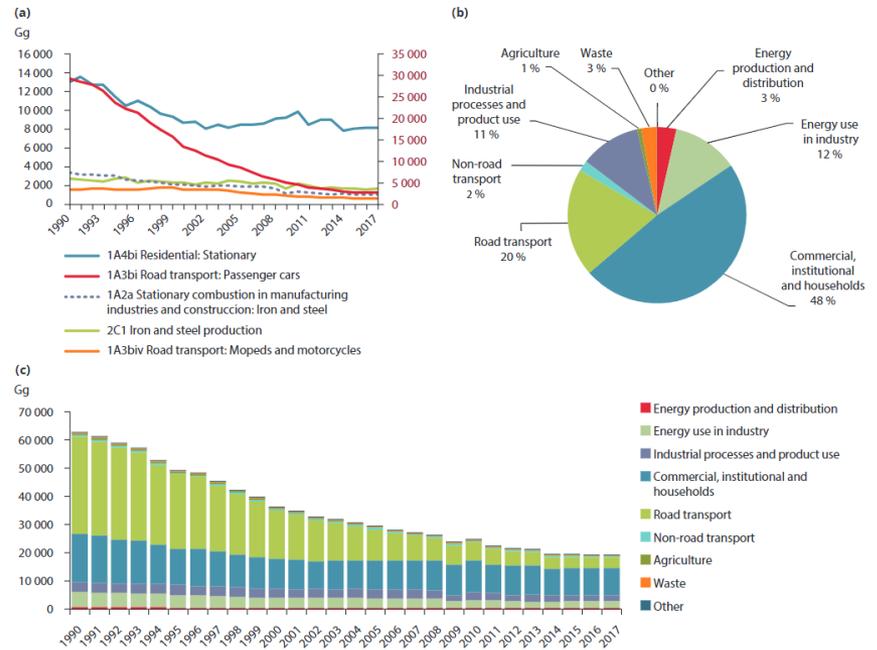
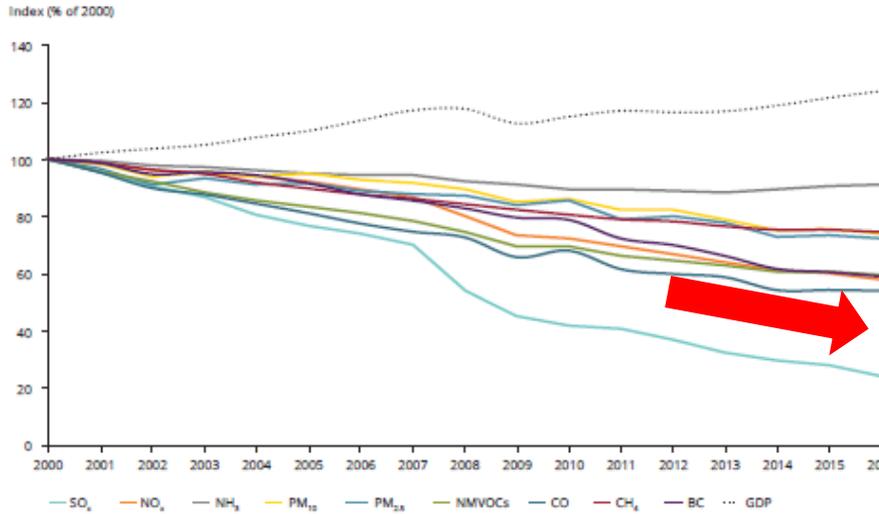
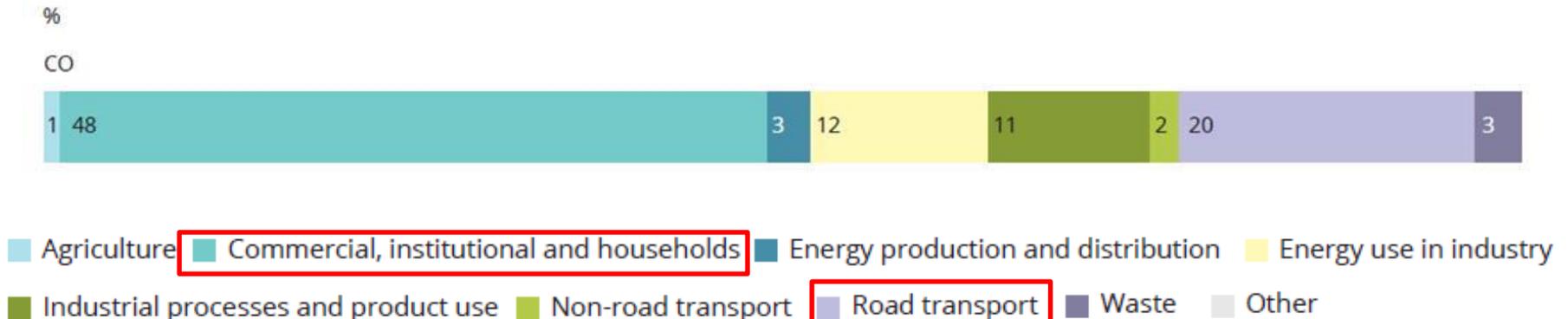
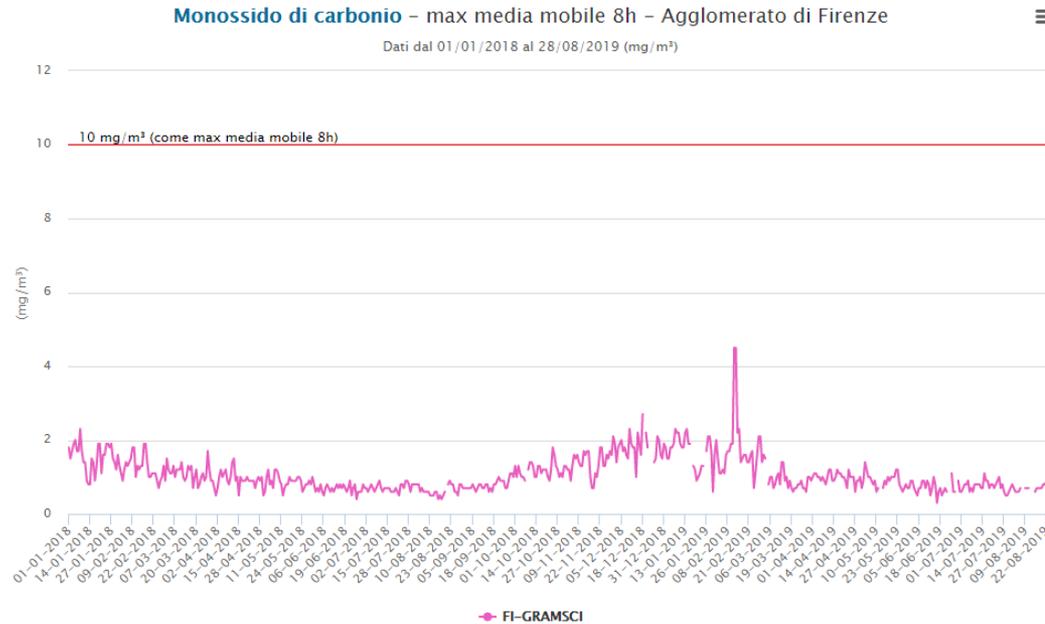


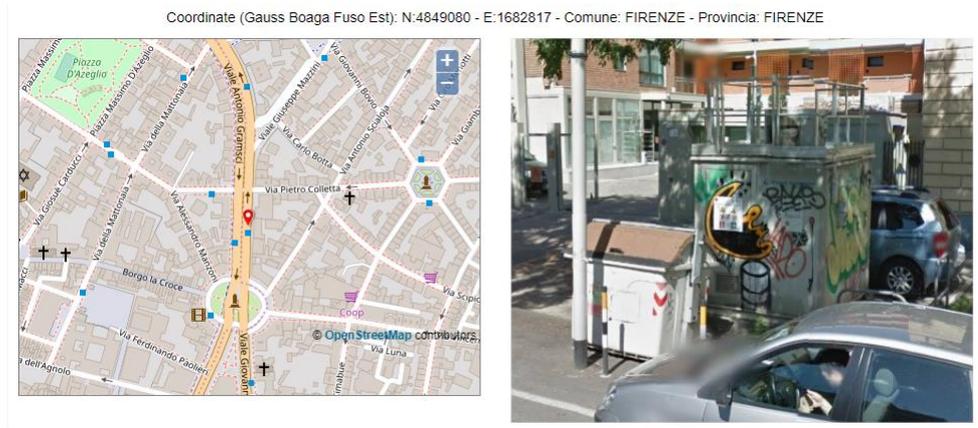
Figure 1.1 Contribution to EU-28 emissions of NO_x, PM₁₀ and PM_{2.5} from main source sectors in 2016



Monossido di carbonio (CO)



Stazione FI-GRAMSCI
Traffico urbano



Ossidi di azoto (NO_x)



Ossidi di azoto (NO_x)

Negli anni 90, gli NO_x hanno sostituito SO₂ come primo indicatore di scarsa qualità dell'aria urbana. Gas acidi e **precursori di O₃ troposferico**, i 2 principali NO_x sono NO e NO₂.

L'**ossido di azoto (NO)** è un gas incolore, insapore ed inodore. La sua tossicità è limitata. È un inquinante primario prodotto in larga parte da processi di combustione ad alta temperatura.

Il **biossido di azoto (NO₂)** è un gas tossico di colore giallo-rosso, dall'odore forte e pungente e con grande potere irritante; è un energico ossidante, molto reattivo e quindi altamente corrosivo. NO₂ è un inquinante sia primario (<5% di NO_x da combustione) che secondario (da ossidazione di NO in atmosfera). Svolge un ruolo fondamentale nella formazione dello smog fotochimico. Background: 3-5 µg/m³.

Gli NO_x contribuiscono alla formazione delle **piogge acide**. Sorgenti naturali di NO_x includono fulmini e incendi.

Ossidi di azoto (NO_x)

Effetti sull'uomo:

- L'azione sull'uomo di NO è relativamente blanda; inoltre, a causa della rapida ossidazione a NO₂, si fa spesso riferimento esclusivo solo a quest'ultimo inquinante, molto più tossico del monossido.
- NO₂ è un gas irritante per le mucose e può contribuire all'insorgere di varie alterazioni delle funzioni polmonari, bronchiti croniche, asma ed enfisema polmonare. Lunghe esposizioni anche a basse concentrazioni provocano una drastica diminuzione delle difese polmonari con conseguente aumento di rischio di affezioni alle vie respiratorie. Brevi esposizioni a 50-150 mg/m³ provocano risentimenti polmonari; 100 mg/m³, inalati per 1 minuto, provocano notevoli danni al tratto respiratorio; concentrazioni di 300-400 mg/m³ portano alla morte per fibrosi polmonare.

Ossidi di azoto (NO_x)

Effetti sull'ambiente:

- In alcuni casi, brevi periodi di esposizione a basse concentrazioni di NO₂ possono incrementare i livelli di clorofilla; lunghi periodi causano invece la senescenza e la caduta delle foglie più giovani. Il meccanismo principale di aggressione comunque è costituito dall'acidificazione del suolo (piogge acide).
- Gli NO_x e i loro derivati danneggiano anche edifici e monumenti, provocando un invecchiamento accelerato in molti casi irreversibile.
- Gli NO_x contribuiscono all'eutrofizzazione degli ecosistemi acquatici.

Biossido di azoto (NO₂)

Valori guida e normativa:

Europa: 40 µg/m³ annual mean

200 µg/m³ 1-hour mean (max 18 exceedences per year)

Italia: 40 µg/m³ media annua

200 µg/m³ media oraria (max 18 superamenti in un anno)

Il biossido di azoto viene determinato previa trasformazione in monossido di azoto (tramite convertitore a molibdeno a 375 °C), e si basa sulla misura della radiazione caratteristica emessa per chemiluminescenza dalla reazione in fase gassosa tra monossido di azoto e ozono.

Guidelines

NO₂:

40 µg/m³ annual mean

200 µg/m³ 1-hour mean

Ossidi di azoto (NO_x)

Formazione di NO_x:

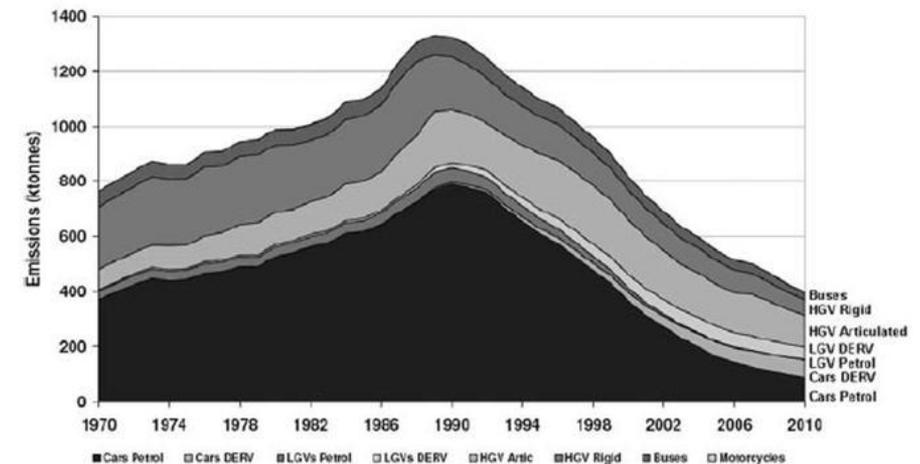
La principale sorgente antropogenica di NO_x è rappresentata dai processi di combustione.

La combustione produce una miscela di NO e NO₂, ma generalmente più del 90% degli NO_x prodotti è rappresentato da NO.



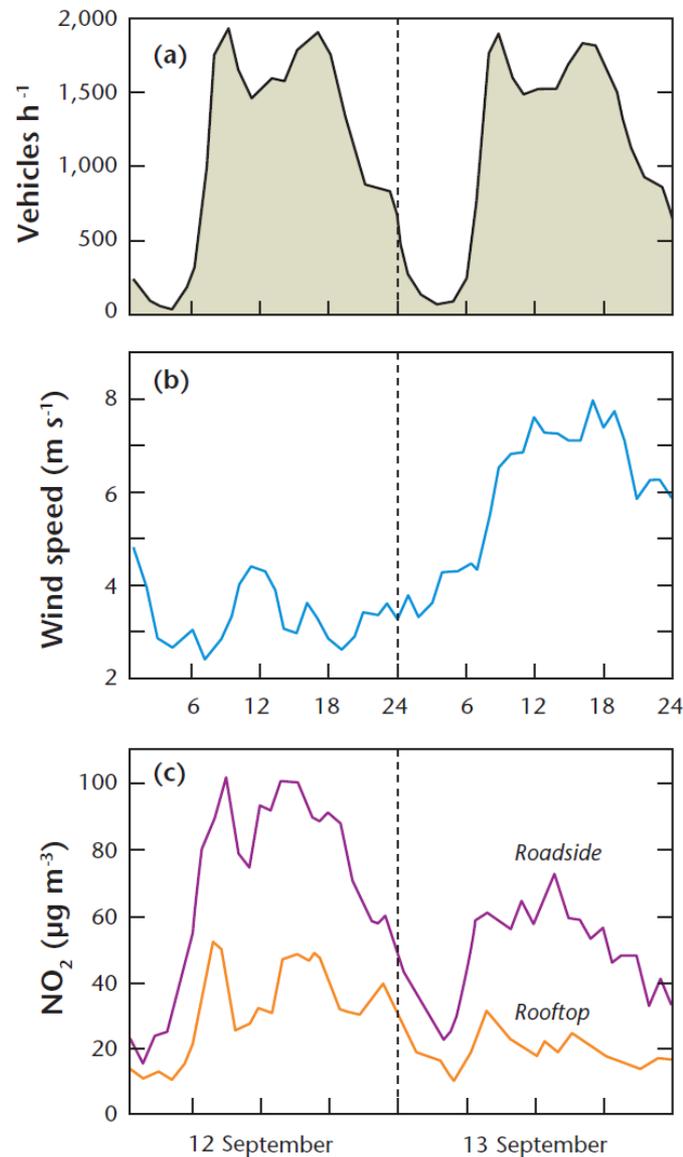
All'aumentare della T di combustione, la quantità di NO_x prodotti aumenta.

