



**Universidade de São Paulo**  
**Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas**  
**Departamento de Ciências Atmosféricas**  
**DCA/IAG/USP**

AGM5823 – Tópicos em química atmosférica

# **Poluição do ar**

# **Aspectos gerais**

Adalgiza Fornaro, IAG-USP

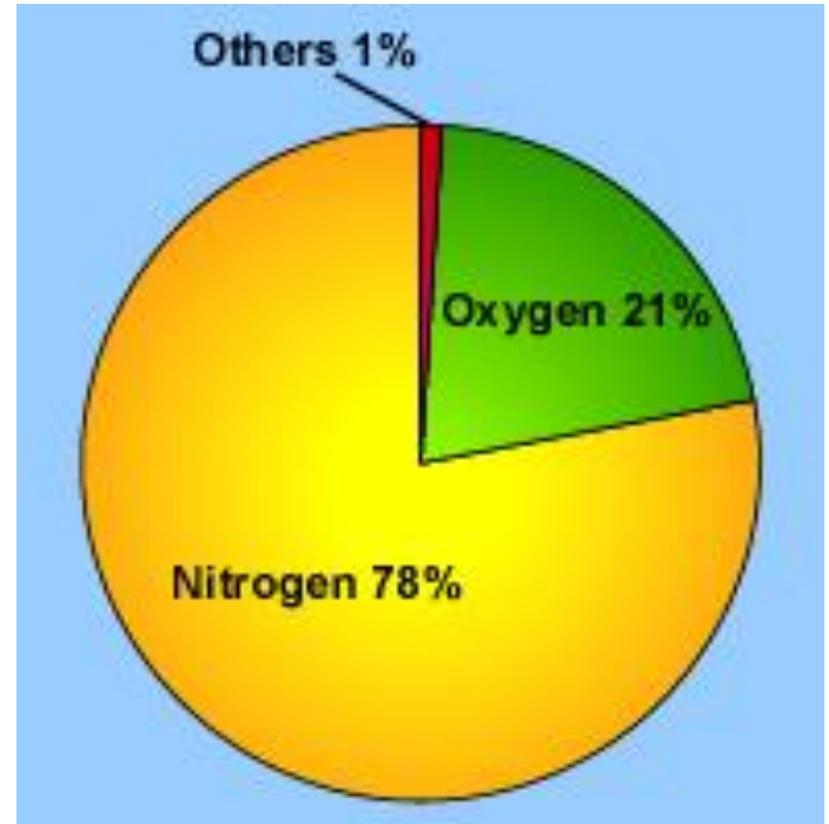
São Paulo, outubro de 2022

# Poluição do ar

- Conceitos e definições
- Principais poluentes
- Efeitos da poluição do ar
- Aspectos históricos
- Legislação
- Controle da poluição do ar

# Composição Atmosférica

Os principais componentes do ar são nitrogênio ( $N_2$ ), oxigênio ( $O_2$ ) e vapor d'água ( $H_2O$ ). Cerca de 99% do ar seco é nitrogênio (78%) e oxigênio (21%). O percentual restante inclui traços de substâncias como dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), hidrogênio ( $H_2$ ), argônio (Ar) e hélio (He).



# O que é um poluente do ar?

Uma substância que:

- não é encontrada naturalmente no ar ou
- mal localizada ou
- em concentrações altas o suficiente de modo que produza um efeito ambiental prejudicial.

As duas formas físicas básicas de poluição do ar :

- ❖ Gases
- ❖ Material particulado, MP (aerossol atmosférico, poeira)

Isso pode afetar:

- a saúde humana (principalmente via sistema respiratório)
- a saúde das plantas e animais
- materiais em geral

Omowumi Alabi, Department of Geosciences  
University of Missouri-Kansas City, Kansas City, MO

Definição (CONAMA, RESOLUÇÃO N. 491, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2018 )

**poluente atmosférico:** qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade.

# Tipos de Poluentes

Os poluentes também podem ser classificados como poluentes primários ou poluentes secundários.

**Poluente primário** é aquele que é emitido para a atmosfera diretamente da fonte do poluente e retém a mesma forma química.

O efeito dos poluentes primários é mais pronunciado nas imediações da fonte.

**Poluente secundário** é aquele que é formado por reações atmosféricas de precursores ou emissões primárias. Poluentes secundários não são emitidos. Em vez disso, eles se formam no ar quando os poluentes primários reagem ou interagem. Um exemplo importante de poluente secundário é o ozônio troposférico.

Os poluentes secundários “demoram” a se formar e podem não afetar a vizinhança imediata da fonte poluente.

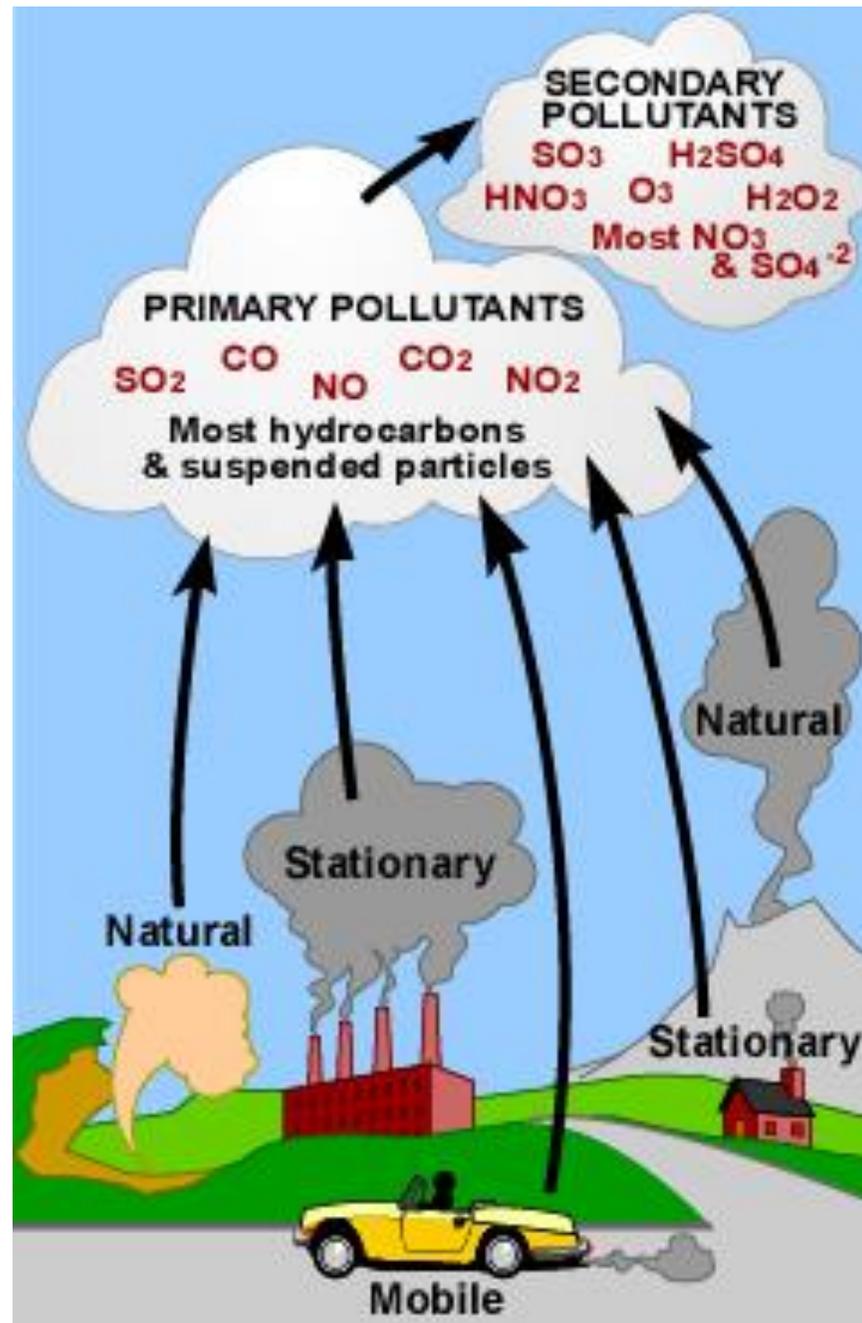
# Fontes de poluentes do ar

Uma fonte de poluição do ar é qualquer atividade que causa a emissão de poluentes para o ar.

As fontes de poluição do ar geradas pelo homem são categorizadas de duas maneiras: fontes móveis e estacionárias.

As **fontes móveis** de poluição do ar incluem a maioria dos meios de transporte, como automóveis, caminhões e aviões.

**Fontes estacionárias** de poluição do ar consistem em fontes imóveis, como usinas de energia e instalações industriais.



# Poluentes atmosféricos - classificação:

## Poluentes primários

- emitidos diretamente pelas fontes de emissão (escapamento, chaminé, etc).

Exemplo:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ),  $\text{NH}_3$ , NMHC (hidrocarbonetos menos o metano), NMCOV (compostos orgânicos voláteis menos o metano), material particulado (PTS,  $\text{MP}_{10}$ ,  $\text{MP}_{2,5}$ ), aldeídos, etc.

## Poluentes secundários

- produzidos na atmosfera através da reação química entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera.

Exemplo: ozônio, SOA (secondary organic aerosol), SAI (secondary inorganic aerosol), aldeídos, ácidos carboxílicos, PAN (peroxi acil nitrato),  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ , etc.

# Transporte e dispersão de poluentes do ar

Em nível local, os principais fatores que afetam o **transporte e a dispersão** de poluentes são a **estabilidade atmosférica e vento.**

## **Vento**

o movimento horizontal natural da atmosfera causado por

- diferenças de pressão na atmosfera.
- o ar se move de áreas de alta pressão para áreas de baixa pressão

# Efeito do vento na dispersão de poluentes

- ✓ A velocidade do vento pode afetar significativamente a concentração de poluentes em uma área local.
- ✓ Quanto maior a velocidade do vento, menor a concentração de poluentes.
- ✓ O vento dilui os poluentes e os dispersa rapidamente por toda a área imediata.

# Estabilidade atmosférica

Refere-se ao movimento vertical da atmosfera.