Le emissioni antropogeniche di NO_x sono rimaste piuttosto stabili fino agli anni 1940s, per poi aumentare bruscamente. Il settore dei trasporti è responsabile della maggior parte delle emissioni antropogeniche di NO_x.



NO_x emissions in the UK from Road Transport by Vehicle Type (ktonnes)

Ossidi di azoto (NO_x)



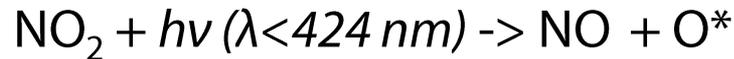
Relazioni tra intensità del traffico, velocità del vento e concentrazioni di NO_2 durante due giorni feriali consecutivi in una strada urbana trafficata.

Ossidi di azoto (NO_x)

Ciclo fotochimico diurno di NO_x:

NO₂, emesso o formato da ossidazione di NO, in presenza di luce solare (durante il giorno) va incontro a:

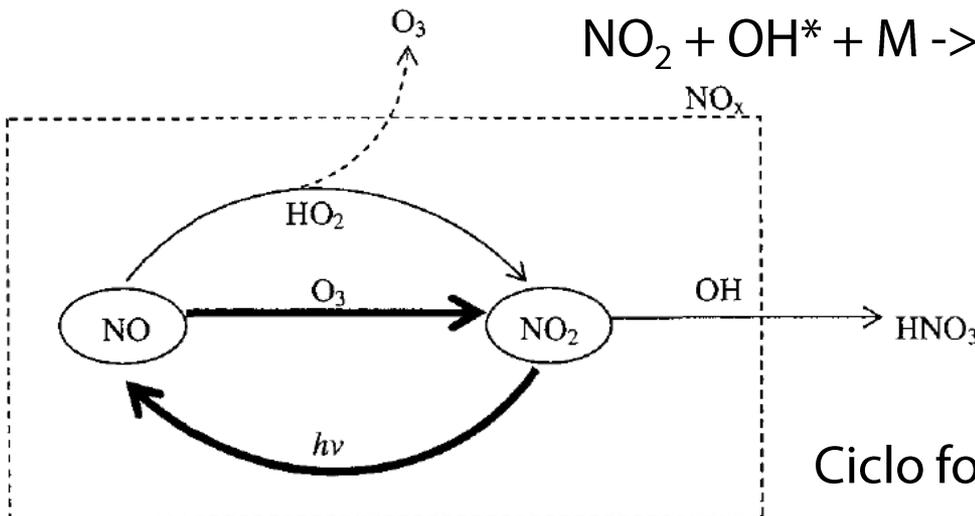
- fotolisi



Principale fonte di
ozono antropogenico



- reazione con OH* (principale meccanismo di rimozione di NO_x durante il giorno)

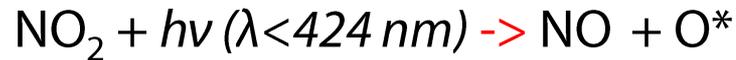


Ciclo fotochimico di NO_x

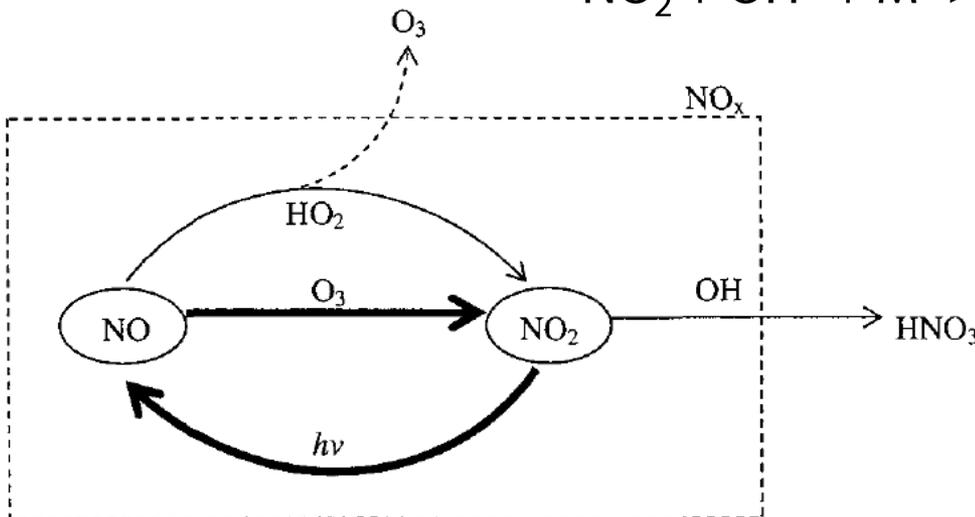
Ossidi di azoto (NO_x)

Ciclo fotochimico diurno di NO_x:

Possiamo riassumere ciclo fotochimico diurno di NO_x come:



Il ciclo termina quando NO₂ reagisce con OH* formando HNO₃ (N⁺⁵):



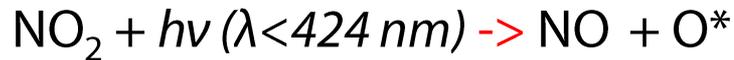
Principale processo di rimozione di NO_x durante il giorno.

Per concentrazioni di OH* medie (10⁶ molecole/cm³), il tempo di residenza di NO₂ in aria è di circa 1 giorno.

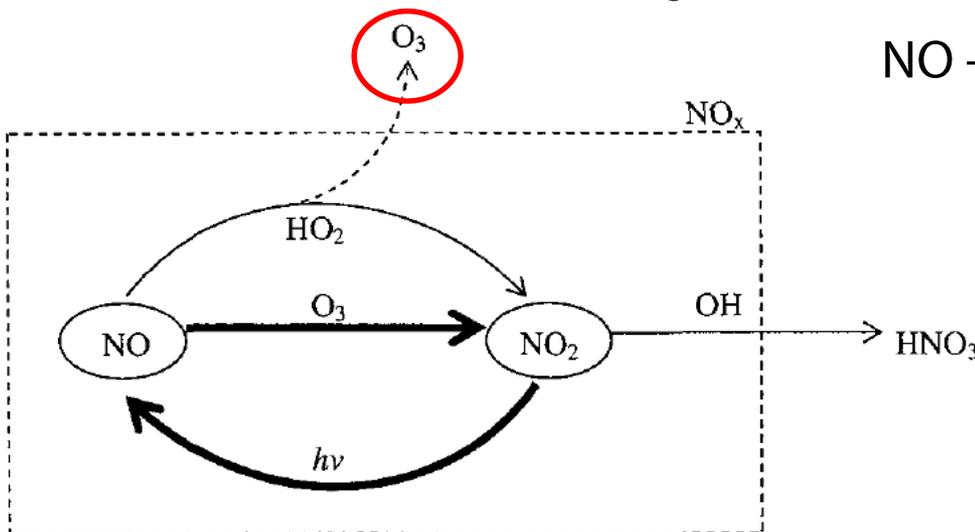
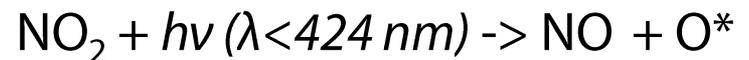
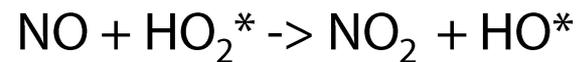
Ossidi di azoto (NO_x)

Ciclo fotochimico diurno di NO_x:

Possiamo riassumere ciclo fotochimico diurno di NO_x come:



NO può tuttavia reagire anche con HO₂^{*} portando alla formazione di una "nuova" molecola di O₃:

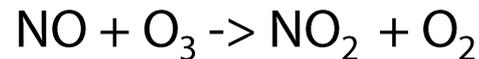


Ossidi di azoto (NO_x)

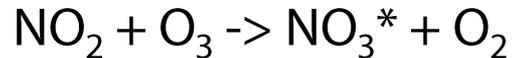
Chimica notturna di NO_x:

In assenza di luce solare, le reazioni fotochimiche non avvengono.

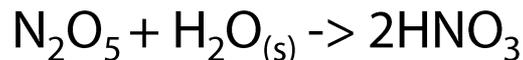
- NO reagisce rapidamente con O₃:



- NO₂ reagisce con O₃ formando il radicale nitrato NO₃*:

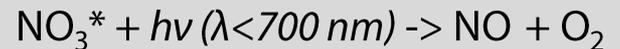


- Il radicale NO₃* reagisce con NO₂:

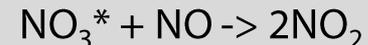


Processo di rimozione di NO_x
durante la notte.

Durante il giorno NO₃* viene rapidamente fotodissociato (lifetime ~5 sec) tramite 2 percorsi:



o reagisce molto rapidamente con NO:



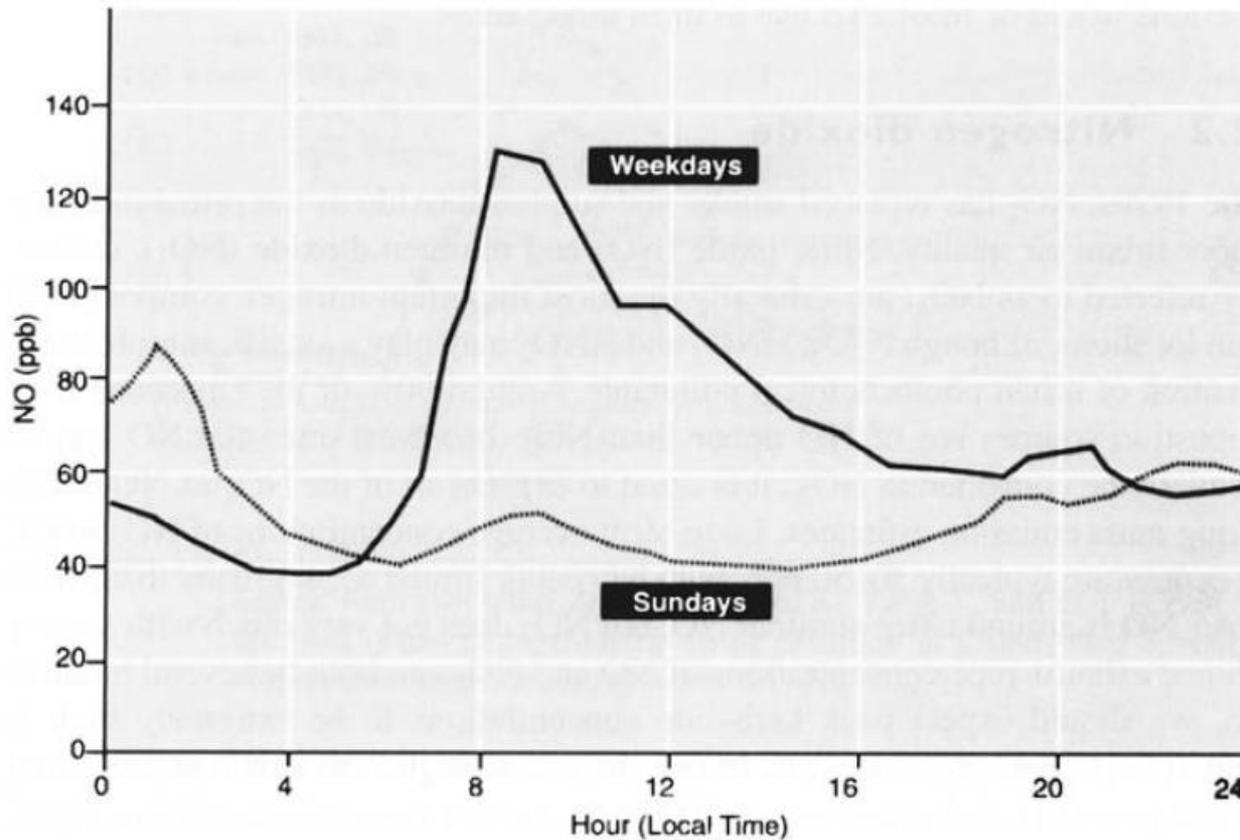
Concentrazioni max diurne di NO₃* < 1 ppt

Ossidi di azoto (NO_x)

- Nelle aree rurali, NO_x sono costituiti principalmente da NO_2 . Nelle aree urbane prevale invece NO.
- Le concentrazioni di NO in inverno sono circa il doppio di quelle estive, mentre NO_2 non mostra significative variazioni stagionali.
- Le concentrazioni di NO diminuiscono rapidamente allontanandosi dalle strade trafficate.
- Le variazioni diurne di NO_x sono funzione di traffico, dispersione atmosferica e reazioni fotochimiche.

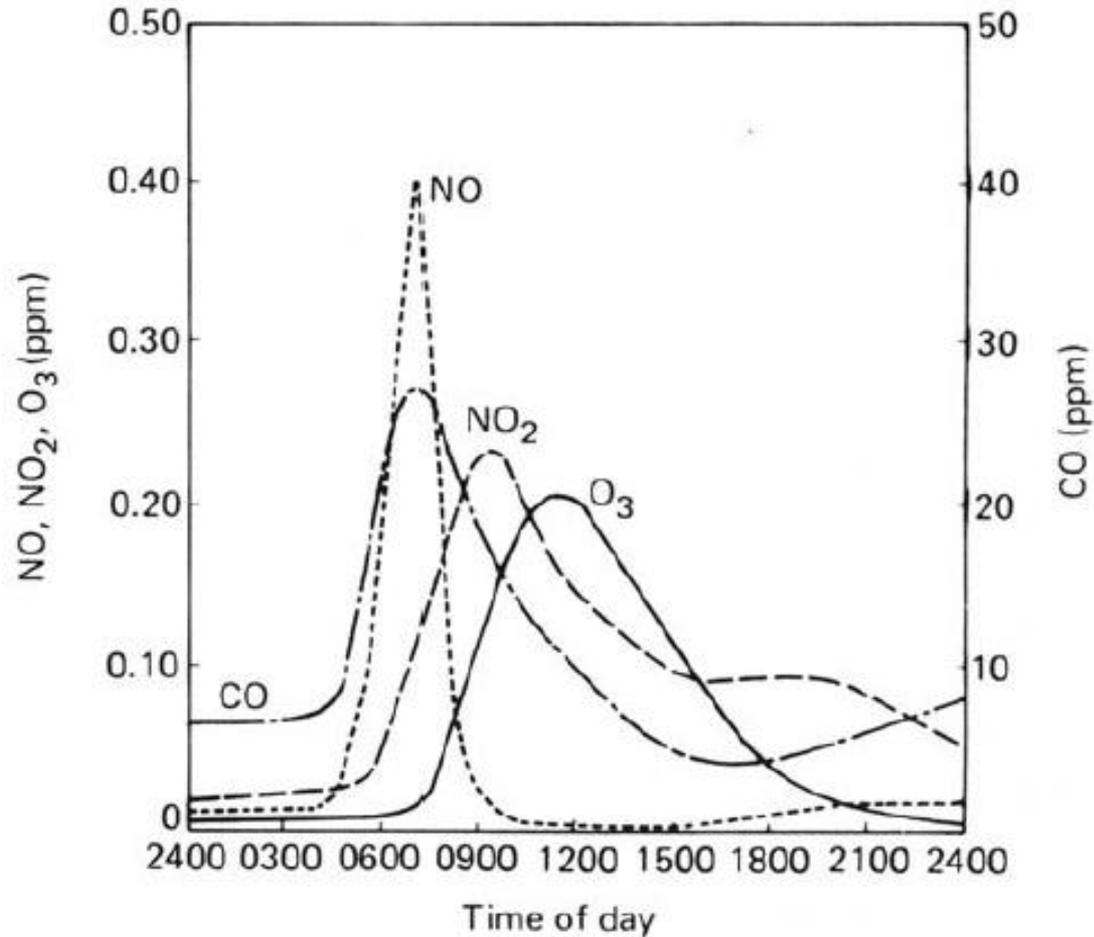
Ossidi di azoto (NO_x)

Ciclo giornaliero di NO:



Ossidi di azoto (NO_x)

Ciclo giornaliero di NO_2 :

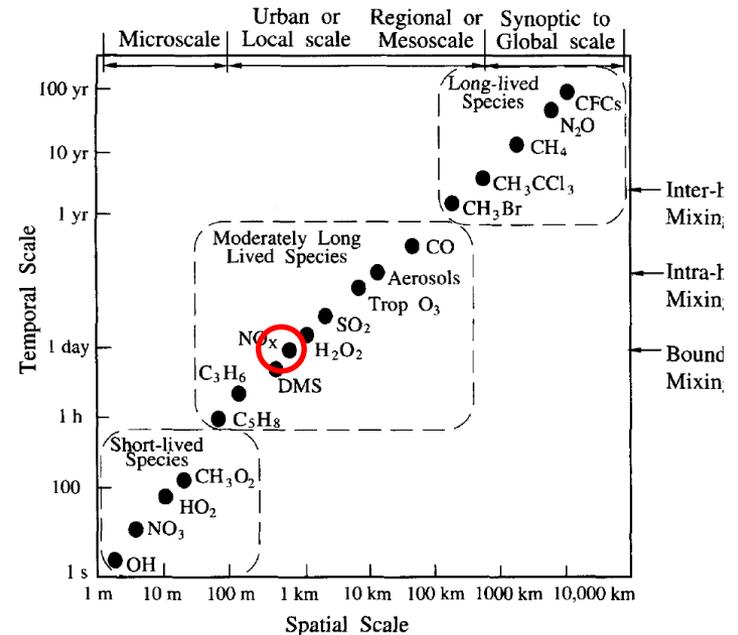


il cycles of ozone production and precursor concentrations in Los Angeles.