Condições atmosféricas instáveis resultam em uma mistura vertical, promovendo assim a dispersão do ar poluído

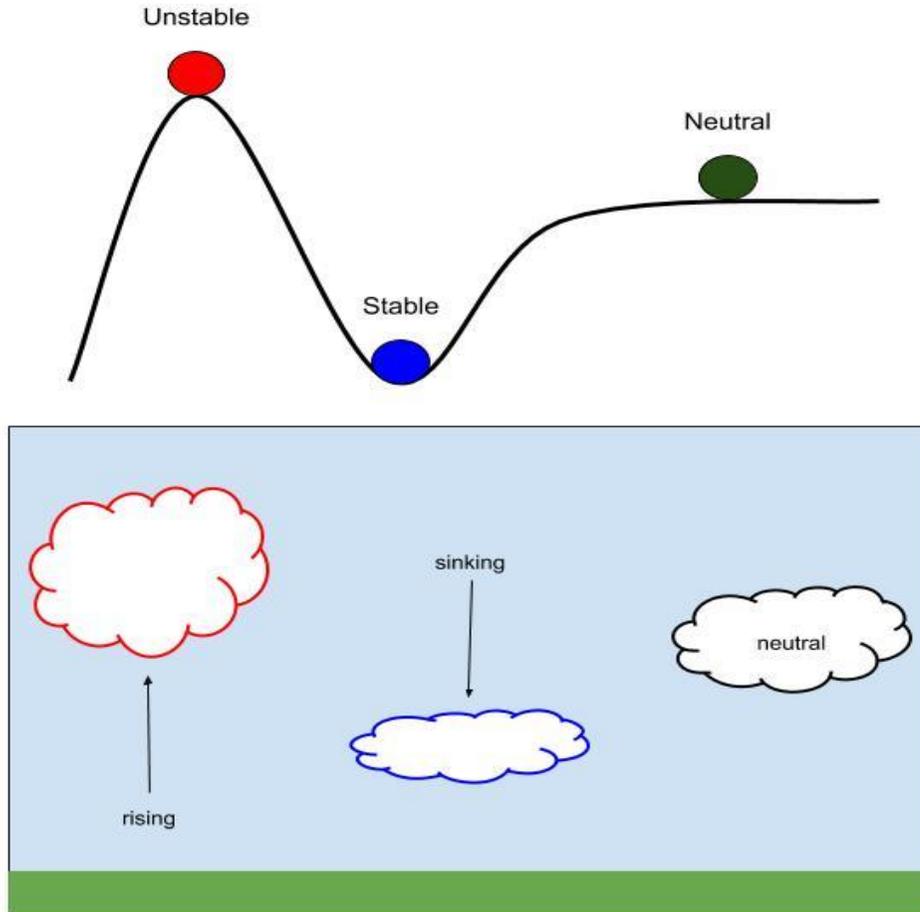
## **Atmosfera instável**

- A temperatura diminui com a altura
- O movimento vertical do ar ocorre
- O movimento horizontal do ar é promovido
- Promove a dispersão

## **Atmosfera estável**

- A temperatura aumenta com a altura
- O movimento vertical do ar é restrito
- O movimento horizontal do ar é restrito
- Impede a dispersão

# Estabilidade atmosférica



**Instável**

$$T_{\text{parcela}} > T_{\text{ar}}$$

A parcela é mais quente do que seus arredores, então ela sobe e se expande

**Estável**

$$T_{\text{ar}} < T_{\text{parcela}}$$

A parcela é mais fria do que seus arredores, então ela desce e se comprime

**Neutra**

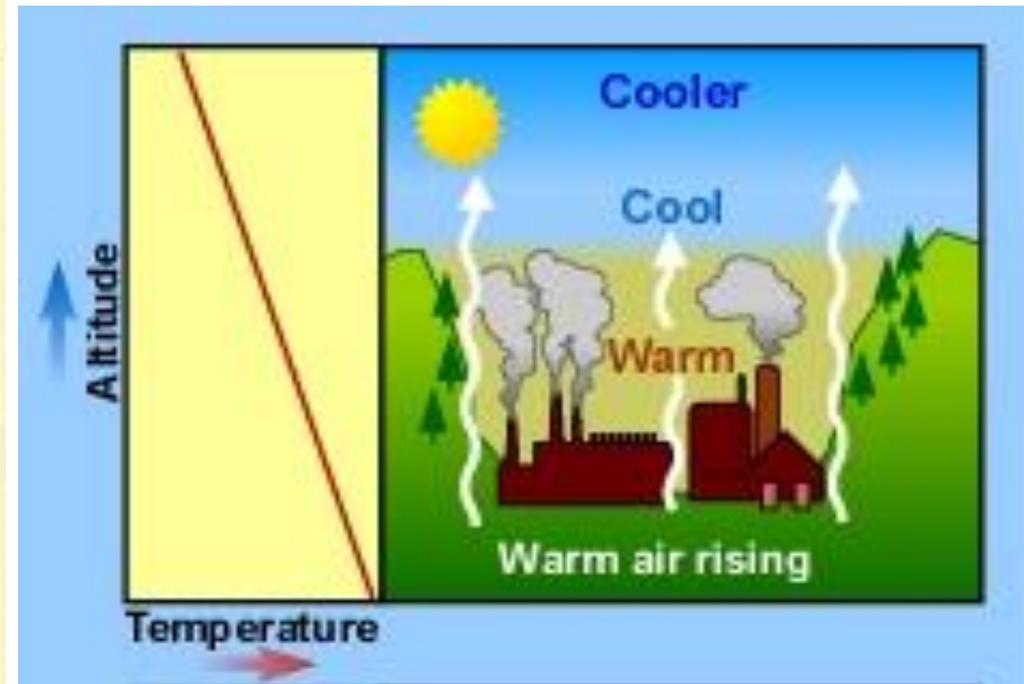
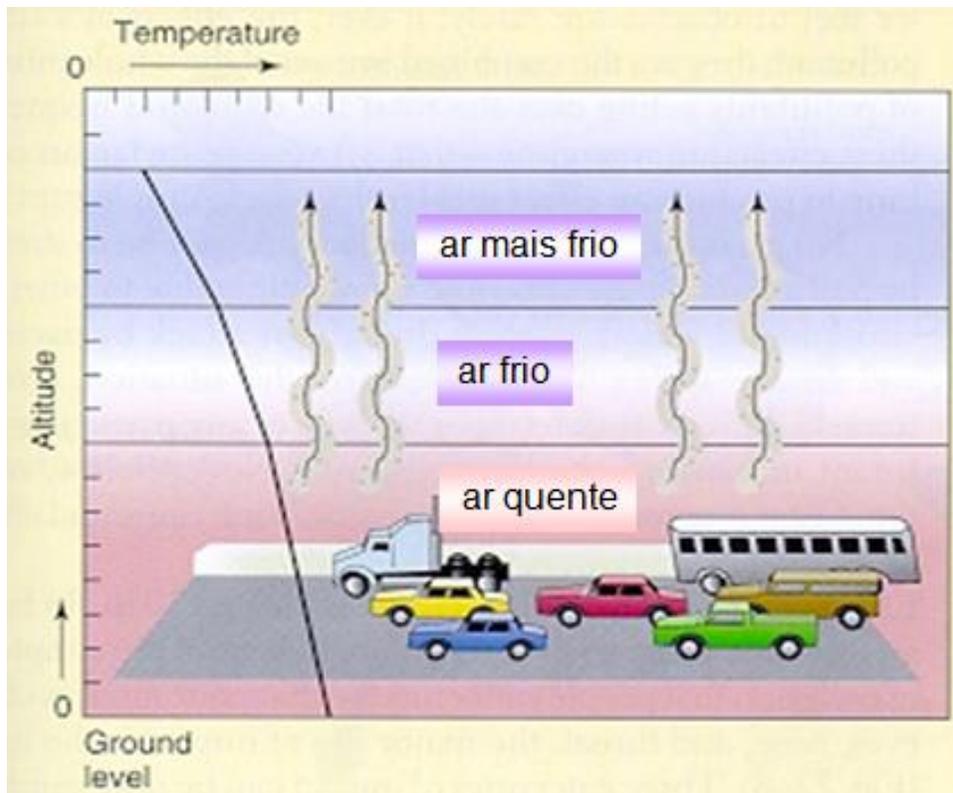
$$T_{\text{parcela}} = T_{\text{ar}}$$

A parcela tem a mesma temperatura de seus arredores, sem alteração

Exemplos de estabilidade e instabilidade em relação às temperaturas do ar e das parcelas (criado por Britt Seifert).

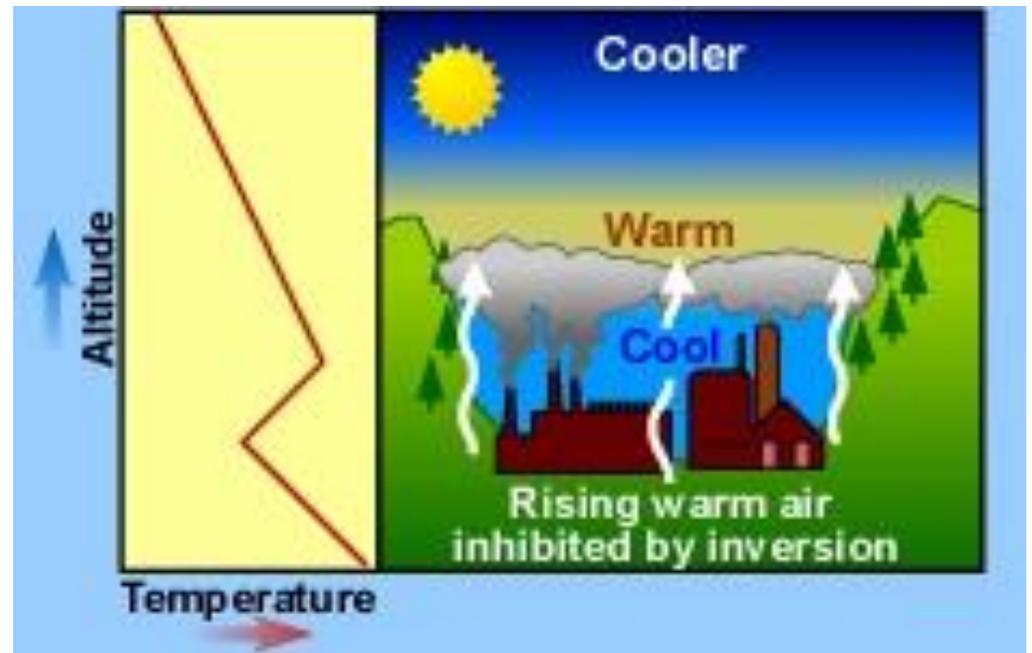
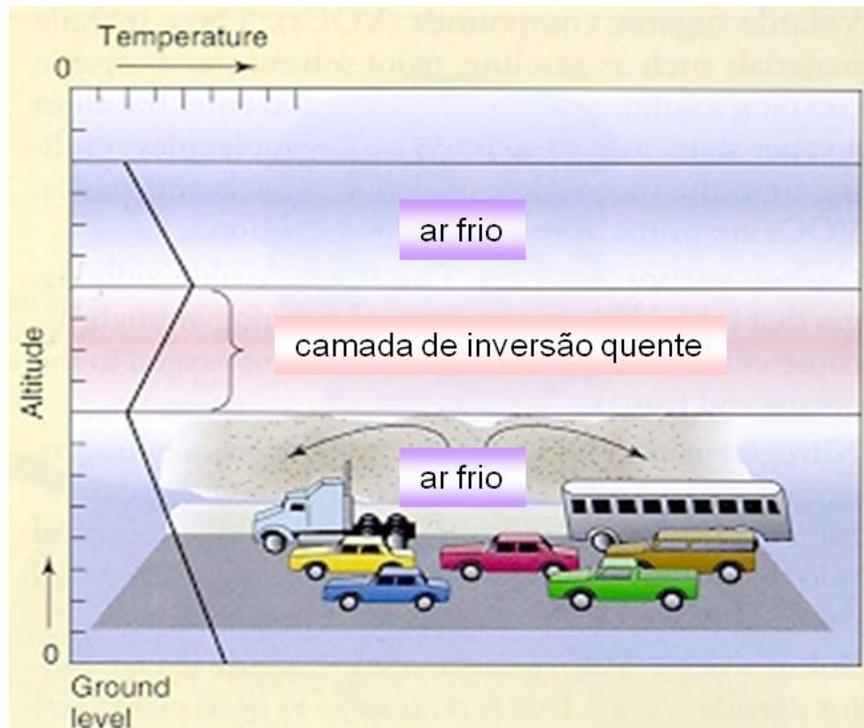
# A atmosfera instável promove a dispersão do ar poluído

Normalmente, o ar próximo à superfície da Terra é mais quente durante o dia devido à absorção da energia do sol. O ar mais quente e mais leve da superfície sobe e se mistura com o ar mais frio e mais pesado da atmosfera superior, causando condições instáveis na atmosfera. Esta turbulência constante também resulta na dispersão do ar poluído.



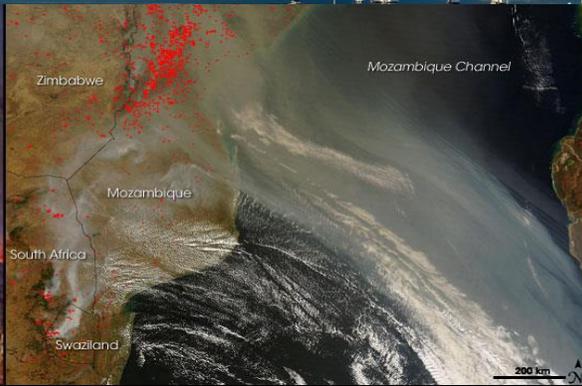
# Condição atmosférica estável evita a dispersão do ar poluído

Condições atmosféricas estáveis geralmente ocorrem quando o ar quente está acima do ar frio e a profundidade da camada de mistura é significativamente restrita. Essa condição é chamada **de inversão de temperatura (ou térmica)**. Uma inversão pode impedir a ascensão e dispersão de poluentes das camadas inferiores da atmosfera e causar problemas de poluição do ar.



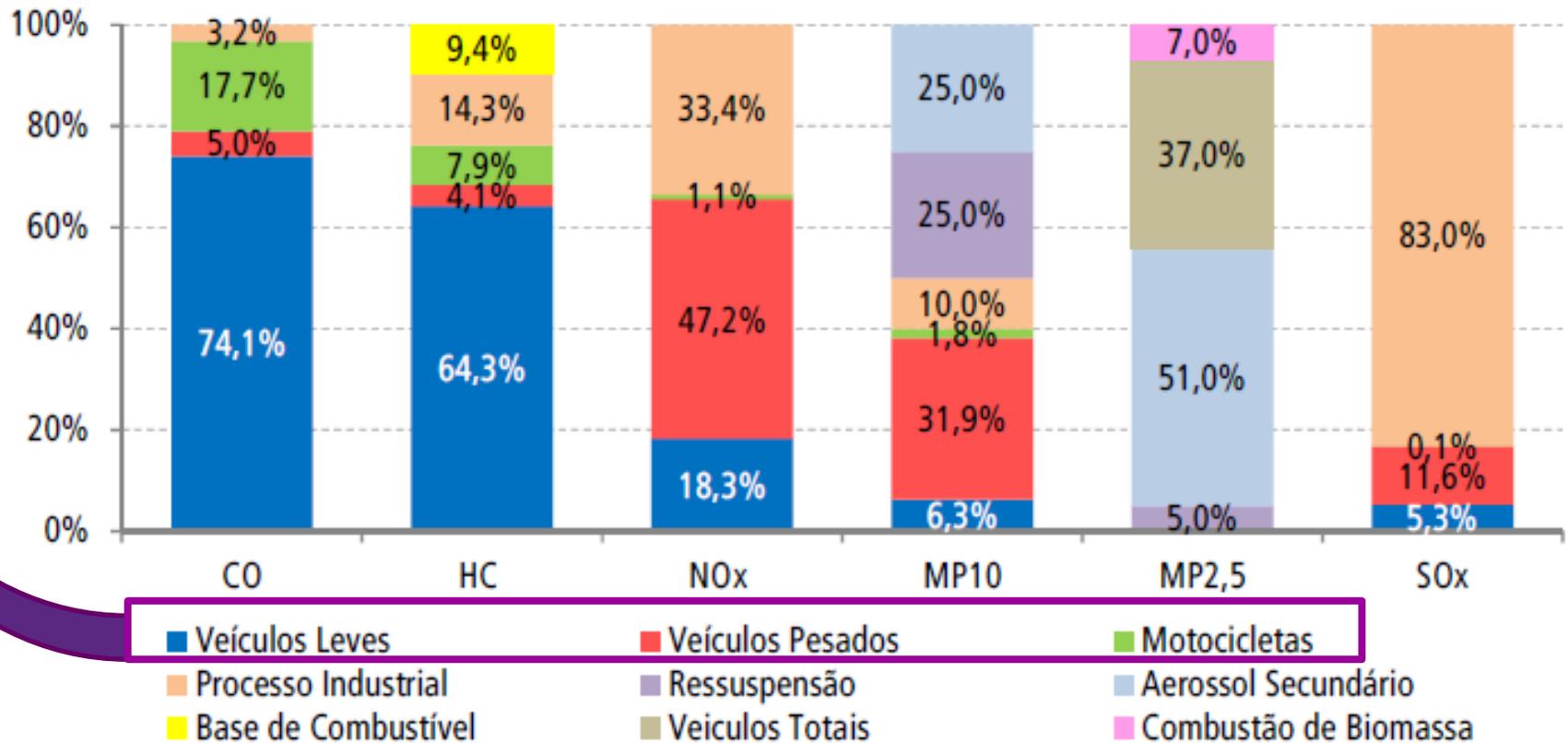
# Fatores que determinam o nível da poluição do ar:

1. quantidade de poluentes entrando na atmosfera  
(indústrias, tráfego, erupções vulcânicas, grandes queimadas)



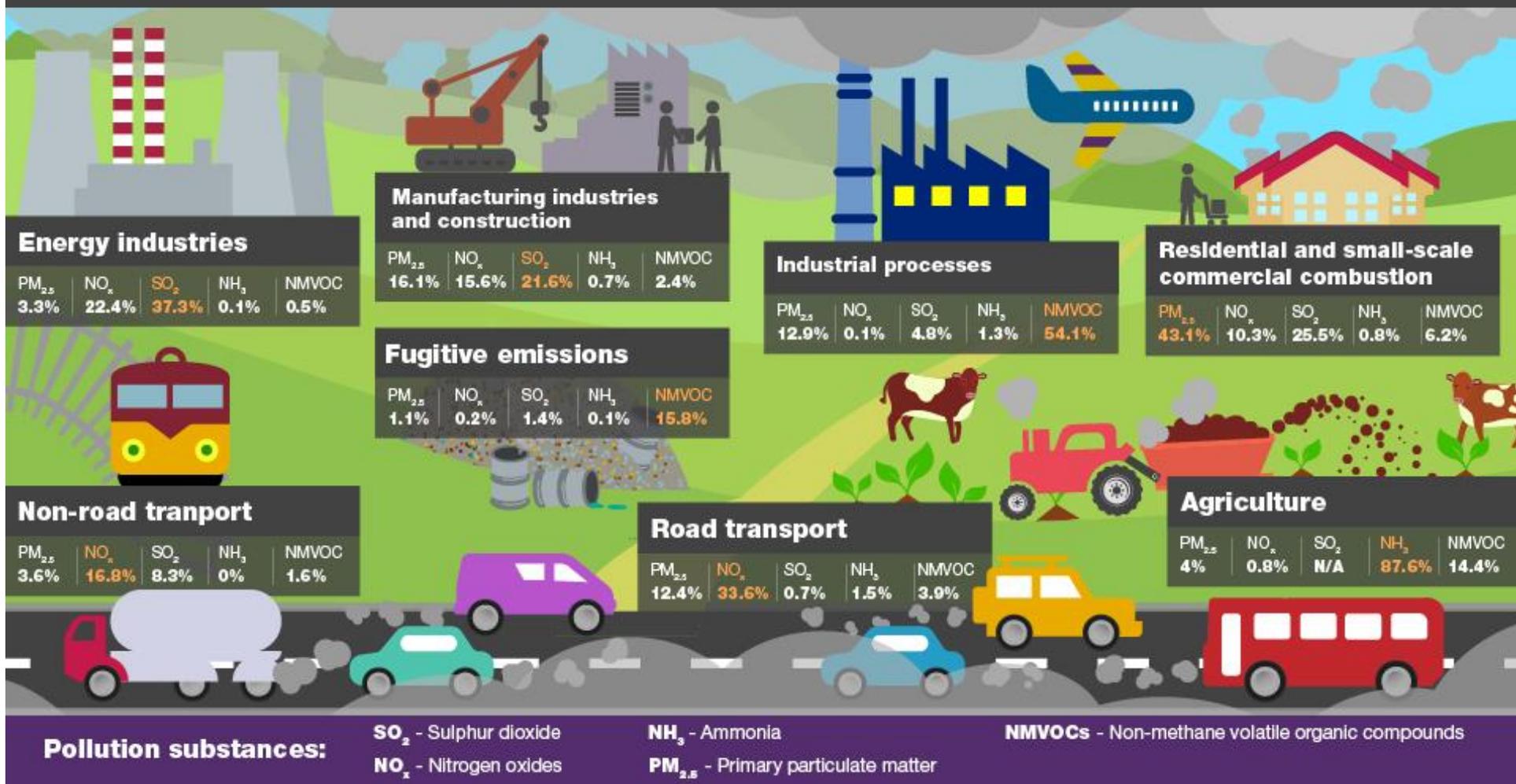
# Estimativas de contribuições relativas das emissões por tipo de fonte para importantes poluentes atmosféricos na região metropolitana de São Paulo em 2017.

Principais fontes de emissão de poluentes é a queima de combustíveis por veículos



(CETESB, 2018)

# Sources of air pollution in England



## Fatores que determinam o nível da poluição do ar:

2. tamanho do espaço (posição geográfica) em que os poluentes são dispersos (vale entre montanhas, planícies, etc)



## Fatores que determinam o nível da poluição do ar:

### 3. mecanismos que removem os poluentes da atmosfera

❖ transporte horizontal por campos de vento, que explicam transporte de longa distância para poluentes de vida longa, chuvas).