Ossidi di azoto (NO_x)

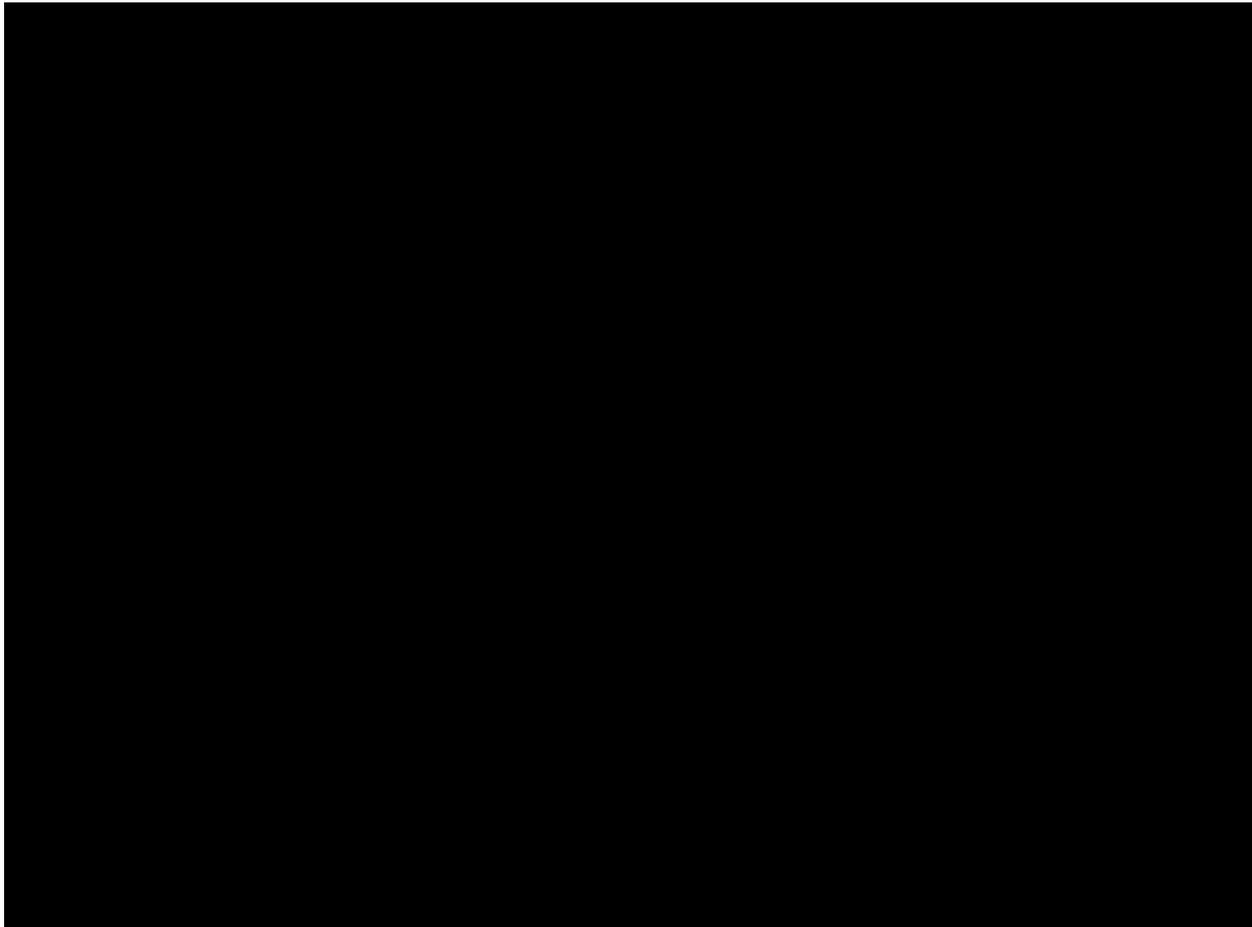
Il tempo di residenza di NO e NO_2 in atmosfera dipende dalla composizione atmosferica (presenza/assenza di ossidanti, es. OH^* , O_3 , ecc) e dalla disponibilità e intensità di luce solare (es. ora del giorno).

- Se l'aria contiene O_3 , NO reagisce rapidamente (da minuti a ore); altrimenti, la reazione con OH^* impiega 1-2 giorni.
- In presenza di HO_2^* , NO_2 reagisce in 1-3 ore; in presenza di intensa radiazione solare, NO_2 si decompone ancor più velocemente. In assenza di HO_2^* o UV, NO_2 reagisce con OH^* in 1-3 giorni.



Ossidi di azoto (NO_x)

Time lapse della formazione di smog fotochimico a Pechino lunedì 2 gennaio 2017. Il video è stato registrato nell'arco di 20 minuti:



Ossidi di azoto (NO_x)

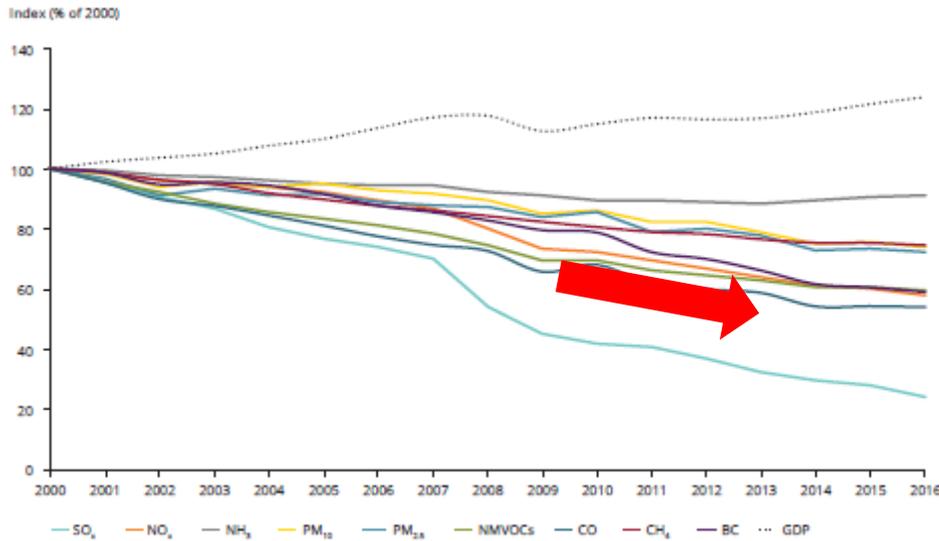
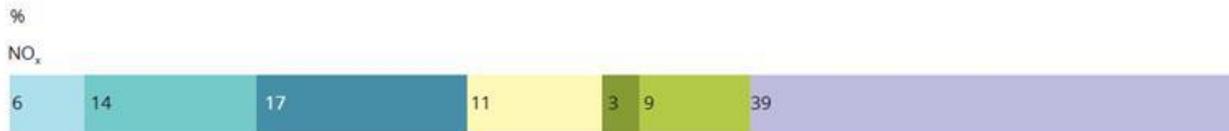
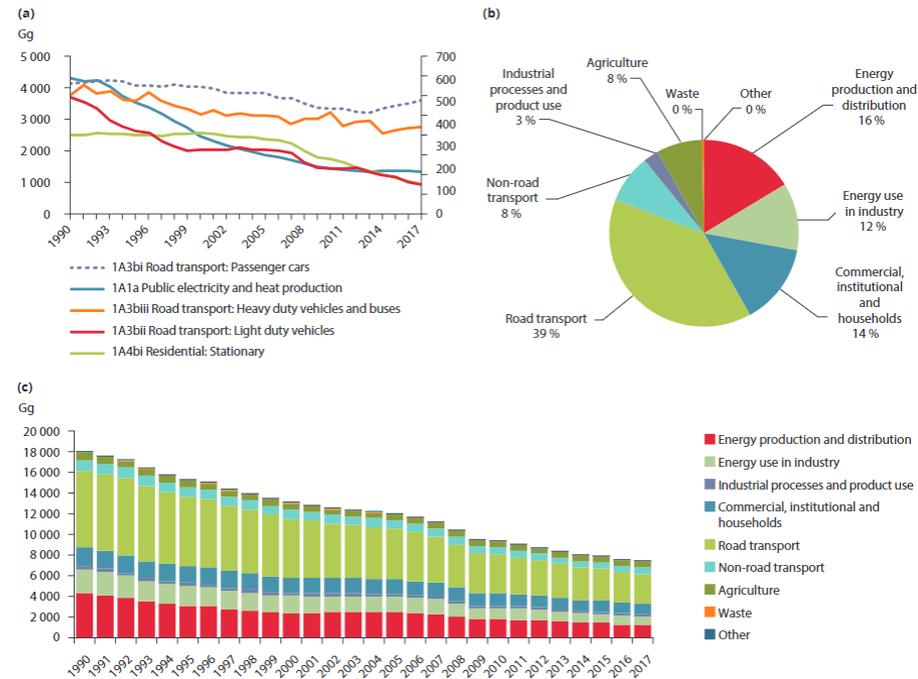


Figure 1.1 Contribution to EU-28 emissions of NO_x, PM₁₀ and PM_{2.5} from main source sectors in 2016

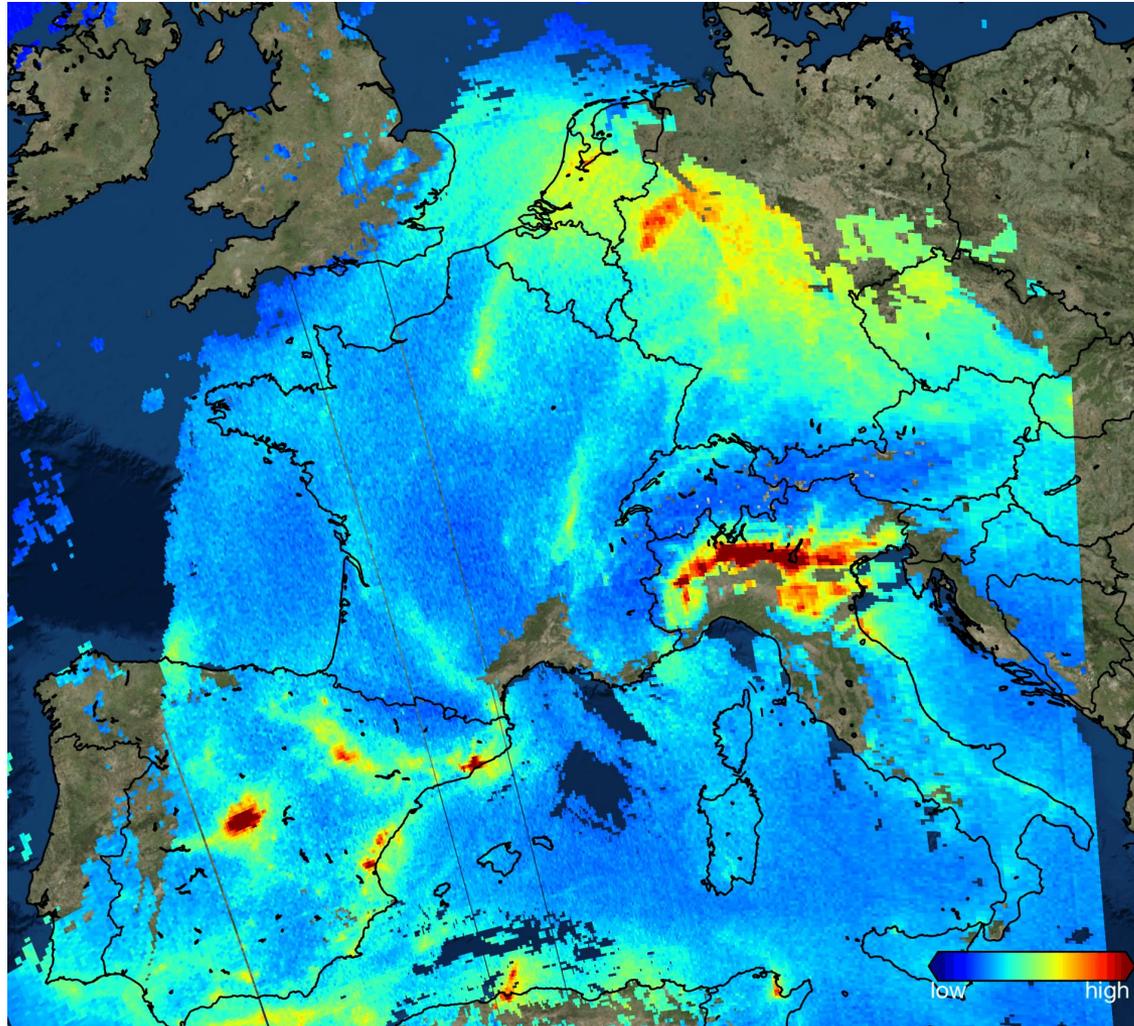


■ Agriculture
 ■ Commercial, institutional and households
 ■ Energy production and distribution
 ■ Energy use in industry
■ Industrial processes and product use
 ■ Non-road transport
span style="background-color: #9370DB;">■ Road transport
 ■ Waste
 ■ Other

Figure 3.5 NO_x emissions in the EU: (a) trend in emissions from the five most important key categories, 1990-2017; (b) share by sector group, 2017; (c) sectoral trends in emissions



Ossidi di azoto (NO_x)

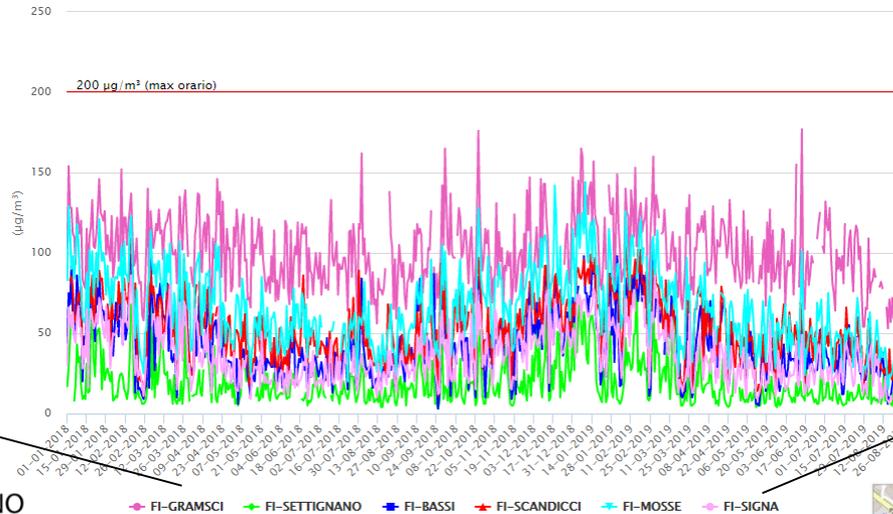


Livelli di NO_2 rilevati dalla missione Copernicus Sentinel-5P in Europa il 22 Novembre 2017.

Ossidi di azoto (NO_x)

Biossido di Azoto – max orario – Agglomerato di Firenze

Dati dal 01/01/2018 al 28/08/2019 (µg/m³)



Stazione FI-GRAMSCI
Traffico urbano

Coordinate (Gauss Boaga Fuso Est): N:4849090 - E:162817 - Comune: FIRENZE - Provincia: FIRENZE



Stazione FI-SIGNA
Fondo urbano

Coordinate (Gauss Boaga Fuso Est): N:4851063 - E:1656808 - Comune: SIGNA - Provincia: FIRENZE



Stazione FI-MOSSE
Traffico urbano

Coordinate (Gauss Boaga Fuso Est): N:4850406 - E:1679502 - Comune: FIRENZE - Provincia: FIRENZE



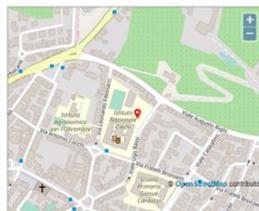
Stazione FI-SETTIGNANO
Fondo suburbano

Coordinate (Gauss Boaga Fuso Est): N:4850978 - E:1656941 - Comune: FIRENZE - Provincia: FIRENZE



Stazione FI-BASSI
Fondo urbano

Coordinate (Gauss Boaga Fuso Est): N:4850623 - E:1684020 - Comune: FIRENZE - Provincia: FIRENZE



Stazione FI-SCANDICCI
Fondo urbano

Coordinate (Gauss Boaga Fuso Est): N:4847120 - E:1676484 - Comune: SCANDICCI - Provincia: FIRENZE



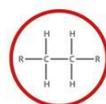
Composti organici volatili (VOC)



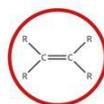
VOCs

Composti organici = composti del carbonio in cui questo elemento ha numero di ossidazione inferiore a +4 (sono esclusi quindi CO_2 , HCO_3 , CO_3 e, per convenzione, CO).

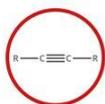
Composti organici volatili (VOC o COV) = composti organici con elevata pressione di vapore a T ambiente.



ALKANES



ALKENES

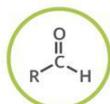


ALKYNES

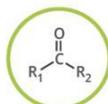


AROMATICS

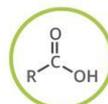
HYDROCARBONS



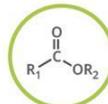
ALDEHYDES



KETONES

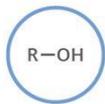


CARBOXYLIC ACIDS



ESTERS

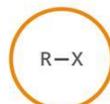
HETEROATOMIC COMPOUNDS



ALCOHOLS



ETHERS



HALOALKANES



AMINES



THIOLS

I composti organici più semplici (**idrocarburi**) contengono solo atomi di idrogeno legati alla struttura di carbonio. La polarità delle molecole di idrocarburi è in genere bassa, i.e. gli idrocarburi non sono molto solubili in acqua a temperatura ambiente. Tuttavia, atomi di altri elementi (e.g. O, N, S, alogeni) possono essere incorporati nelle molecole organiche (**composti organici eteroatomici**) modificandone significativamente le proprietà chimico-fisiche.

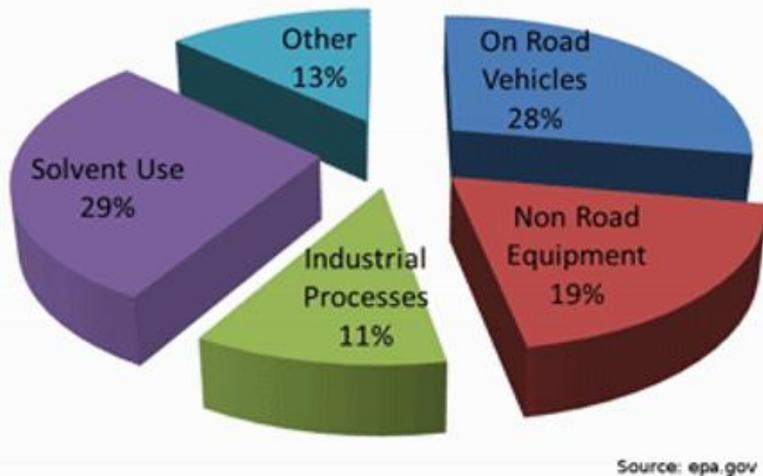
La presenza di doppi (o tripli) legami carbonio-carbonio o di legami polari aumentano la reattività dei composti organici. Il sito di reattività in una molecola organica è chiamato **gruppo funzionale** e determina il comportamento chimico del composto.



Il termine organico deriva da una credenza del XVIII secolo secondo la quale i composti organici possono essere formati solo all'interno di sistemi biologici naturali. Secondo il concetto del "vitalismo", gli organismi viventi sarebbero dotati di una "forza vitale" in assenza della quale nessun composto organico potrebbe essere format. Questa idea venne superata nel 1828, quando il chimico tedesco Friedrich Wöhler sintetizzò l'urea (H_2NCONH_2), una sostanza organica presente nell'urina dei mammiferi, facendo reagire due composti inorganici, i.e. l'isocianato di argento (AgNCO) and il cloruro di ammonio (NH_4Cl).

VOCs

Where Do VOCs Come From



Emissioni naturali:

vegetazione, degradazione di materia organica, vulcani, incendi

Emissioni antropogeniche:

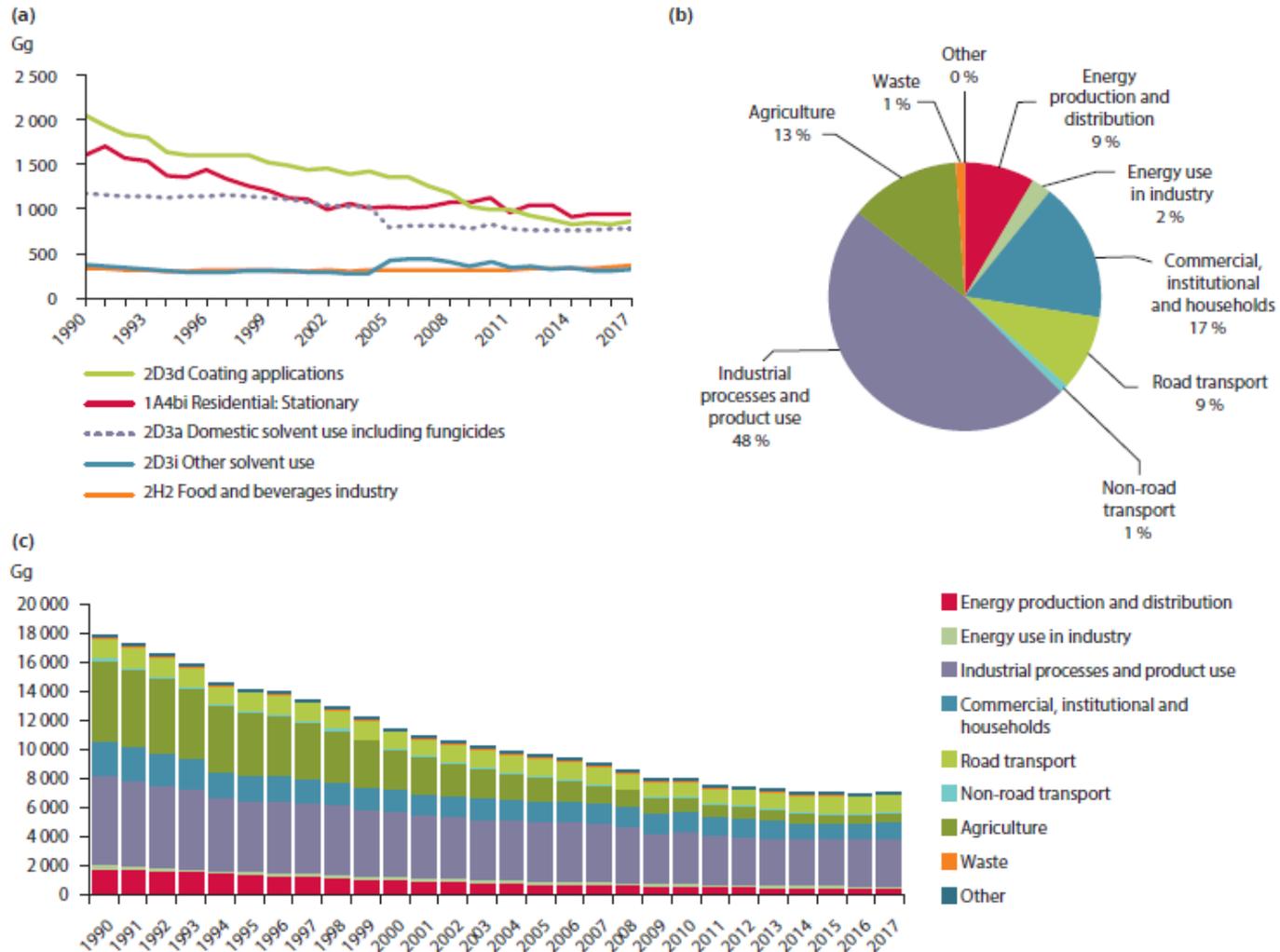
Incompleta combustione di idrocarburi (gas di scarico di autoveicoli, scarichi industriali, combustione di biomasse, inceneritori), evaporazione di solventi, detersivi, insetticidi, erbicidi e carburanti, spray, ecc.

Includono composti tossici, cancerogeni, mutageni e teratogeni, emessi direttamente come inquinanti primari o prodotti in atmosfera come inquinanti secondari.

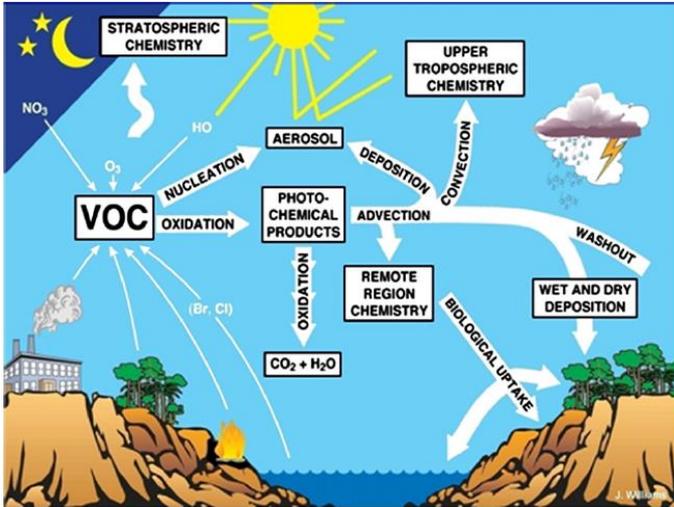
Contribuiscono alla produzione di ozono troposferico. Includono gas serra e sostanze ozono-distruttrici.

VOCs

Figure 3.6 NMVOC emissions in the EU: (a) trend in emissions from the five most important key categories, 1990-2017; (b) share by sector group, 2017; (c) sectoral trends in emissions



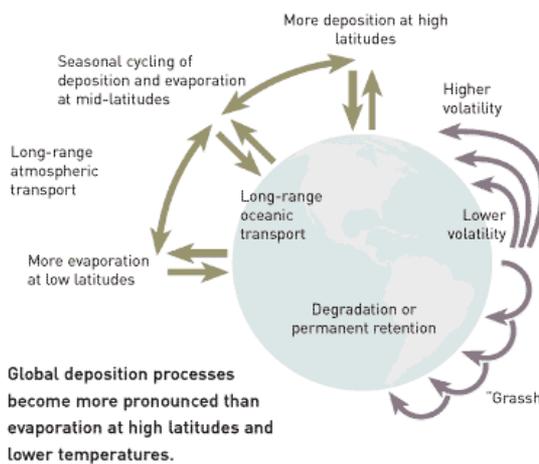
VOCs



Una volta introdotti in atmosfera, i VOC possono andare incontro a una serie di processi fisici, chimici, biologici o fotochimici che portano alla loro rimozione o trasformazione chimica in atmosfera.

Il tempo di residenza in atmosfera dipende sia dalle caratteristiche fisico-chimiche del composto organico sia da fattori ambientali.

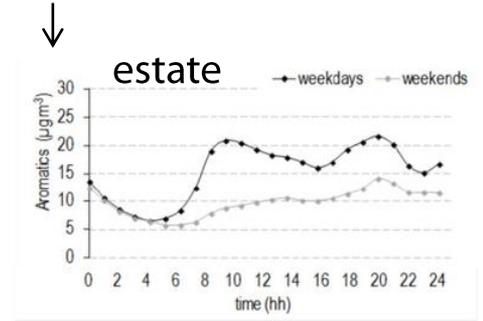
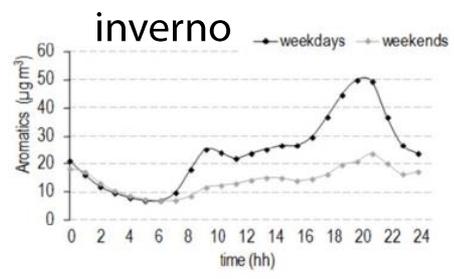
GLOBAL DISTILLATION: THE MIGRATION PROCESS OF POPs



The higher the volatility of the chemical, the more likely it is to reach the poles.

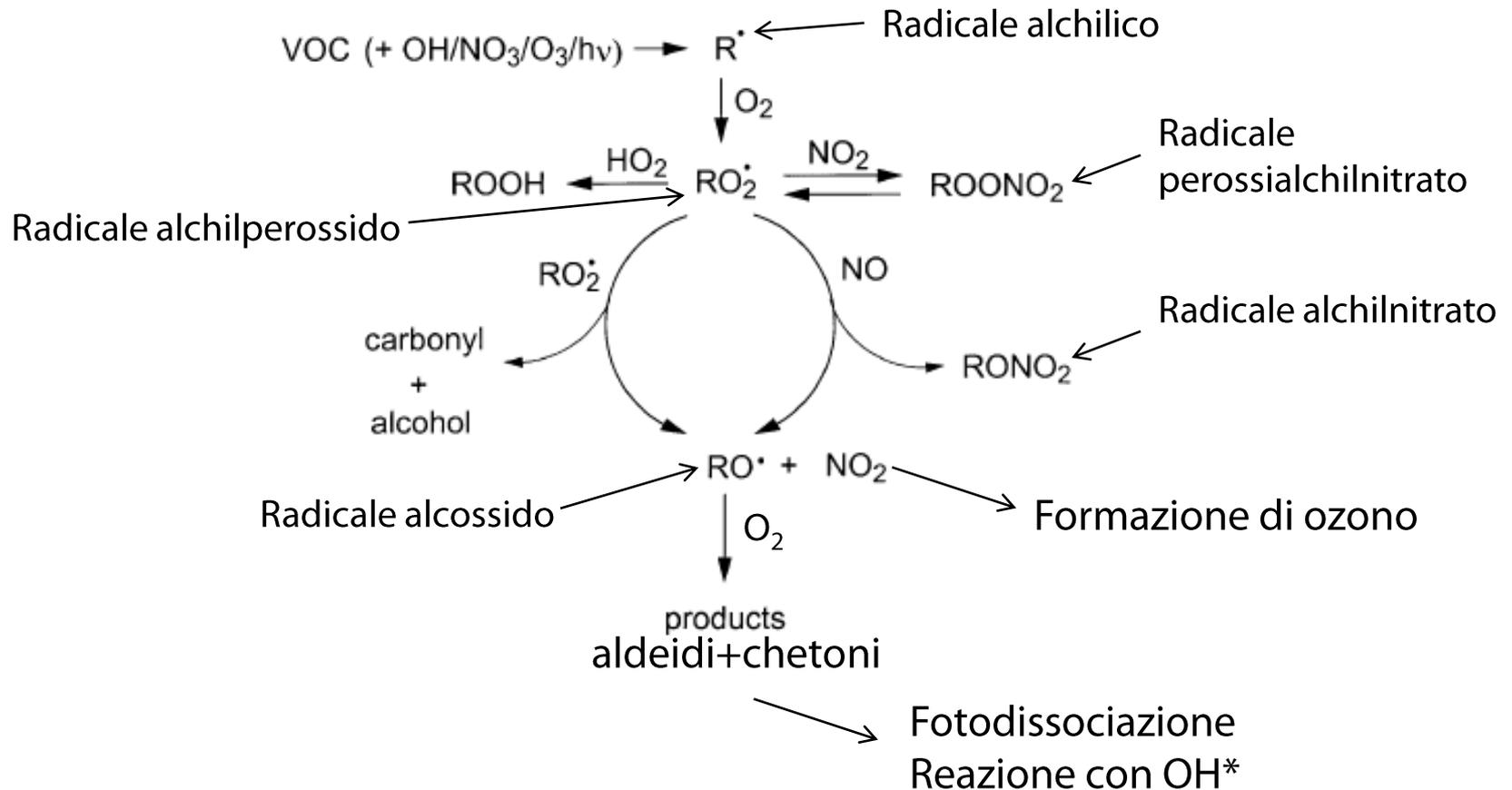
Chemicals may travel to the poles in several steps, sometimes taking decades before degrading or being permanently retained.