❖ Transporte vertical devido turbulência atmosférica, que é diretamente induzida por efeitos da camada limite.

❖ chuvas



Quais compostos são poluentes do ar?

Monóxido de carbono – CO

Dióxido de enxofre - SO<sub>2</sub>

Dióxido de nitrogênio – NO<sub>2</sub>

Ozônio – O<sub>3</sub>

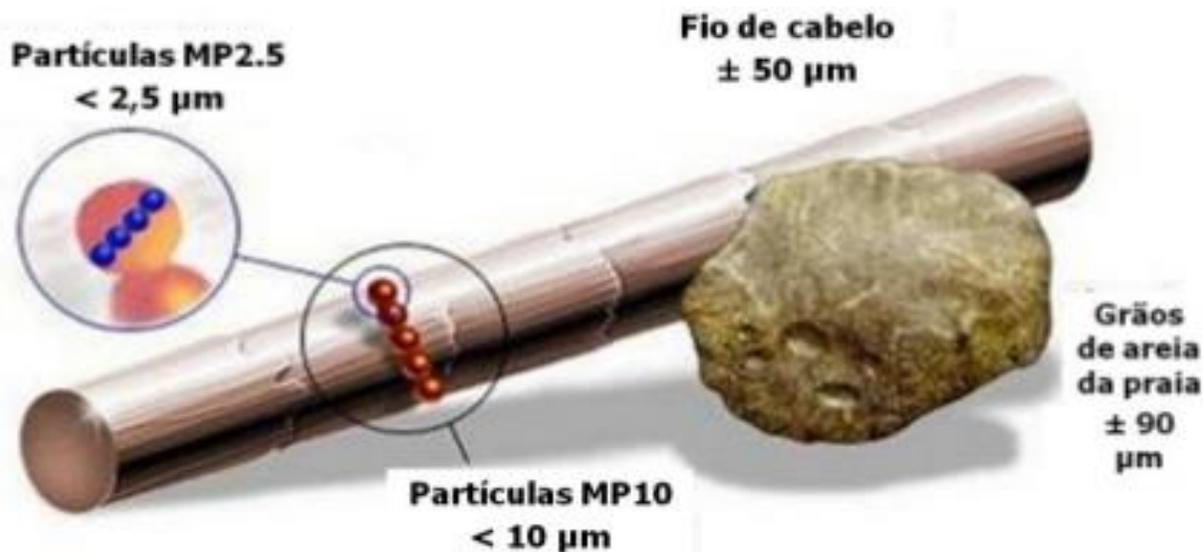
Material particulado (PTS, MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub>)

Chumbo

As **Partículas Totais em Suspensão - PTS** e o material particulado em suspensão na forma de fumaça - FMC são parâmetros auxiliares, a serem utilizados em situações específicas, a critério do órgão ambiental competente.

**Material Particulado MP<sub>10</sub>**: partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 10 micrômetros;

**Material Particulado MP<sub>2,5</sub>**: partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 2,5 micrômetros



Comparação do tamanho do material particulado atmosférico com grão de areia e fio de cabelo.

Poluentes atmosféricos e saúde?

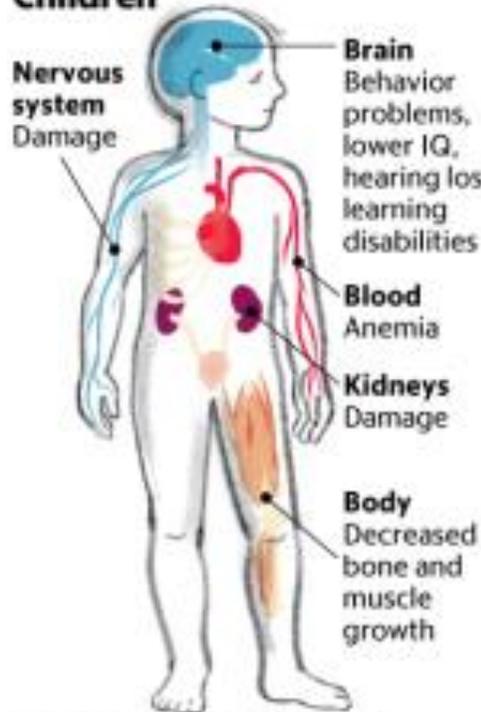
**Chumbo (Pb)** no material particulado é um parâmetro a ser monitorado em áreas específicas, em função da tipologia das fontes de emissões atmosféricas e a critério do órgão ambiental competente.

Não há evidências de um limiar abaixo do qual o chumbo não tenha efeitos adversos à saúde. Sabe-se agora que os níveis de chumbo no sangue anteriormente considerados seguros causam efeitos sutis e crônicos à saúde. Os efeitos na saúde da exposição ao chumbo incluem neurotoxicidade no desenvolvimento, disfunção reprodutiva e toxicidade para os rins, sangue e sistemas endócrinos (Sanborn et al., Identifying and managing adverse environmental health effects: 3. Lead exposure, CMAJ, 166(10): 1287–1292, 2002)

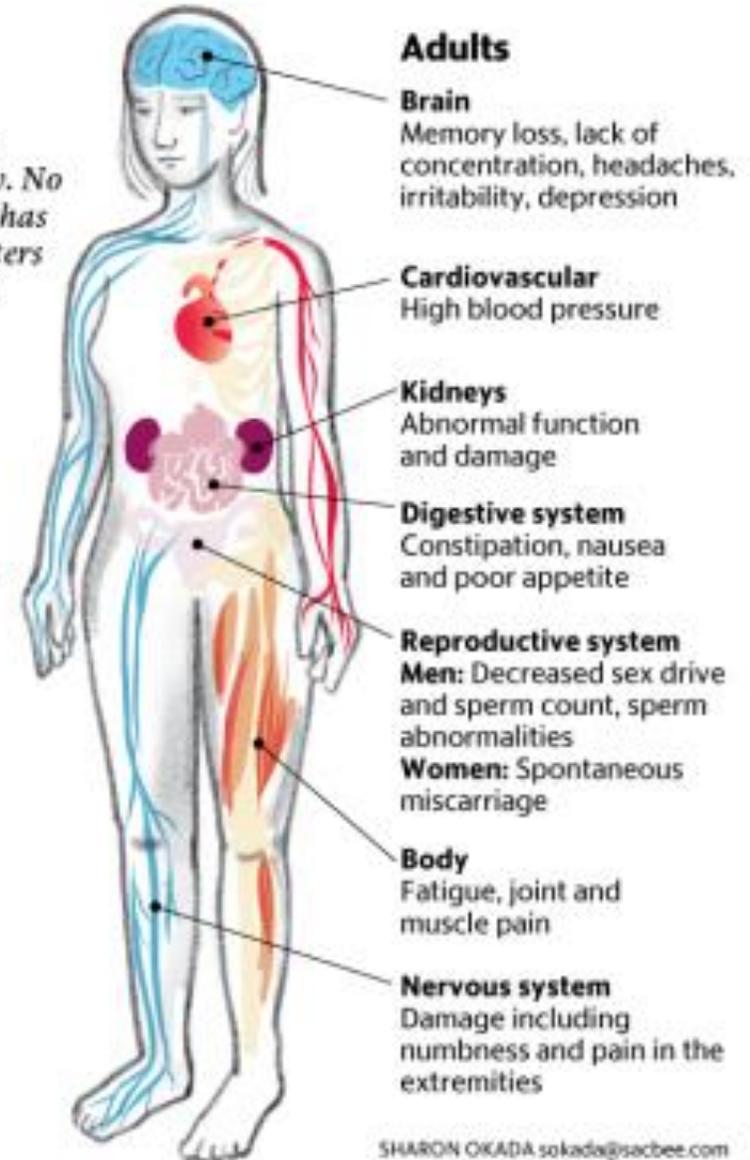
## Lead exposure

*Although often without obvious symptoms, lead exposure can affect nearly every part of the human body. No safe level of lead in the bloodstream has been determined by the federal Centers for Disease Control and Prevention.*