Source: UNEP.



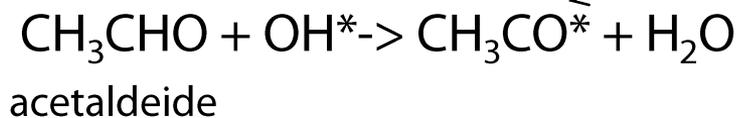
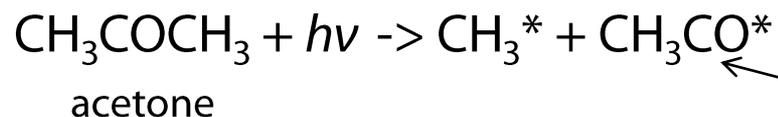
VOCs

Le trasformazioni chimiche che i VOC possono subire in atmosfera sono fotolisi e reazioni con radicali liberi, in particolare con il radicale OH^* durante il giorno e con il radicale NO_3^* di notte.



VOCs

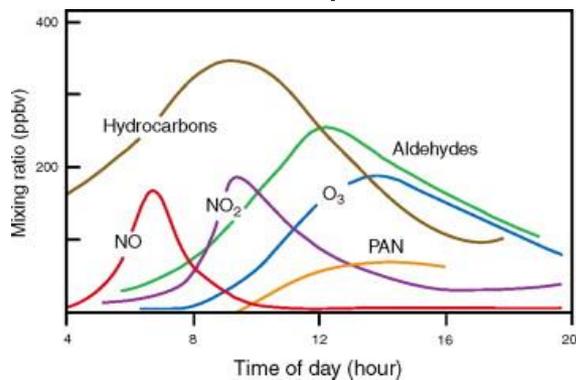
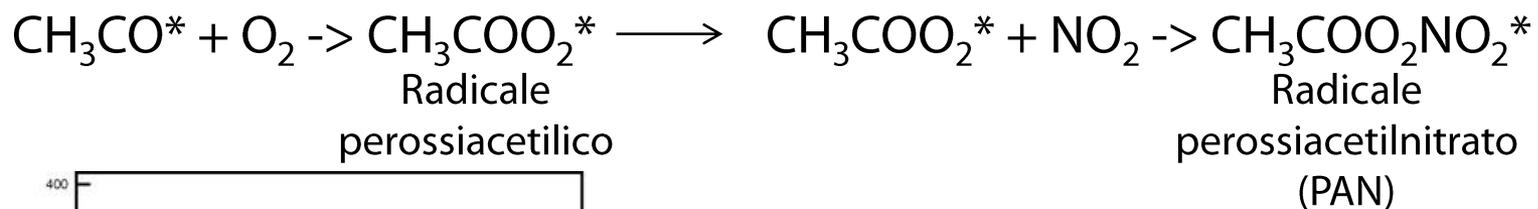
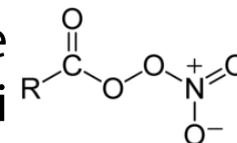
Reazioni di aldeidi e chetoni:



Radicale
acetilico



Il radicale acetilico è considerato il precursore nella formazione del **perossiacetilnitrato (PAN)**, uno dei più importanti prodotti ossidanti dello smog fotochimico, tramite le seguenti reazioni a catena:



I PAN sono potenziali riserve di NO_x .

Ozono (O_3)

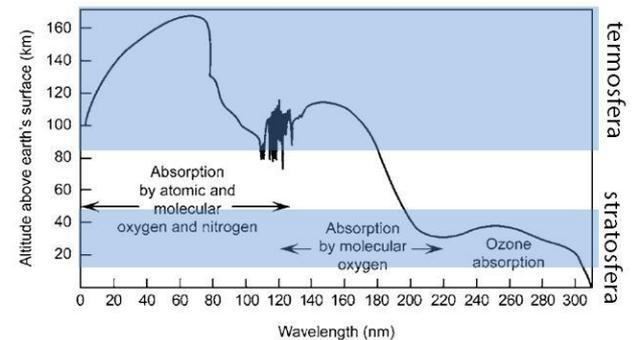
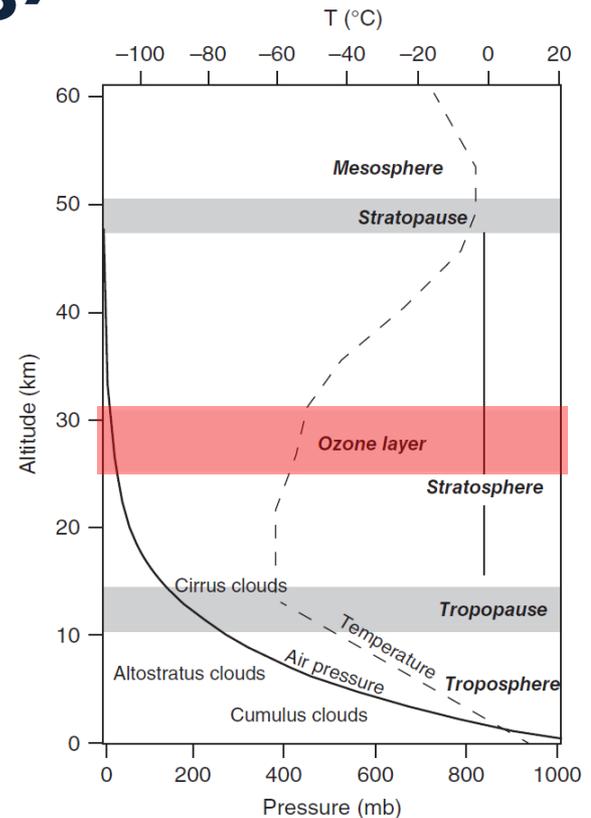


Ozono (O₃)

Circa il 90% dell'O₃ naturale si trova nella stratosfera, a circa 30 km di altitudine (strato di ozono) dove svolge un'azione schermante nei confronti delle radiazioni solari più energetiche.

Nella troposfera, la produzione diretta di O₃ tramite fotolisi di O₂ è parzialmente inibita dal fatto che solo radiazione con $\lambda > 290$ nm penetra nella troposfera.

Nella troposfera, O₃ è presente come **inquinante secondario**, formato da NO_x e VOC, ed è il principale componente dello **smog fotochimico**.



Ozono (O₃)

Nella bassa troposfera, O₃ è un potente ossidante che a concentrazioni elevate (≥ 100 ppb) risulta nocivo per uomini (irritante per gli occhi, determina disturbi respiratori), piante (riduce la produttività dei raccolti e compromette la salute delle foreste) e materiali.

Nell'alta troposfera, O₃ è inoltre un importante gas serra.

I livelli di O₃ troposferico stanno aumentando soprattutto nell'emisfero Nord per effetto delle emissioni antropogeniche, con concentrazioni più che raddoppiate durante il secolo scorso.

Le concentrazioni di background sono di 10-20 ppb.

Nelle aree urbane le concentrazioni di ozono superano spesso 100 ppb.

Il record si è registrato a Los Angeles nel 1955, quando la concentrazione di O₃ è salita fino a 680 ppb.

Ozono (O₃)

Effetti sull'uomo:

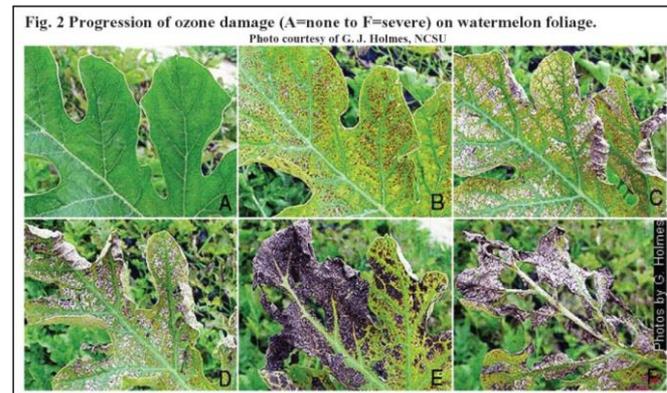
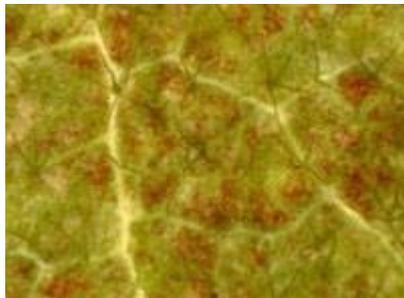
- L'ozono troposferico è un inquinante molto tossico per l'uomo, è un irritante per tutte le membrane mucose ed una esposizione critica e prolungata può provocare tosse, mal di testa e perfino edema polmonare.
- La sua pericolosità nei confronti dell'uomo deriva dall'alto potere ossidante della molecola di O₃ e dalla sua capacità di giungere facilmente a livello alveolare, con conseguenti patologie dell'occhio e dell'apparato respiratorio:
 - Può irritare il sistema respiratorio
 - Può ridurre la funzione polmonare
 - Può aggravare l'asma e altre patologie respiratorie
 - Può infiammare le cellule che rivestono le vie respiratorie
- Recenti studi hanno suggerito possibili danni dell'ozono sull'apparato cardio-vascolare, i.e. capacità di indurre patologie acute (ischemia, scompenso cardiaco, aritmie cardiache)

Gli effetti sono tanto più intensi quanto più lunga è la durata dell'esposizione, quanto maggiore è l'attività fisica svolta dall'individuo e quanto più è compromesso lo stato di salute respiratoria dell'individuo.

Ozono (O₃)

Effetti sull'ambiente:

- L'ozono troposferico svolge una marcata azione fitotossica nei confronti degli organismi vegetali, con effetti immediatamente visibili di necrosi fogliare ed effetti meno visibili come alterazioni enzimatiche e riduzione dell'attività di fotosintesi.
- L'ozono viene assorbito dalle piante attraverso gli stomi presenti nelle foglie, provocando per lo più un'induzione di senescenza precoce causata da un'alterazione dell'integrità e della funzionalità delle membrane cellulari.
- Una conseguenza dovuta all'esposizione all'ozono è la riduzione dell'attività di fotosintesi clorofilliana. Questo può anche comportare la comparsa di sintomi fogliari (clorosi, necrosi), sì che viene meno la capacità depurativa dell'aria.



Ozono (O₃)

Valori guida e normativa:

Europa: 120 µg/m³ 8-hour mean (max 25 exceedences over 3 years)*

Italia: 120 µg/m³ media su 8 ore (max 25 superamenti su 3 anni)*

La misura della concentrazione di ozono si basa sulla tecnica spettrofotometrica dell'assorbimento, da parte delle molecole di ozono, di radiazioni ultraviolette di lunghezza d'onda pari a 254 nm.

- * Soglia d'informazione: 180 µg/m³ media oraria
Soglia d'allarme: 240 µg/m³ media oraria

Guideline

O₃: 100 µg/m³ 8-hour mean

Ozono (O₃)

Valori guida e normativa:

Europa: 120 µg/m³ 8 hour mean (max 25 exceedences over 3 years)

Ital

La r
dell'
lung

Regione Toscana

Menu

Città di Firenze

Home > Blog > Ozono, superamento della soglia di concentrazione elevata per il 3 e 4 luglio

Condividi

Ozono, superamento della soglia di concentrazione elevata per il 3 e 4 luglio

Ambiente

Parole chiave: ozono

03 Luglio 2019

Le precauzioni da adottare

L'Agenzia regionale per la protezione ambientale della Toscana (ARPAT) ha comunicato con il bollettino di oggi il superamento della soglia di concentrazione di ozono con criticità elevata (i valori misurati superano la soglia massima oraria di 180 µg/m³) per il 3 e 4 luglio.

Nella fascia pomeridiana è perciò importante adottare alcune precauzioni per evitarne gli effetti dannosi:

- evitare attività ricreative con esercizio fisico intenso all'aperto
- evitare, nei lavori all'aperto, di concentrare nella fascia pomeridiana le attività faticose e effettuare pause in zone o strutture ombreggiate
- per i soggetti più sensibili (bambini, anziani, asmatici o persone affette da malattie dell'apparato respiratorio), evitare la permanenza prolungata all'aria aperta

Per approfondimenti:

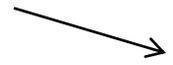
ARPAT - Mappa ozono

Comune di Firenze

WHO, 2006

Ozono (O₃)

O₃ troposferico è un **inquinante secondario** e il principale componente dello **smog fotochimico** (detto anche smog ossidativo).



Prodotto da una serie di reazioni fotochimiche

Inquinamento atmosferico che riduce la visibilità

Precursori: NO_x, VOC, CO, CH₄

Inquinanti secondari: O₃



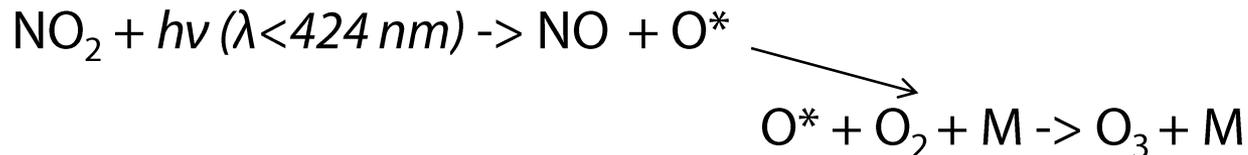
Los Angeles (USA)
680 ppb O₃ nel 1955

TABLE 1.2 Historical Aspects of Sulfurous (London) and Photochemical (Los Angeles) Air Pollution

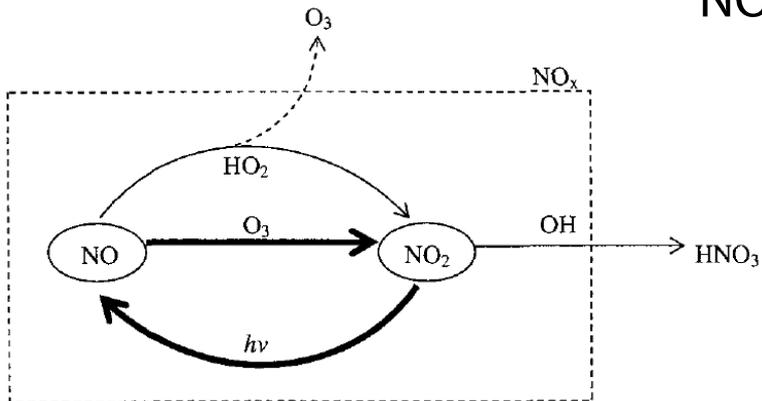
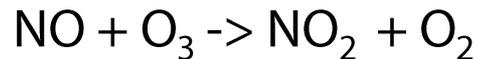
Characteristics	Sulfurous (London)	Photochemical (Los Angeles)
First recognized	Centuries ago	Mid-1940s
Primary pollutants	SO ₂ , soot particles	VOC, NO _x
Secondary pollutants	H ₂ SO ₄ , sulfate aerosols, etc.	O ₃ , PAN, HNO ₃ , aldehydes, particulate nitrate and sulfate, etc.
Temperature	Cool (< 35°C)	Hot (> 75°F)
Relative humidity	High, usually foggy	Low, usually hot and dry
Type of inversion	Radiation (ground)	Subsidence (overhead)
Time air pollution peaks	Early morning	Noon to evening

Ozono (O₃)

La fotolisi di NO₂ naturale in presenza di fotoni UV rappresenta il principale processo di formazione di O₃ troposferico:



O₃ così prodotto reagisce con NO, rigenerando NO₂:

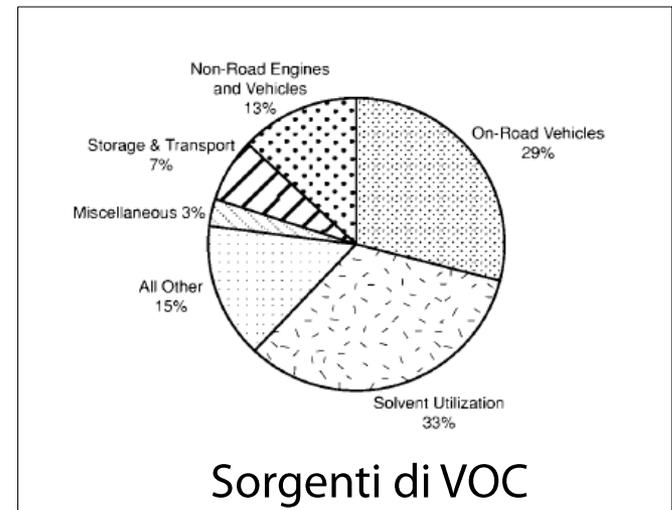
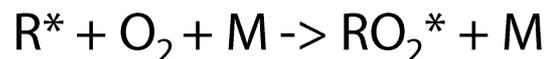
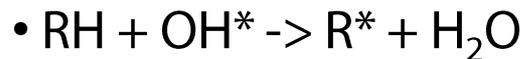
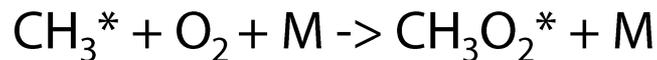
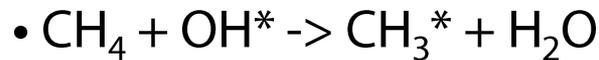
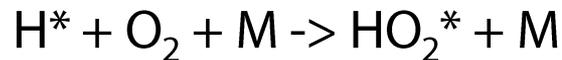
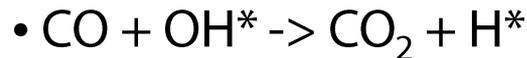


Questo ciclo di reazioni genera quindi un quantitativo trascurabile (<1 ppb) di O₃ troposferico.

Se però NO₂ in aria aumenta, per una qualche ragione, O₃ addizionale può essere formato nella troposfera come inquinante secondario.

Ozono (O₃)

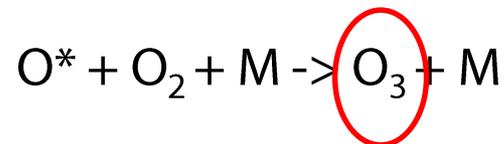
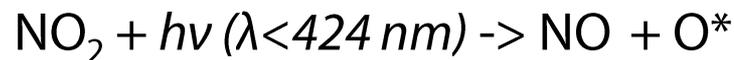
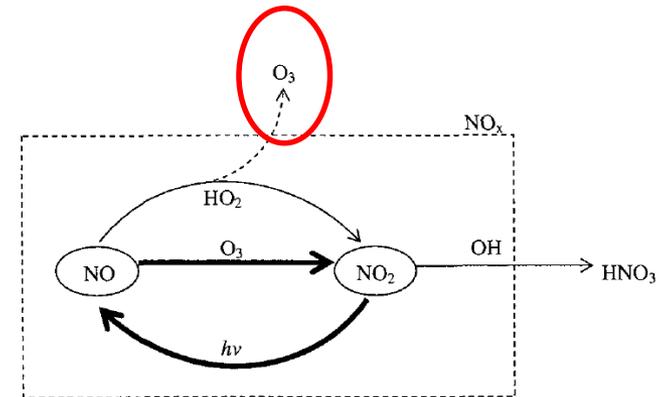
In aree inquinate da scarichi risultanti dalla combustione di combustibili fossili, oltre a NO_x sono presenti numerosi altri composti, e.g. CO, CH₄, VOC. Si tratta di specie ridotte, generate da processi di combustione incompleta, che in atmosfera tendono a ossidarsi per reazione con OH*, formando radicali perossilici (HO₂*, CH₃O₂*, RO₂*):



Ozono (O₃)

I radicali perossilici così prodotti, altamente reattivi, possono ossidare NO producendo NO₂ aggiuntivo rispetto a quello risultante dal ciclo fotochimico di NO_x:

- $\text{NO} + \text{HO}_2^* \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}^*$
- $\text{NO} + \text{CH}_3\text{O}_2^* \rightarrow \text{NO}_2 + \text{CH}_3\text{O}^*$
- $\text{NO} + \text{RO}_2^* \rightarrow \text{NO}_2 + \text{RO}^*$



Parte di NO₂ può reagire con vari VOC per formare composti chimici tossici come il perossiacetil-nitrato (PAN).

Ozono (O₃)

Il tipico colore brunastro dello smog fotochimico è dato dalla presenza di alti livelli di NO₂, che assorbe radiazione $\lambda < 424$ nm.

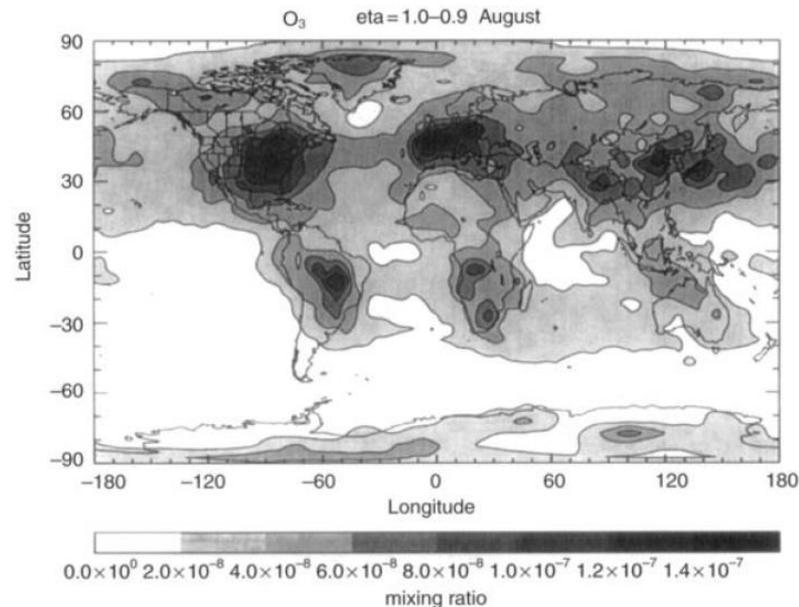


Los Angeles (USA)
680 ppb O₃ nel 1955

Ozono (O_3)

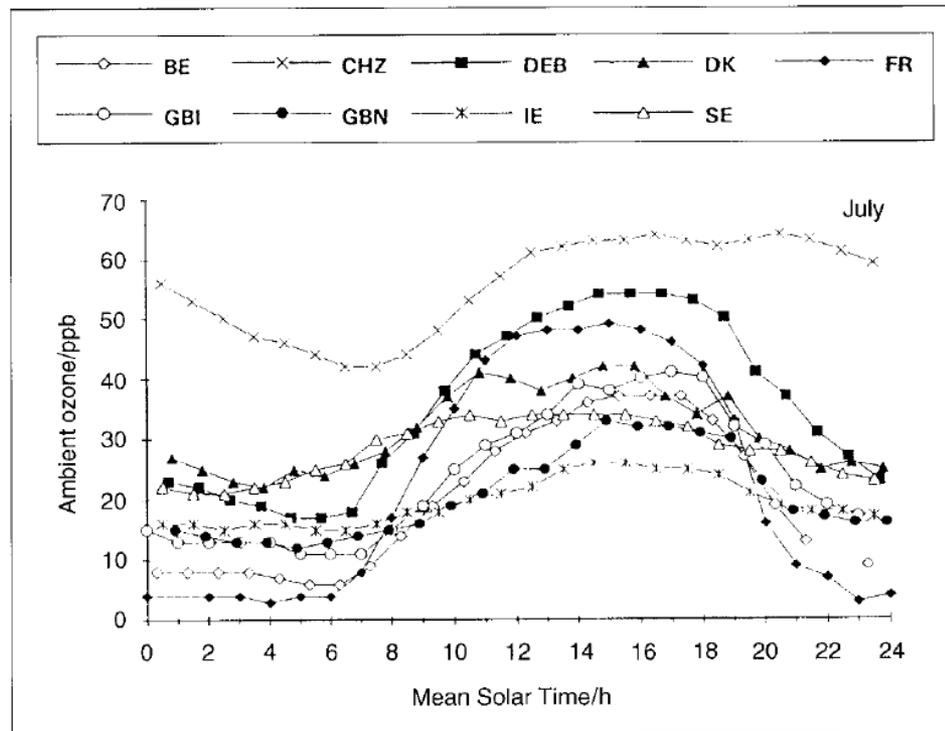
Le concentrazioni di O_3 troposferico sono influenzate da:

- produzione fotochimica (dipendente da disponibilità di precursori e luce solare)
- distruzione chimica (per reazione con NO)
- trasporto atmosferico
- deposizione secca
- diffusione dalla stratosfera



Ozono (O_3)

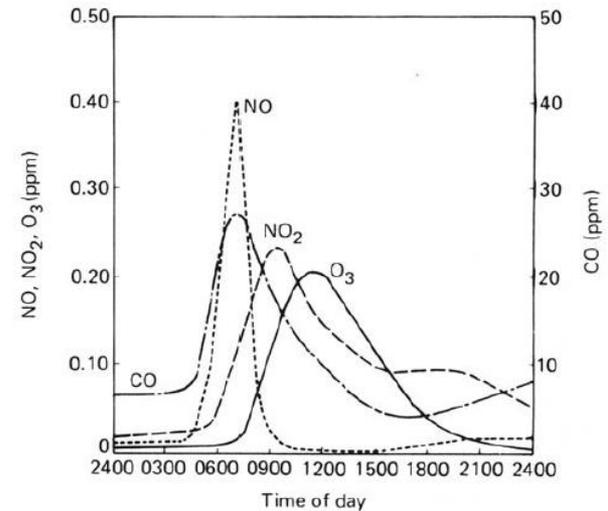
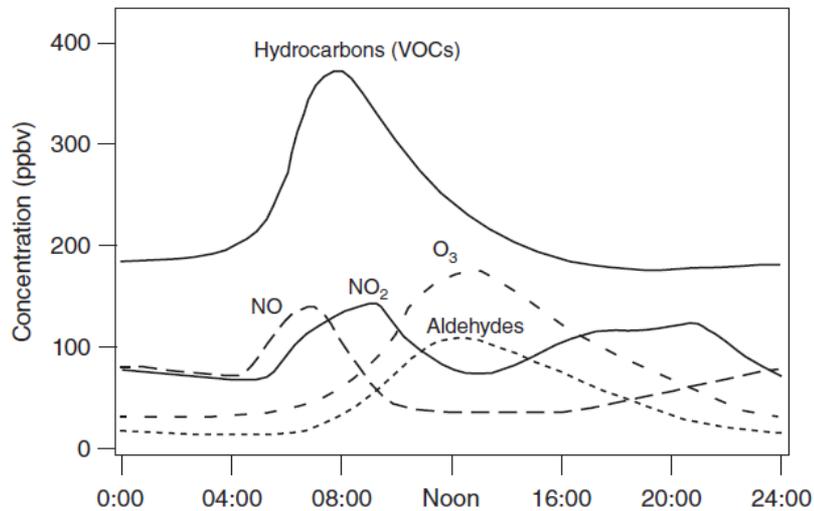
Le concentrazioni di O_3 troposferico sono interessate da significative variazioni diurne.



Diurnal ozone profiles from different sites in Europe. BE = Belgium, CHZ = Switzerland, DEB = Germany, DK = Denmark, FR = France, GBI = London, GBN = Nottingham, IE = Ireland, SE = Sweden.

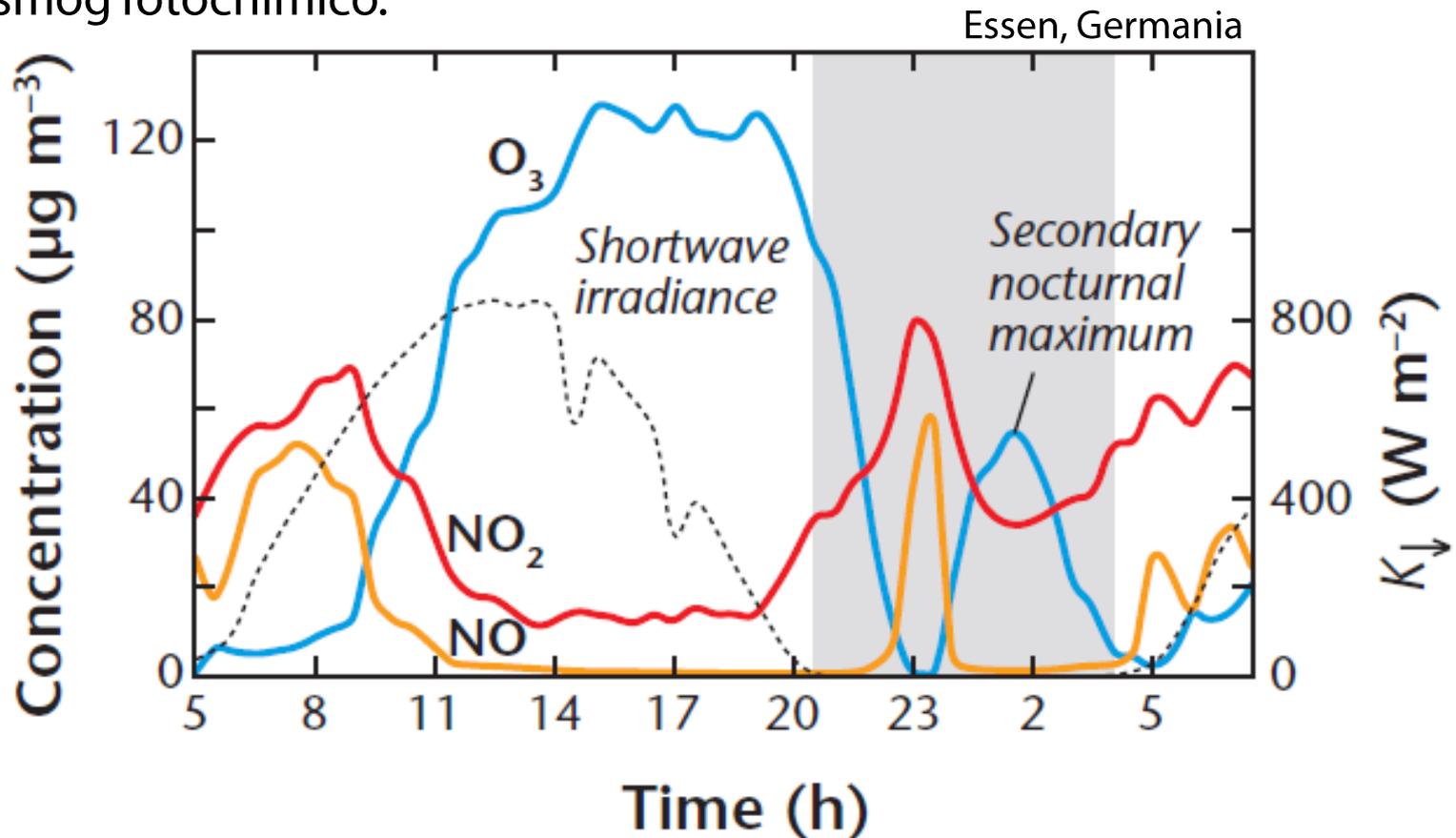
Ozono (O_3)

Le concentrazioni di O_3 troposferico sono interessate da significative variazioni diurne.