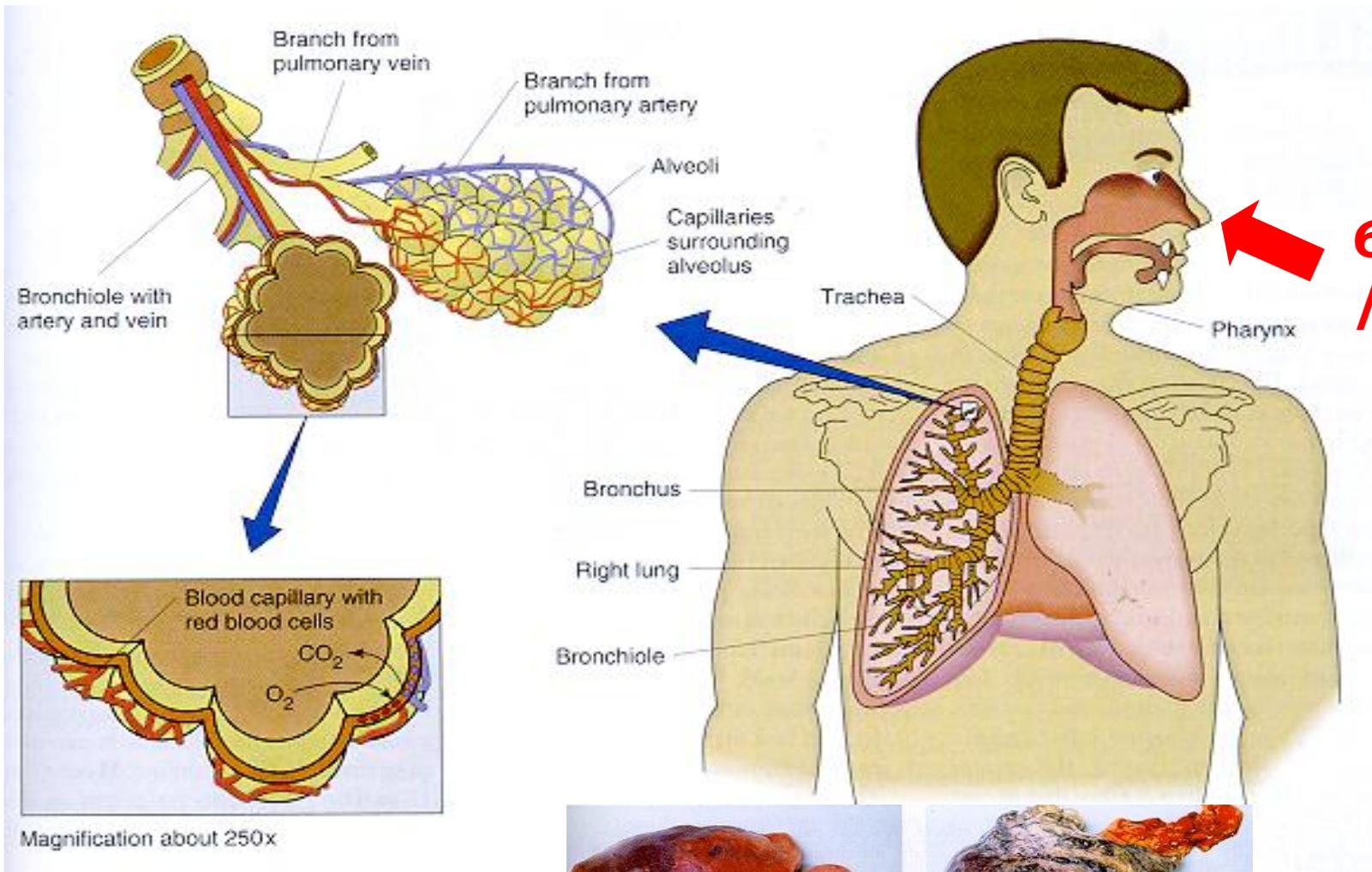
### Children



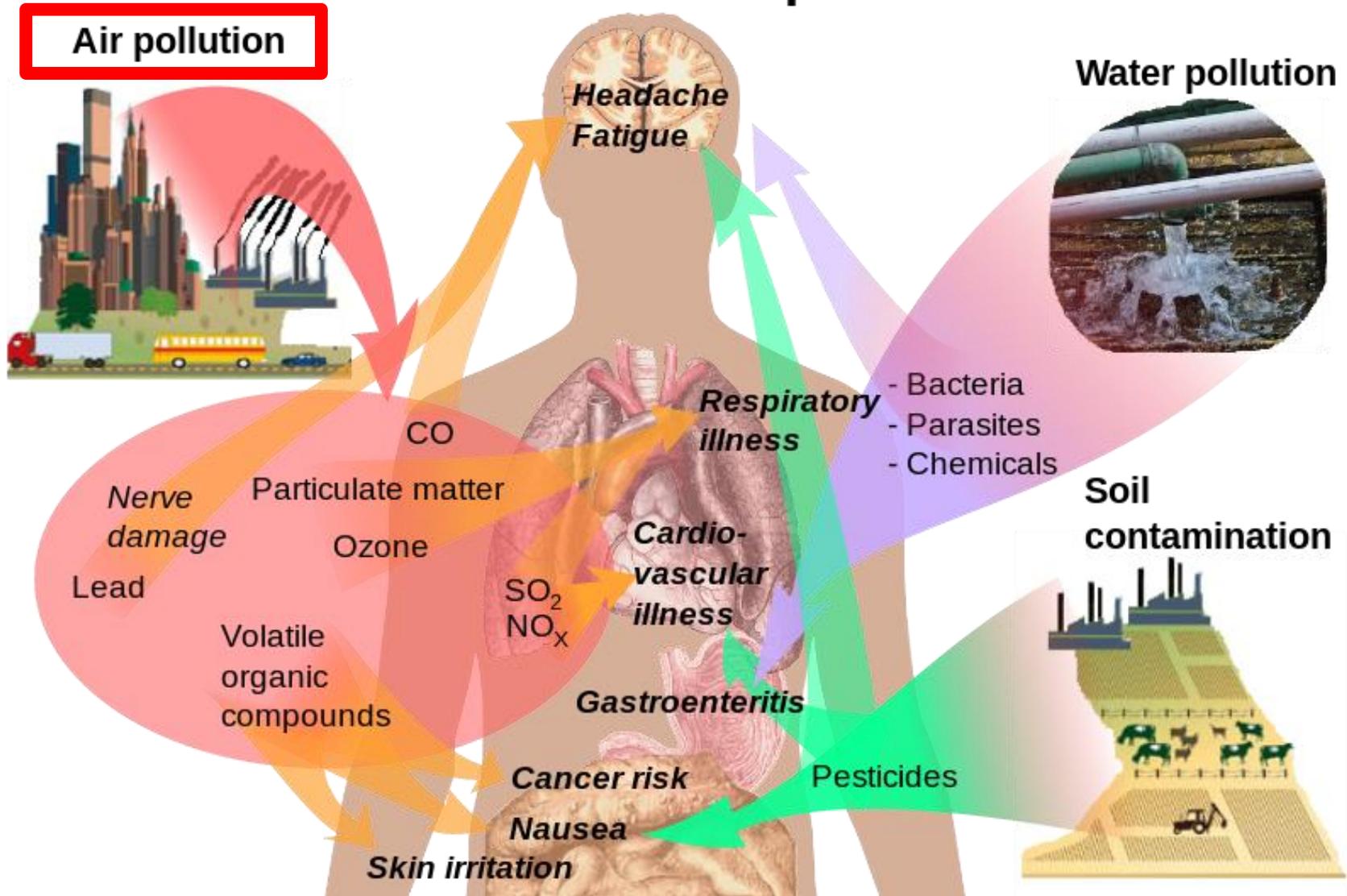
Sources: Centers for Disease Control and Prevention; National Institutes of Health



# Efeitos da poluição do ar: saúde (sistema respiratório)

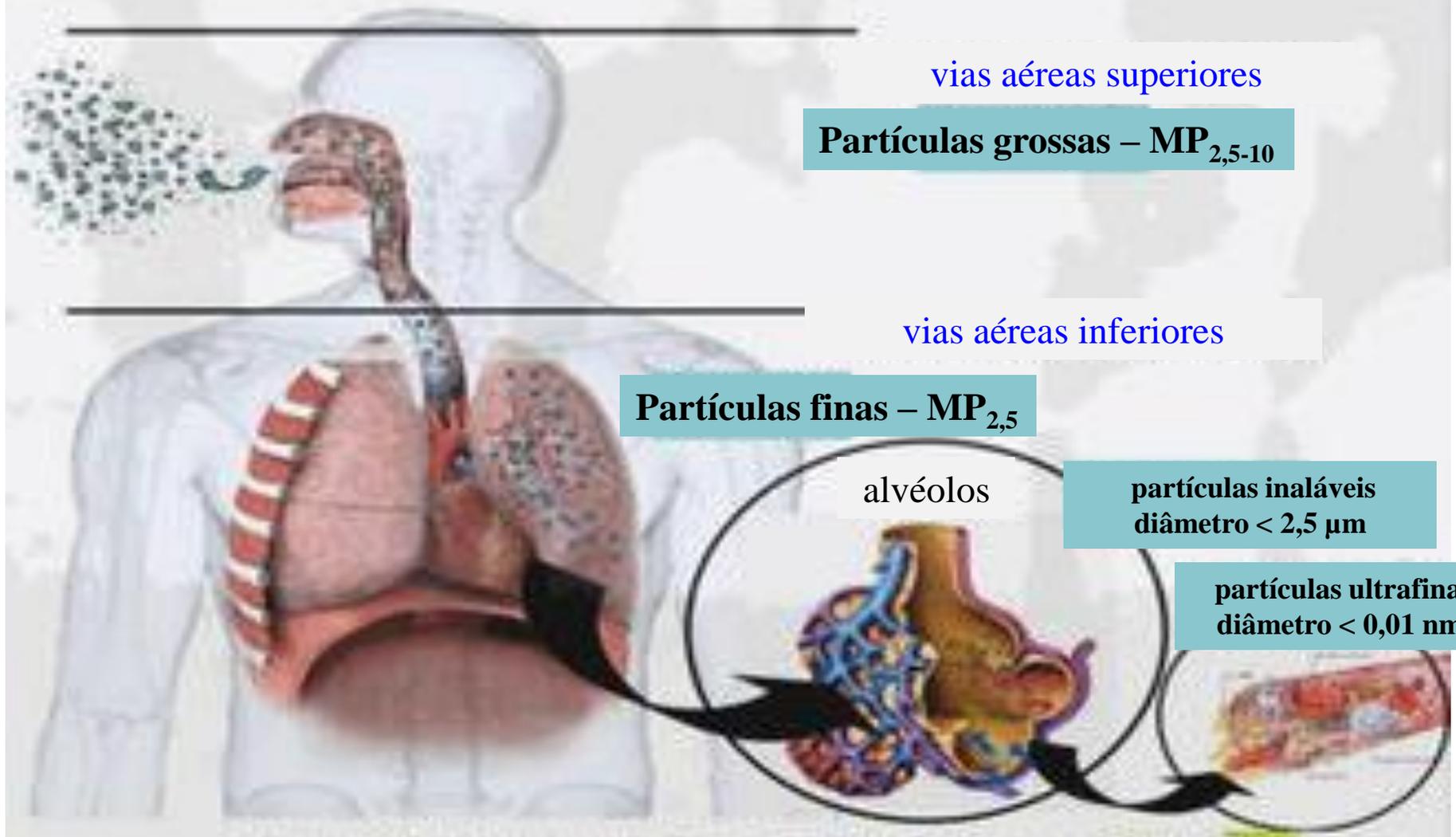


# Health effects of pollution



Autor: Mikael Häggström

# Sistema respiratório e material particulado



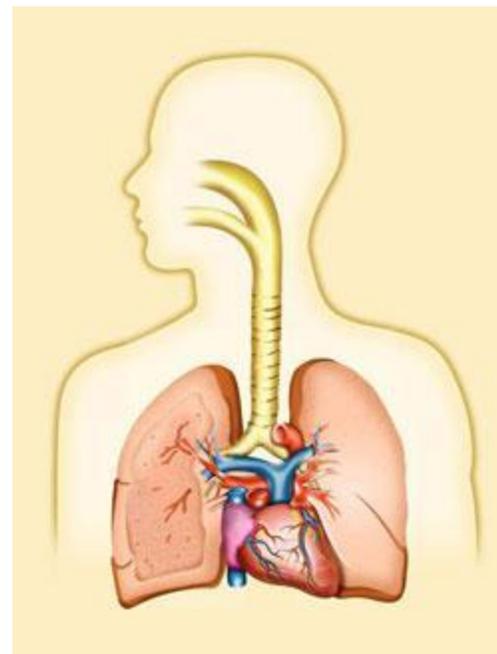
# Efeitos da poluição por ozônio na saúde

O ozônio no ar que respiramos pode prejudicar nossa saúde, especialmente em dias quentes e ensolarados, quando o ozônio pode atingir níveis prejudiciais à saúde. Mesmo níveis relativamente baixos de ozônio podem causar efeitos na saúde.

Quem corre risco?

- pessoas com asma, crianças, adultos mais velhos e pessoas que praticam atividades ao ar livre, especialmente os que trabalham ao ar livre;
- pessoas com certas características genéticas e pessoas com ingestão reduzida de certos nutrientes, como vitaminas C e E.

As crianças correm maior risco de exposição ao ozônio porque seus pulmões ainda estão em desenvolvimento e são mais propensas a serem ativas ao ar livre quando os níveis de ozônio estão altos, o que aumenta sua exposição.

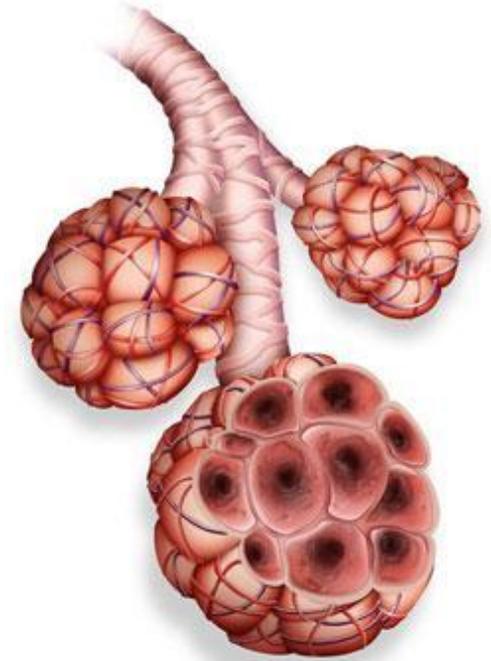


O ozônio é um oxidante poderoso que pode irritar as vias respiratórias.

# Quais problemas de saúde o ozônio pode causar?

Dependendo do nível de exposição, o ozônio pode:

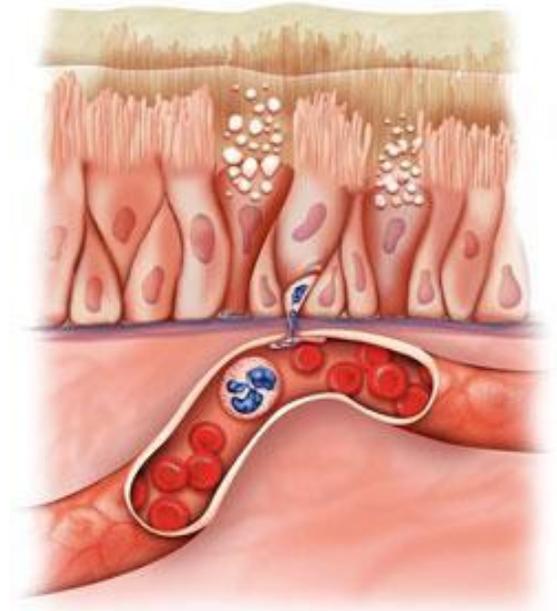
- causar tosse e garganta inflamada ou arranhada;
- tornar mais difícil respirar profunda e vigorosamente e causar dor ao respirar fundo;
- inflama e danifica as vias respiratórias;
- tornar os pulmões mais suscetíveis a infecções;
- Agravar as doenças pulmonares, como asma, enfisema e bronquite crônica;
- aumentar a frequência das crises de asma.



O ozônio pode fazer com que os músculos das vias aéreas se contraíam, prendendo o ar nos alvéolos. Isso leva a respiração ofegante e falta de ar.

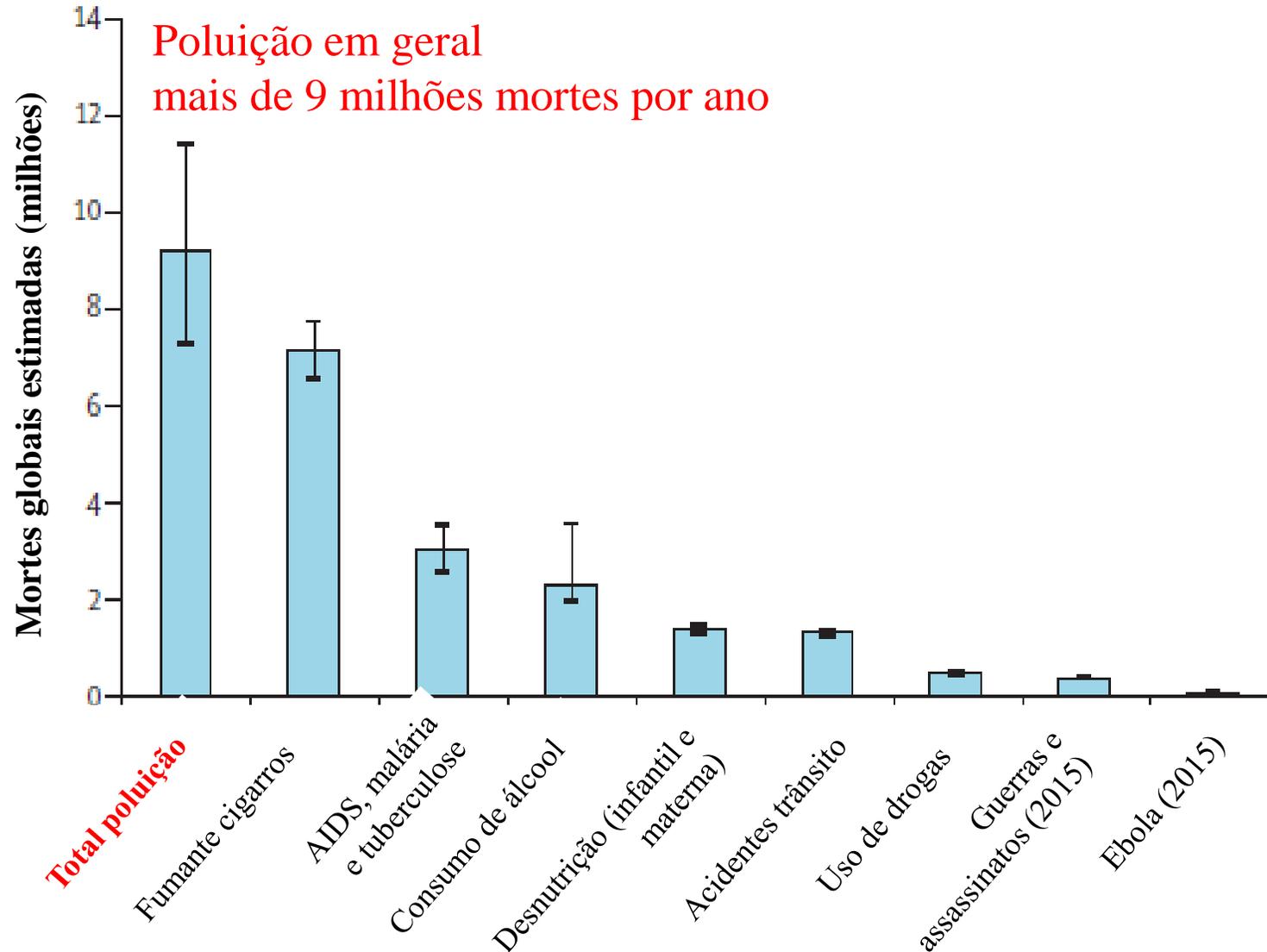
# Quais problemas de saúde o ozônio pode causar?

- ❑ Alguns desses efeitos foram encontrados até mesmo em pessoas saudáveis, mas os efeitos podem ser mais graves em pessoas com doenças pulmonares, como asma.
- ❑ Eles podem levar ao aumento de faltas escolares, uso de medicamentos, visitas a médicos e salas de emergência e admissões hospitalares.
- ❑ A exposição de longo prazo ao ozônio está associada ao agravamento da asma e é provavelmente uma das muitas causas do desenvolvimento da asma.
- ❑ Estudos em locais com concentrações elevadas também relatam associações de ozônio com mortes por causas respiratórias.

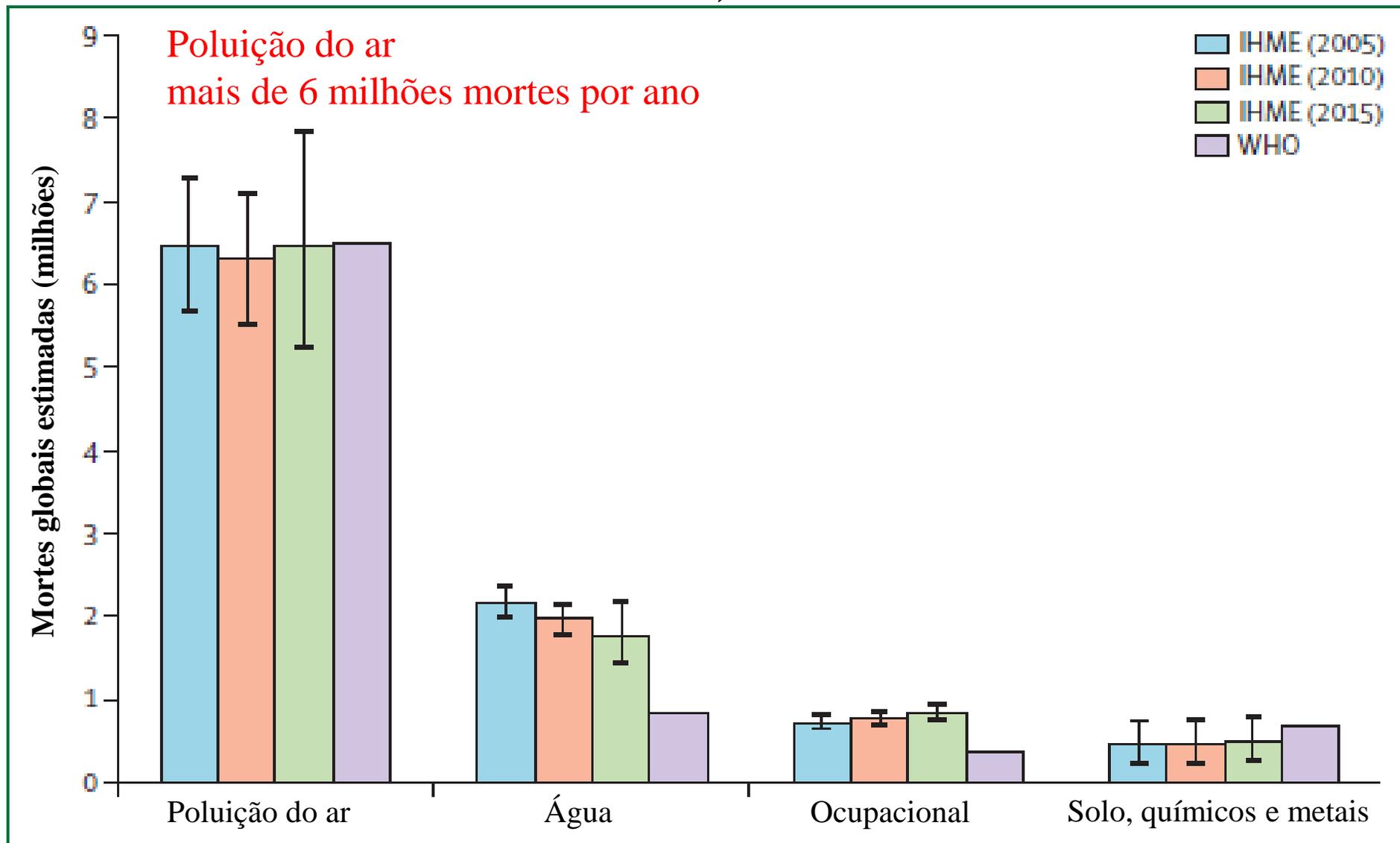


Com a inflamação causada pelo ozônio, o revestimento das vias aéreas é danificado, que pode ser comparado à inflamação da pele causada por queimaduras solares.