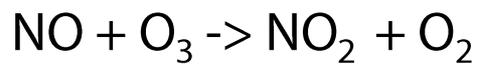
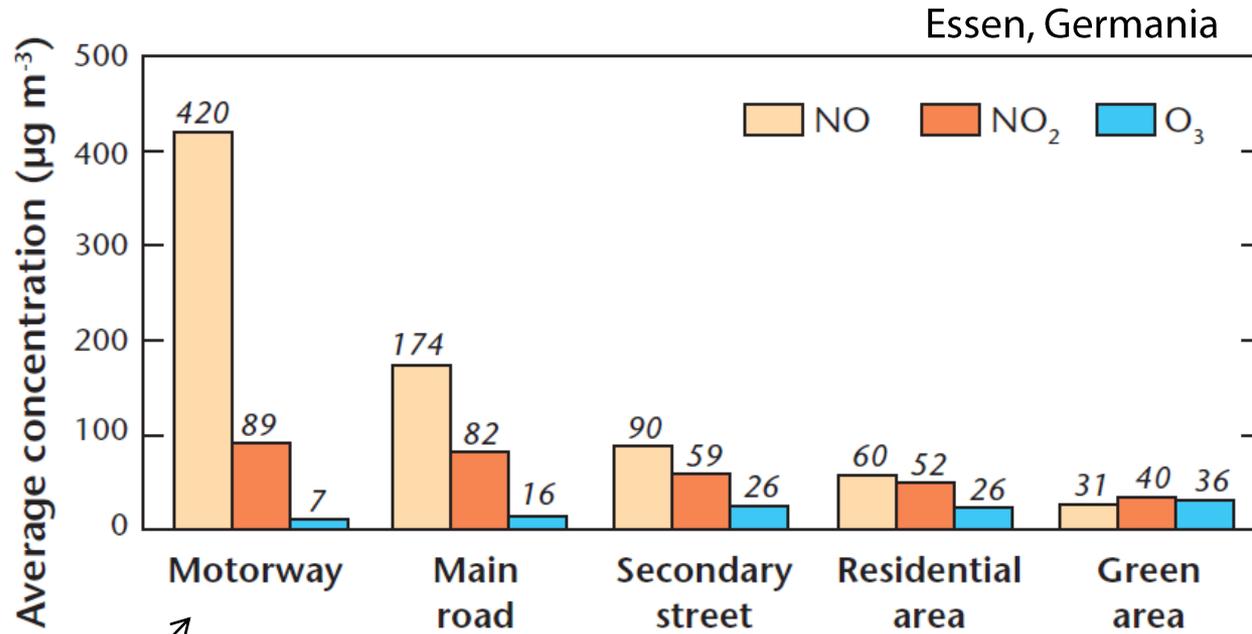


Ozono (O_3)

La variazione diurna sia delle emissioni dovute alle attività antropiche che della radiazione UV crea andamenti caratteristici nelle concentrazioni di inquinanti primari e secondari coinvolti nello smog fotochimico.

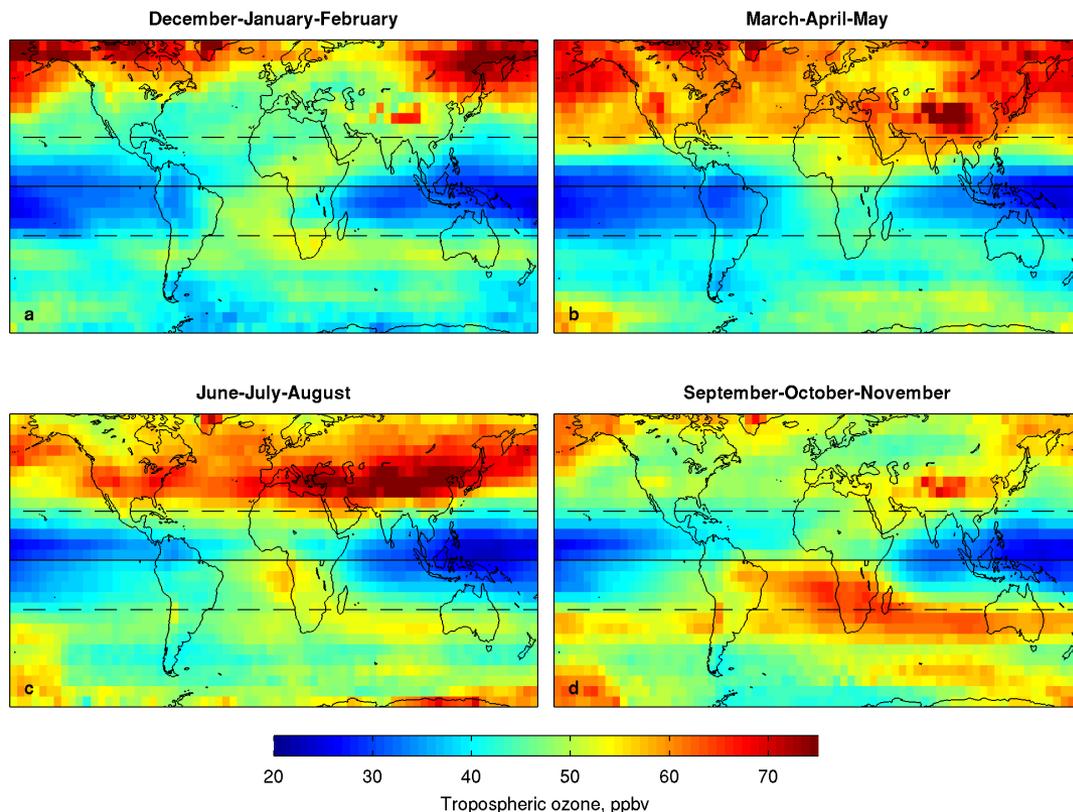


Ozono (O₃)



Ozono (O_3)

Le concentrazioni di O_3 troposferico sono interessate da significative variazioni stagionali.



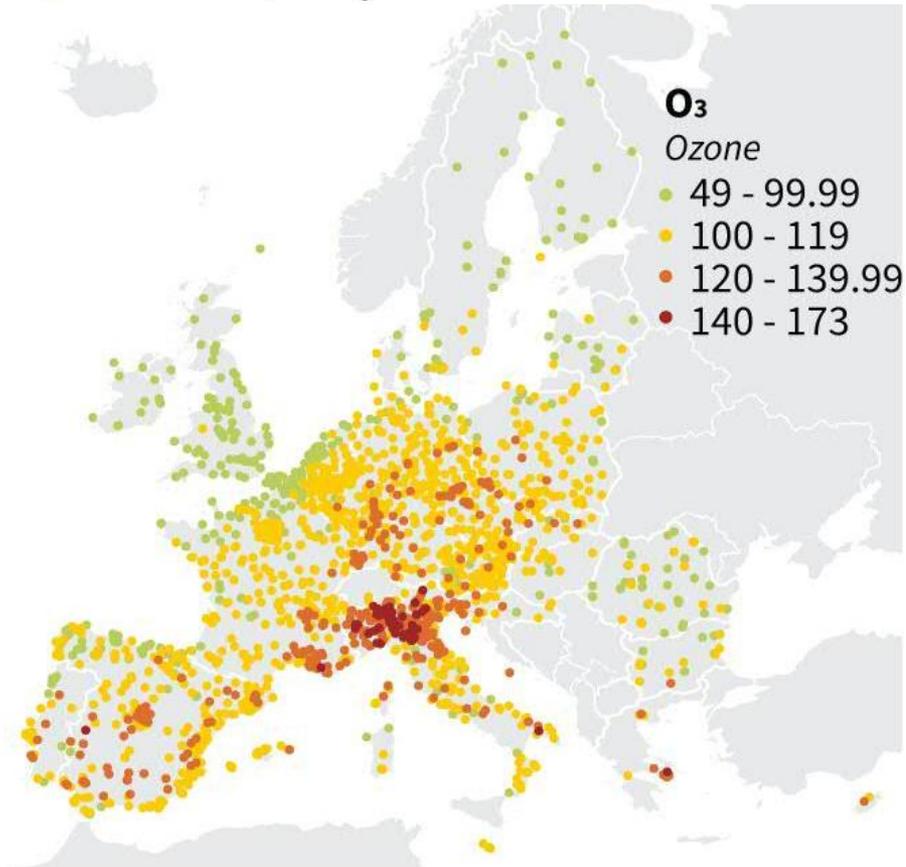
- forza delle sorgenti di precursori
- condizioni di mescolamento atmosferico
- disponibilità di composti reattivi
- tempi di residenza e condizioni meteo

Ozono (O₃)

Air pollution in EU

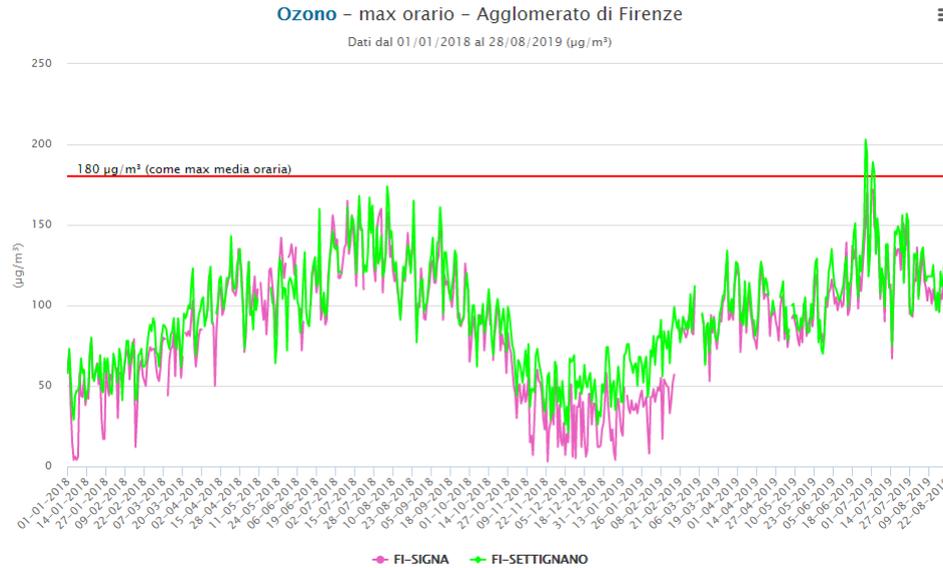
Annual average, 2016, in micrograms per m³

● Under the European legal limit ● Above the limit



Source: European Environment Agency

Ozono (O₃)



Stazione FI-SIGNA
Fondo urbano



Stazione FI-SETTIGNANO
Fondo suburbano



Piombo (Pb)



Piombo (Pb)

Il miglioramento nella qualità dell'aria urbana rispetto al Pb osservato fin dagli anni 70 rappresenta uno dei più grandi successi delle politiche ambientali.

Il Pb è un metallo tossico che attacca il sistema nervoso centrale e i sistemi cardiovascolare, riproduttivo e immunitario. Determina anche disfunzioni renali e diminuisce la capacità di trasporto di ossigeno del sangue. Tende ad accumularsi nelle ossa sostituendosi al calcio.

Prima delle restrizioni imposte dalle politiche ambientali, la principale sorgente di emissione di Pb in atmosfera era rappresentata dal traffico veicolare.

A Thomas Midgley Junior, ingegnere statunitense, si deve la scoperta delle proprietà antidetonanti del piombo tetraetile addizionato alle benzine.



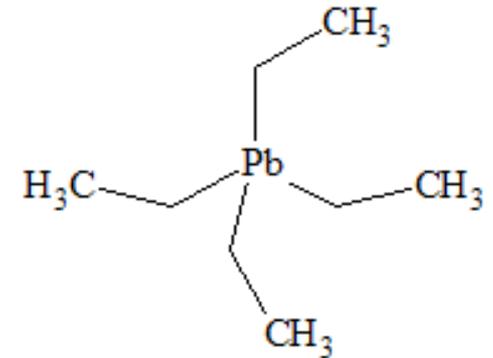
Piombo (Pb)

Il piombo tetraetile (TEL) è un composto metallorganico formato da un atomo di piombo centrale a cui sono legate 4 catene alchiliche di etile.

Il TEL venne prodotto in grandi quantità dagli anni 30 agli anni 80 del Novecento ed impiegato come agente antidetonante nelle benzine.

Altamente tossico, dagli anni 70 si susseguirono iniziative per bandirlo dalle benzine, fino alla definitiva eliminazione nel 1986 negli USA e nel decennio successivo in Europa.

Le emissioni sono diminuite drasticamente dagli anni 70. Oggi le principali sorgenti di Pb in atmosfera sono sorgenti puntuali come raffinerie, fonderie, inceneritori di rifiuti e industrie produttrici di batterie al Pb.



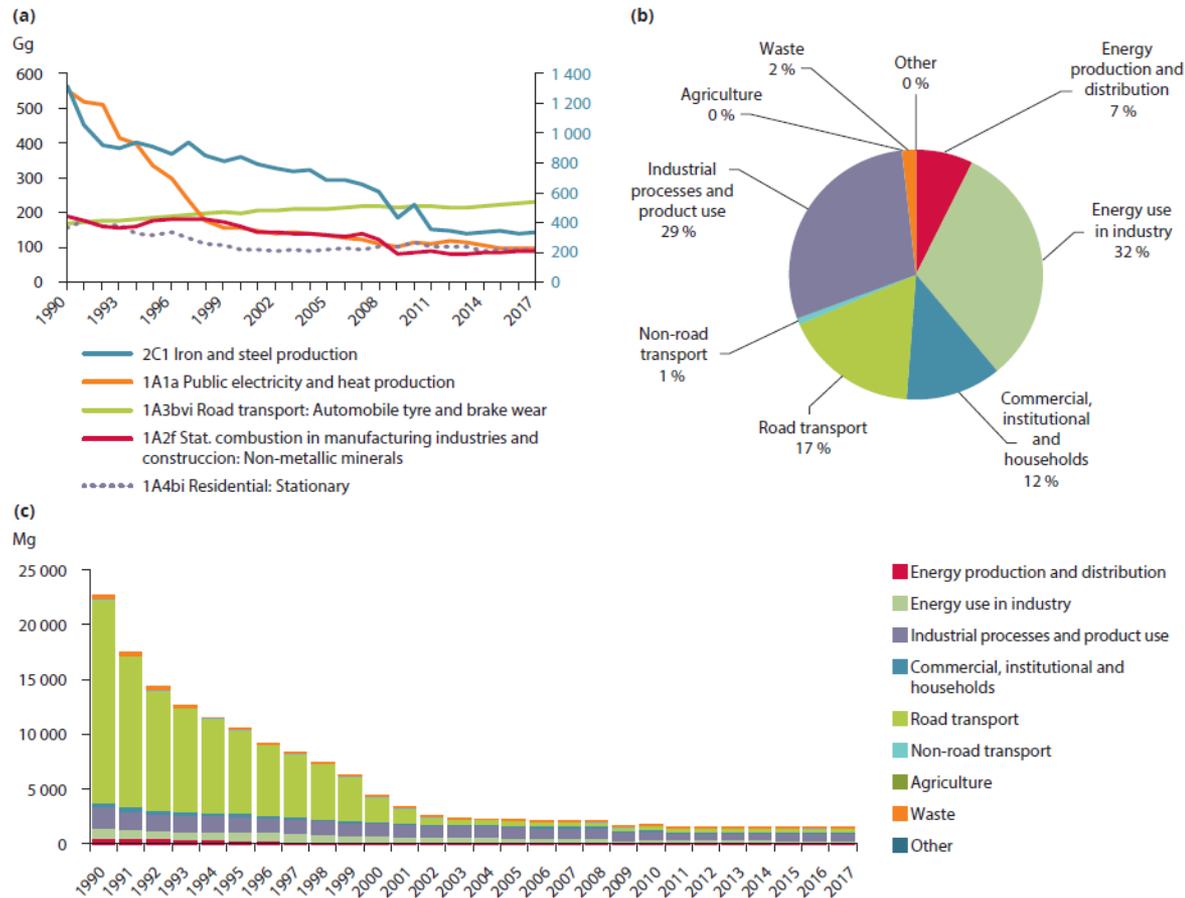
Piombo (Pb)

Valori guida e normativa:

Europa: 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ annual mean

Italia: 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media annua

Figure 3.12 Pb emissions in the EU: (a) trend in emissions from the five most important key categories, 1990-2017; (b) share by sector group, 2017; (c) sectoral trends in emissions



Benzene (C₆H₆)



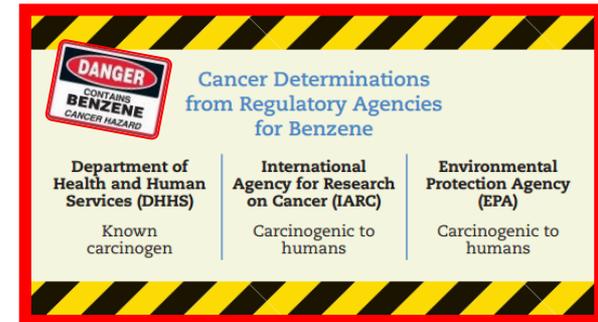
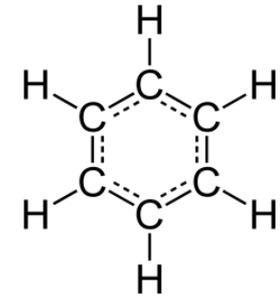
Benzene (C₆H₆)

Nelle benzine, il TEL venne sostituito dall'uso delle marmitte catalitiche e da altri additivi, tra cui il benzene.

Il benzene è il più semplice degli idrocarburi aromatici, cancerogeno, provoca leucemie e danni gravissimi ai tessuti interni.

La concentrazione di idrocarburi aromatici nell'atmosfera è aumentata di pari passo con la diffusione delle vetture catalizzate.

Il traffico veicolare rappresenta la principale sorgente di benzene in ambiente urbano.



World Health Organization (WHO)

"No specific guideline value has been developed for air. Benzene is carcinogenic to humans, and no safe level of exposure can be recommended."

Benzene (C₆H₆)

Valori guida e normativa:

Europa: 5 µg/m³ annual mean

Italia: 5 µg/m³ media annua

I VOC vengono determinati raccogliendo il campione di aria su appositi materiali adsorbenti specifiche per il composto in esame e contenuti in fiale.

Per il benzene si usano Carbone, Carbotrap (carbone grafitizzato), o Tenax con prelievi non superiori ai 10 litri di aria. La separazione dall'adsorbente viene effettuata mediante un solvente specifico mentre l'analisi viene eseguita per via gascromatografica generalmente accoppiata a spettrometria di massa .

Attualmente sono presenti in commercio analizzatori integrati capaci di determinazioni in continuo dei BTX, Benzene, Toluene e Xileni.

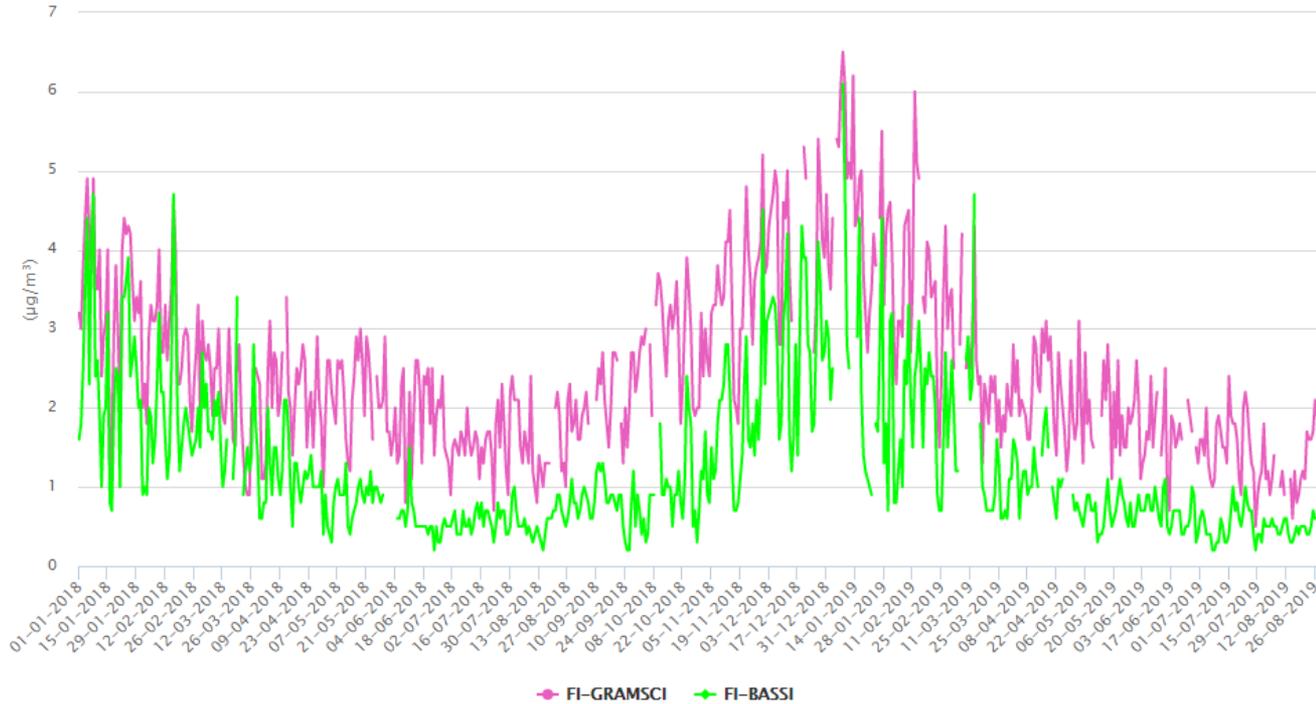
.

Benzene (C₆H₆)

Benzene – media giornaliera – Agglomerato di Firenze



Dati dal 01/01/2018 al 29/08/2019 (µg/m³)



Stazione FI-GRAMSCI
Traffico urbano

Stazione FI-BASSI
Fondo urbano



Cluorofluorocarburi (CFC)



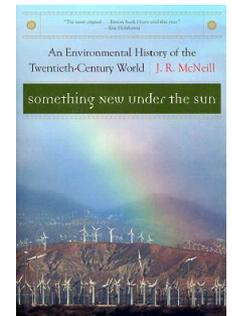
Clorofluorocarburi (CFC)



Thomas Midgley Junior , oltre a scoprire le proprietà antidetonanti del TEL favorendone l'applicazione alle benzine, inventò il **freon** (utilizzato come gas refrigerante), passando meritatamente alla storia come il peggior inventore del mondo.

“ha avuto sull’atmosfera un impatto superiore a quello di qualsiasi altro singolo essere vivente nella storia della Terra.”

- John Robert McNeill

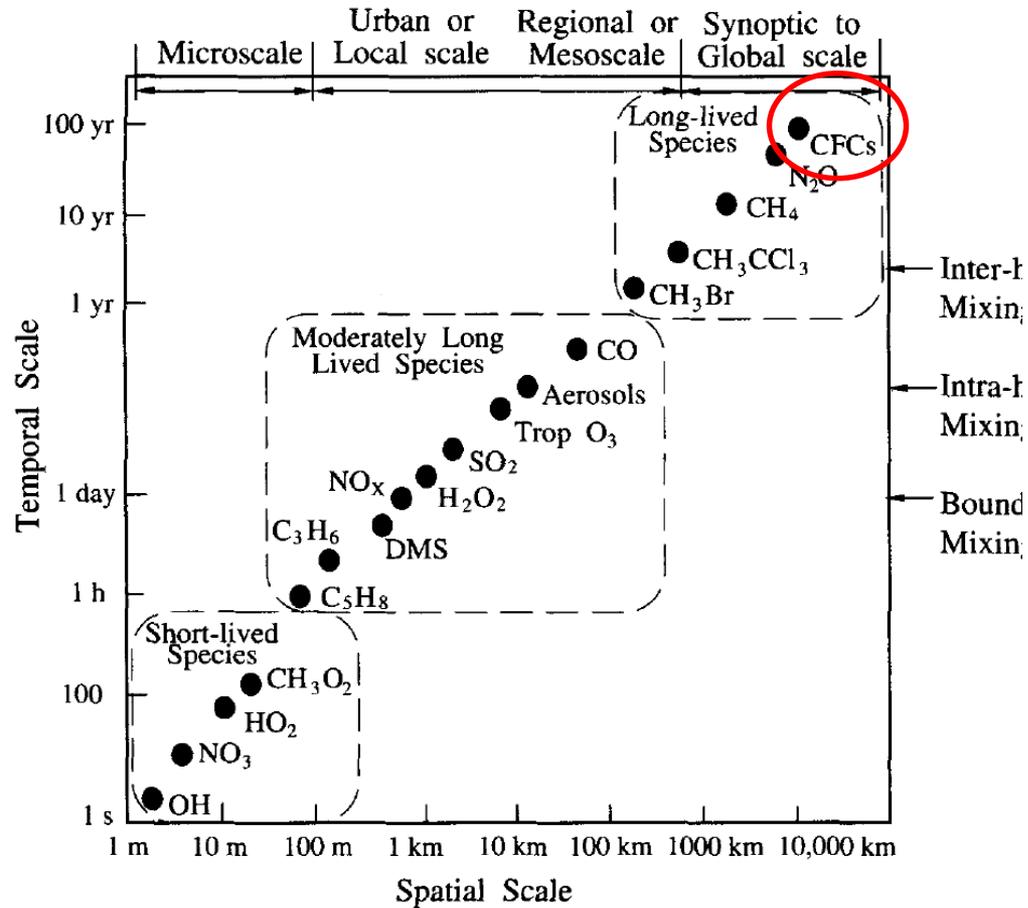


Clorofluorocarburi (CFC)

- Freon è un nome commerciale che indica una famiglia di composti organici chiamati clorofluorocarburi, alcani alogenati in cui tutti gli atomi di idrogeno sono sostituiti con atomi di fluoro e cloro.
- Gas stabili, non infiammabili, non corrosivi e sicuri da inalare.
- Usati dagli anni 30 per numerosissime applicazioni, come gas refrigeranti in frigoriferi e congelatori, additivi nelle schiume degli estintori, nei condizionatori delle auto, nei propellenti per gli spray.



Cluorofluorocarburi (CFC)



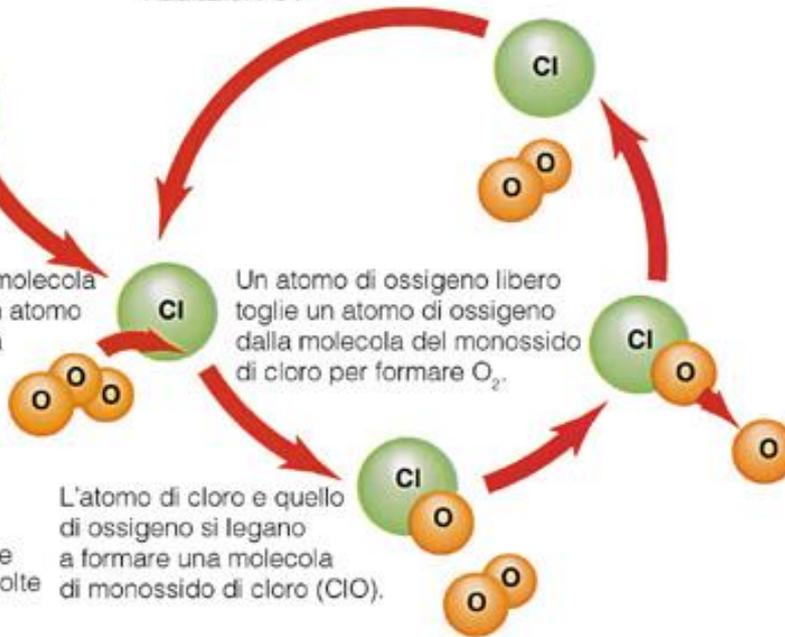
Clorofluorocarburi (CFC)

La luce ultravioletta colpisce una molecola di clorofluorocarburo (CFC), come il CFCl_3 , togliendo un atomo di cloro e lasciando il CFCl_2 .



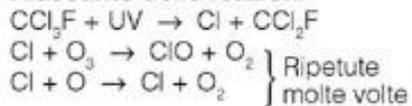
Una volta libero, l'atomo di cloro può attaccare un'altra molecola di ozono e incominciare di nuovo il ciclo.

L'atomo di cloro attacca la molecola di ozono (O_3), staccando un atomo di ossigeno e lasciando una molecola di ossigeno (O_2)



Un atomo di ossigeno libero toglie un atomo di ossigeno dalla molecola del monossido di cloro per formare O_2 .

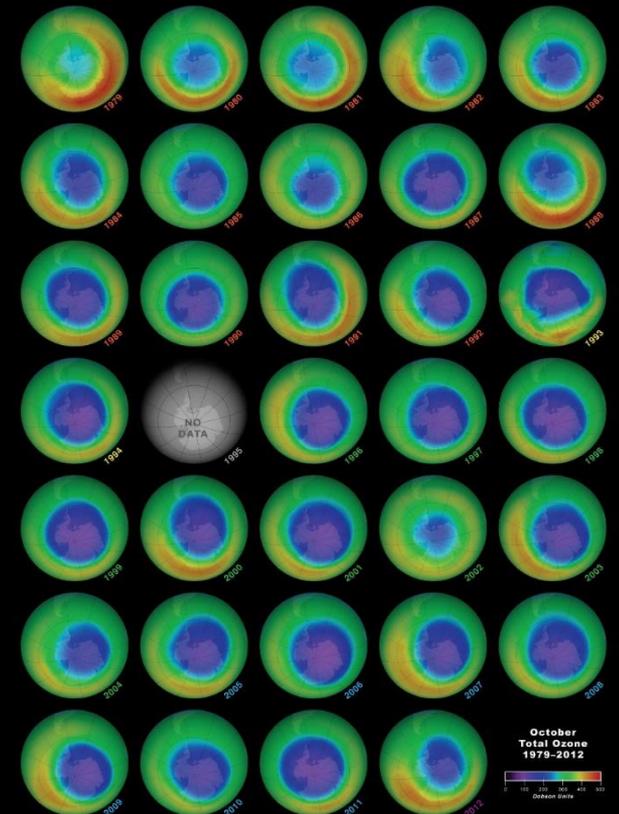
Riassunto delle reazioni



L'atomo di cloro e quello di ossigeno si legano a formare una molecola di monossido di cloro (ClO).

The Ozone Hole

Over 30 Years of Satellite Observations



Cluorofluorocarburi (CFC)

Alla luce degli effetti dei clorofluorocarburi sull'ozonosfera e, conseguentemente, sul clima e la salute umana, nel 1987 è stato stipulato il **protocollo di Montreal**, un trattato internazionale, attualmente ratificato da 191 nazioni, che prevede l'eliminazione graduale dei CFC, fino alla messa al bando per il 2030. L'Unione Europea ha reso operativo il protocollo di Montreal nel 1994, con il regolamento CE 3093/94, successivamente abrogato dal CE 2037/00. Tale regolamento anticipa al 2015 il divieto di produzione ed uso di CFC.

Idrocluorofluorocarburi (HCFC) e idrofluorocarburi (HFC)

Composti organici alogenati utilizzati come sostituenti dei CFC.

- reagiscono con OH*: tempi di residenza inferiori
- non distruggono l'ozono stratosferico
 - potenti gas serra

Il regolamento Europeo 517/2014 (noto come "F-GAS"), entrato in vigore il 9 giugno 2014 con applicazione dal 1° Gennaio 2015, ha disposto la progressiva riduzione dell'utilizzo di gas refrigeranti fluorurati ad effetto serra, ossia quei gas ad elevato potenziale di riscaldamento globale (GWP), in favore di gas più sostenibili.

- riduzione del 70% dell'uso dei gas refrigeranti entro il 2030
- divieto di utilizzo dei gas fluorurati nei nuovi sistemi di refrigerazione commerciale a partire dal 2022