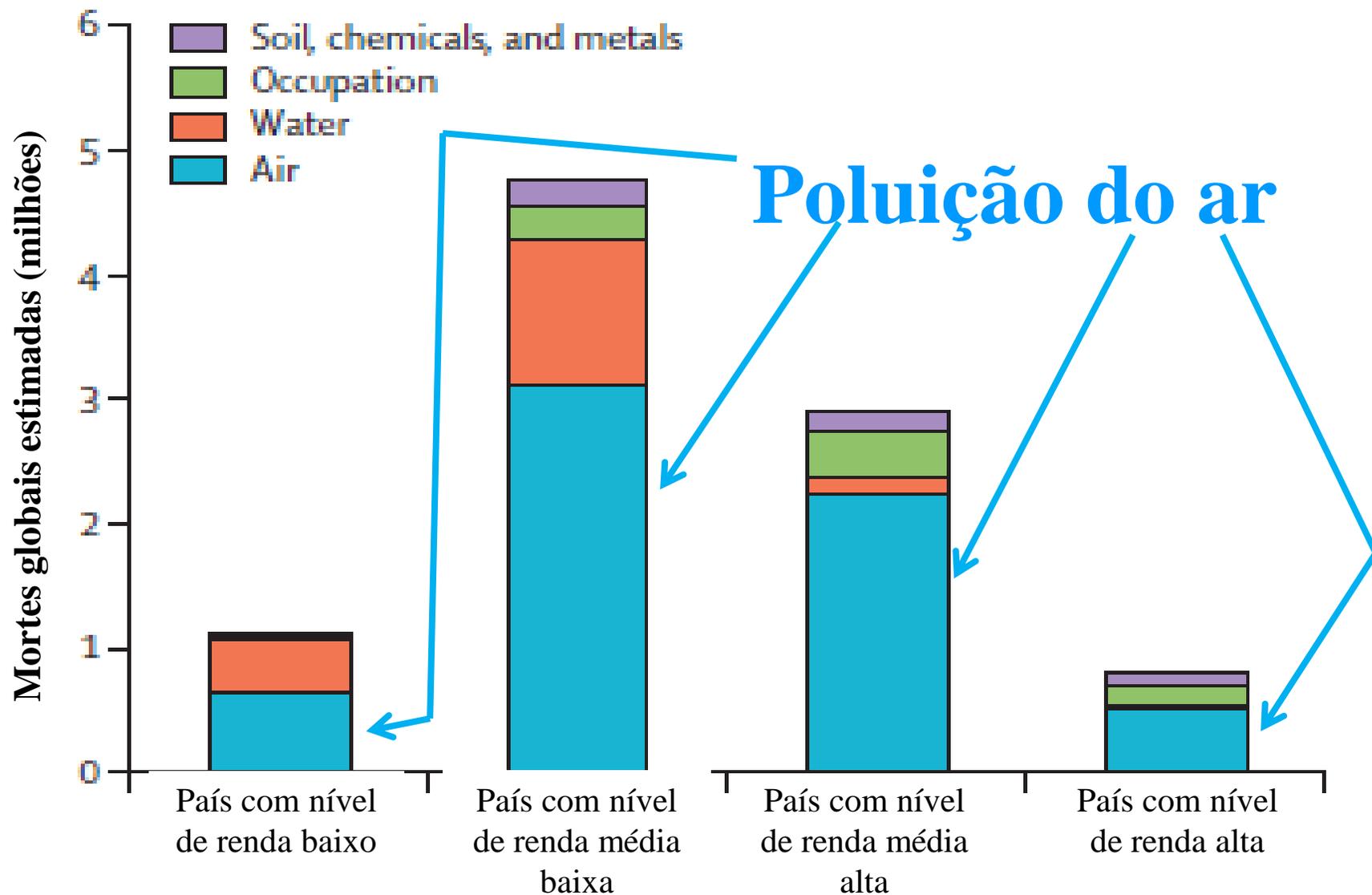
# Mortes globais estimadas (milhões) para diferentes fatores de risco, 2005–2015



# Mortes globais estimadas (milhões) por poluição como fator de risco, 2005–2015



# Mortes globais estimadas (milhões) por poluição como fator de risco em função da renda do país, 2005–2015





Health Topics ▾

Countries ▾

News ▾

Emergencies ▾

About Us ▾

## Air pollution

### Air pollution – a leading cause of NCD deaths

Most air pollution-related deaths are from noncommunicable diseases (NCDs). In terms of global disease burden, air pollution is the cause of over one-third of deaths from stroke, lung cancer, and chronic respiratory disease, and one-quarter of deaths from ischaemic heart disease.

↓ [Mortality from both ambient and household air pollution for 2016](#)  
pdf, 180kb

↓ [Air pollution and NCDs: key figures](#)  
pdf, 227kb

# THE INVISIBLE KILLER

Air pollution may not always be visible, but it can be deadly.



**29%**

OF DEATHS FROM  
**LUNG CANCER**



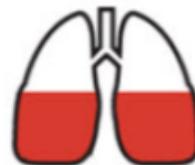
**24%**

OF DEATHS FROM  
**STROKE**



**25%**

OF DEATHS FROM  
**HEART DISEASE**



**43%**

OF DEATHS FROM  
**LUNG DISEASE**

<https://www.who.int/airpollution/en/>



**World Health  
Organization**

**91%**

da população mundial vive em locais onde a qualidade do ar excede os limites das diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS)

**4,2 milhões**

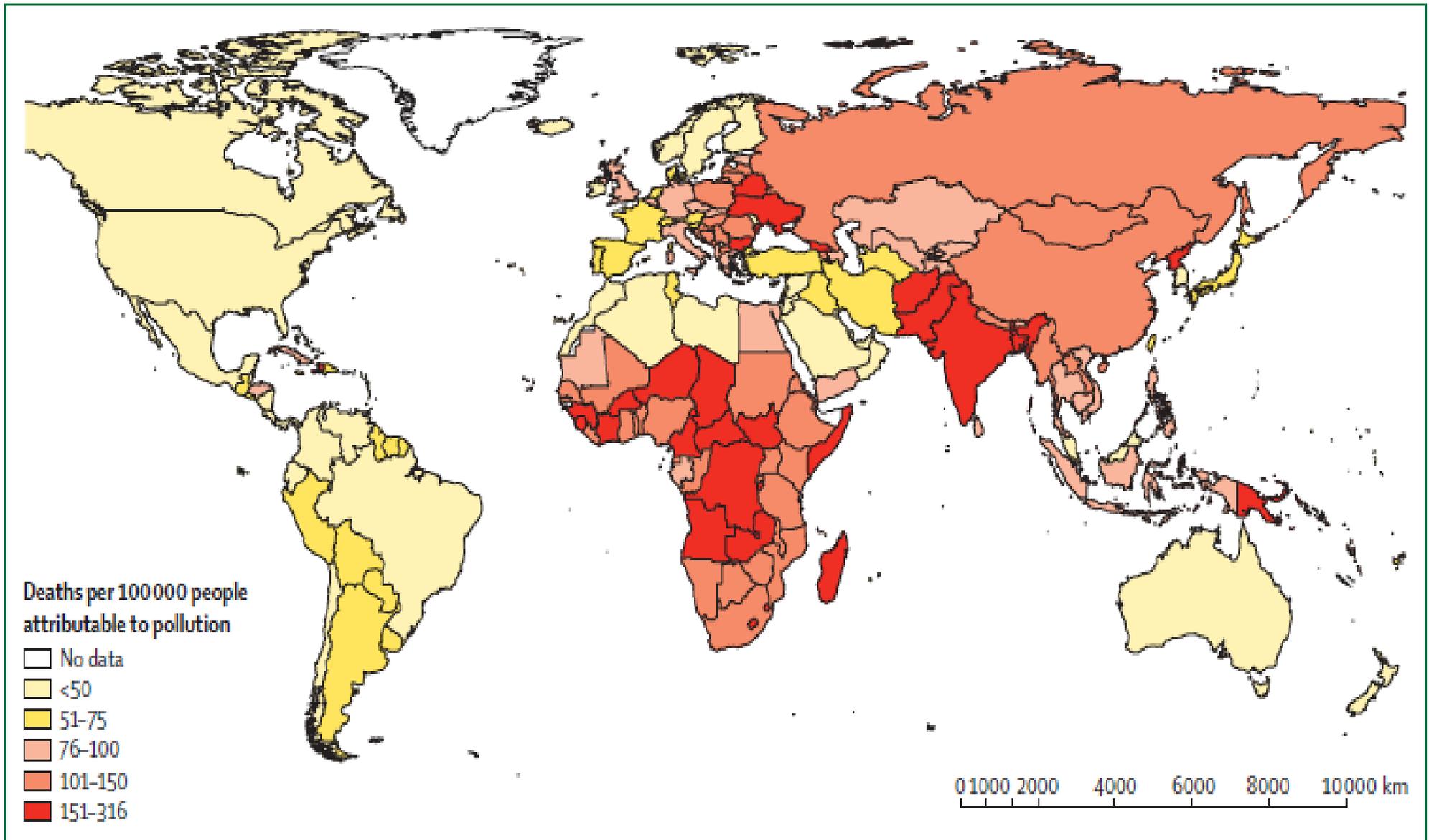
mortes todos os anos como resultado da exposição à poluição atmosférica ao ar livre

**3,8 milhões**

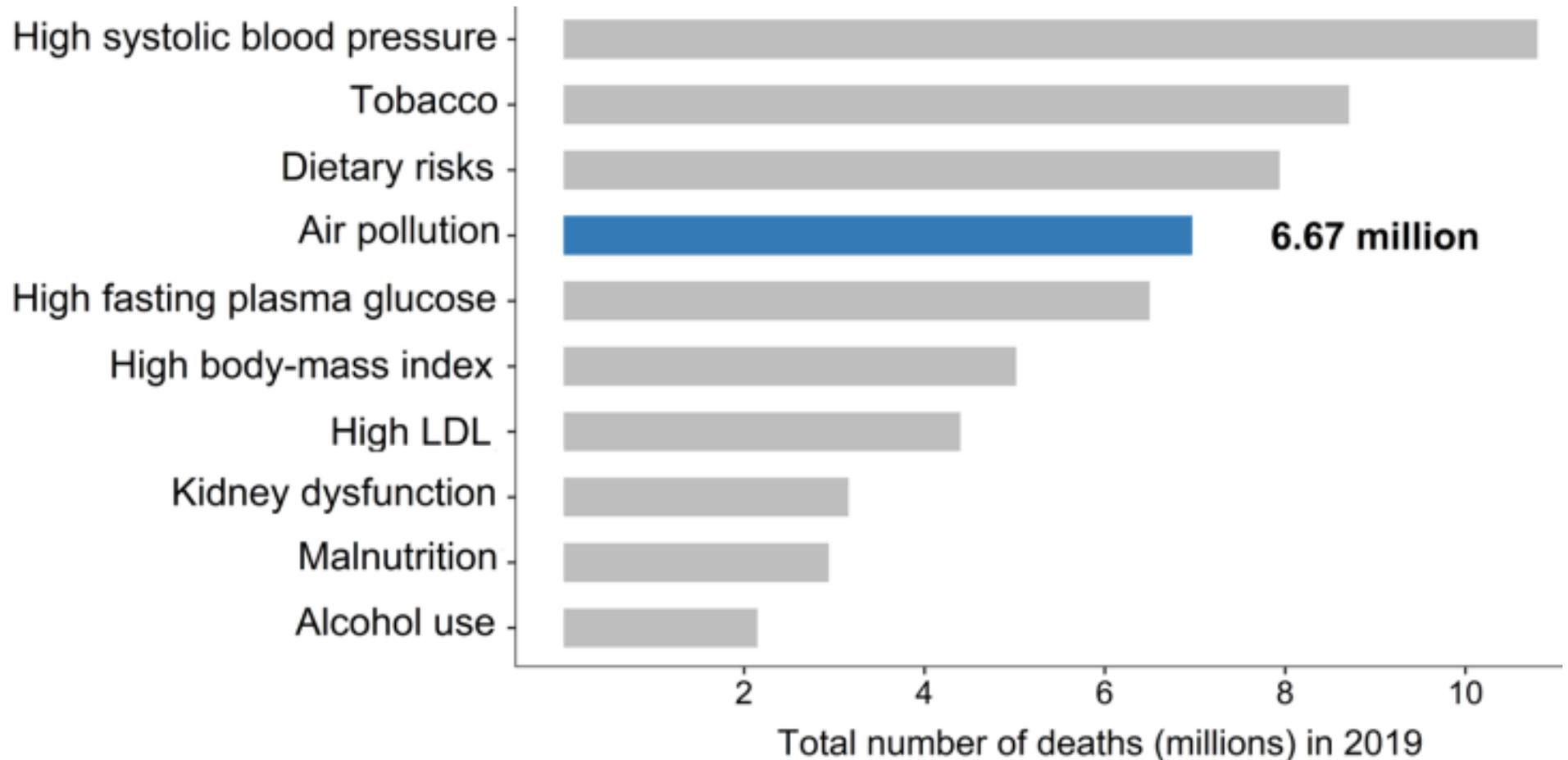
mortes a cada ano como resultado da exposição das famílias à fumaça de fogões de combustíveis sujos (carvão, madeira, lixo....)

**Total de 8 milhões de mortes no mundo devido poluição do ar em 2018**

# Distribuição do número de mortes por 100 000 pessoas **atribuíveis a todas as formas de poluição, 2015**

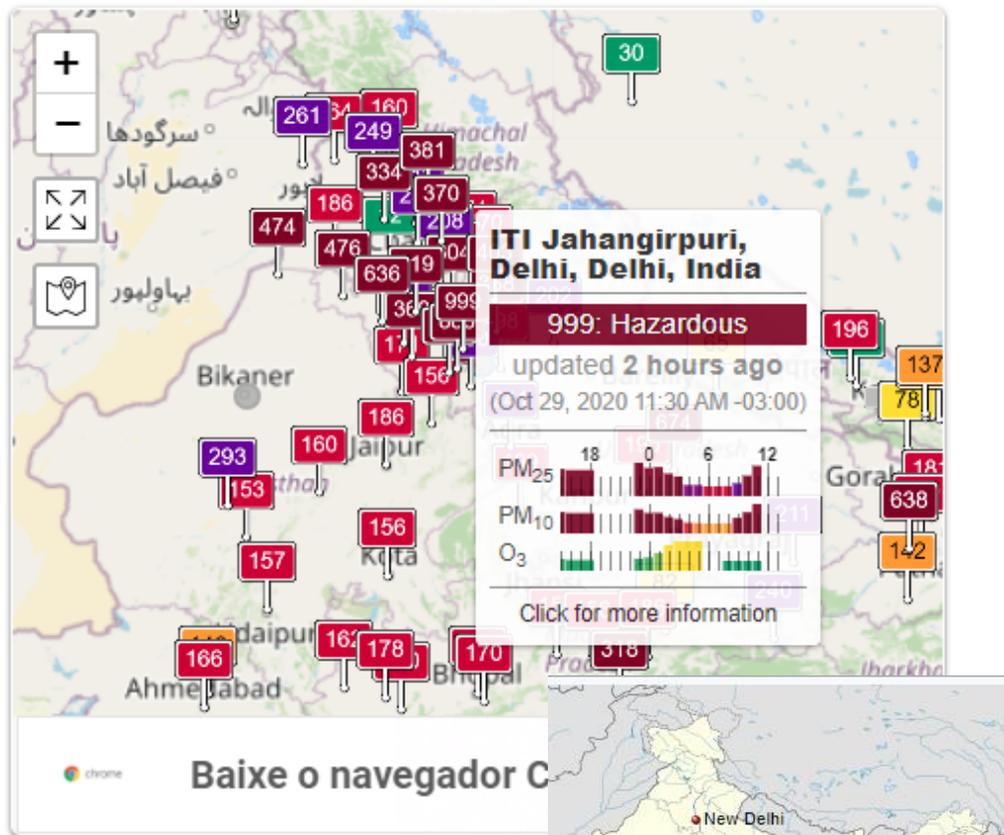
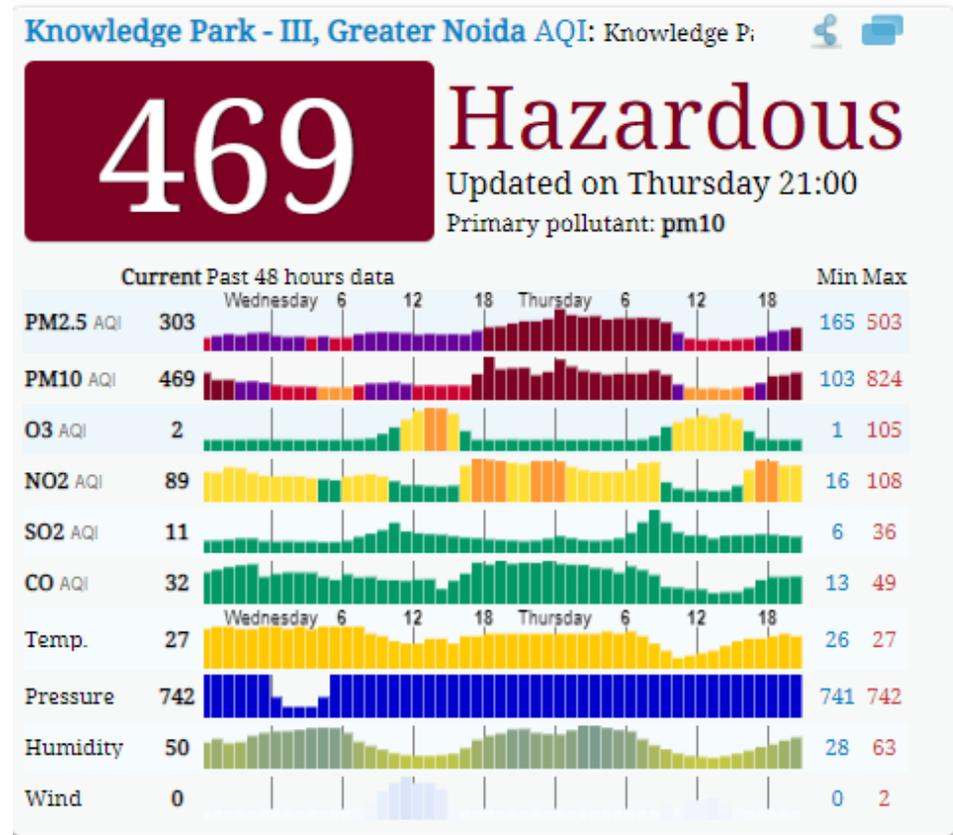


## Fatores de risco por número total de mortes por todas as causas no mundo em 2019.



# Knowledge Park - III, Greater Noida Air Pollution: Real-time Air Quality Index

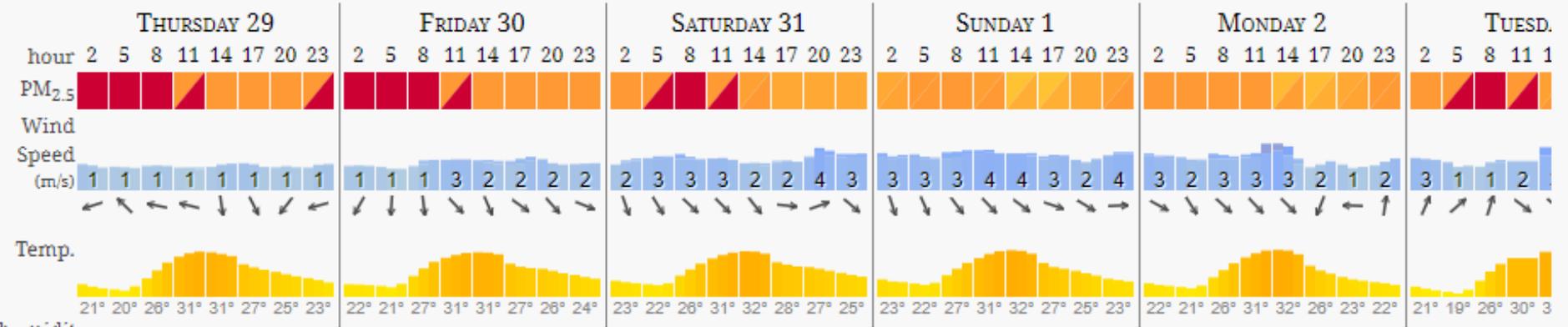
[KNOWLEDGE PARK - III, GREATER](#) | 
 [SECTOR - 125, NOIDA, UP](#) | 
 [SECTOR16A FARIDABAD,](#) | 
 [SECTOR16A FARIDABAD,](#) | 
 [SECTOR - 62, NOIDA, UP](#) | 
 [DR. KARNI SINGH SHOOTING RANGE,](#)



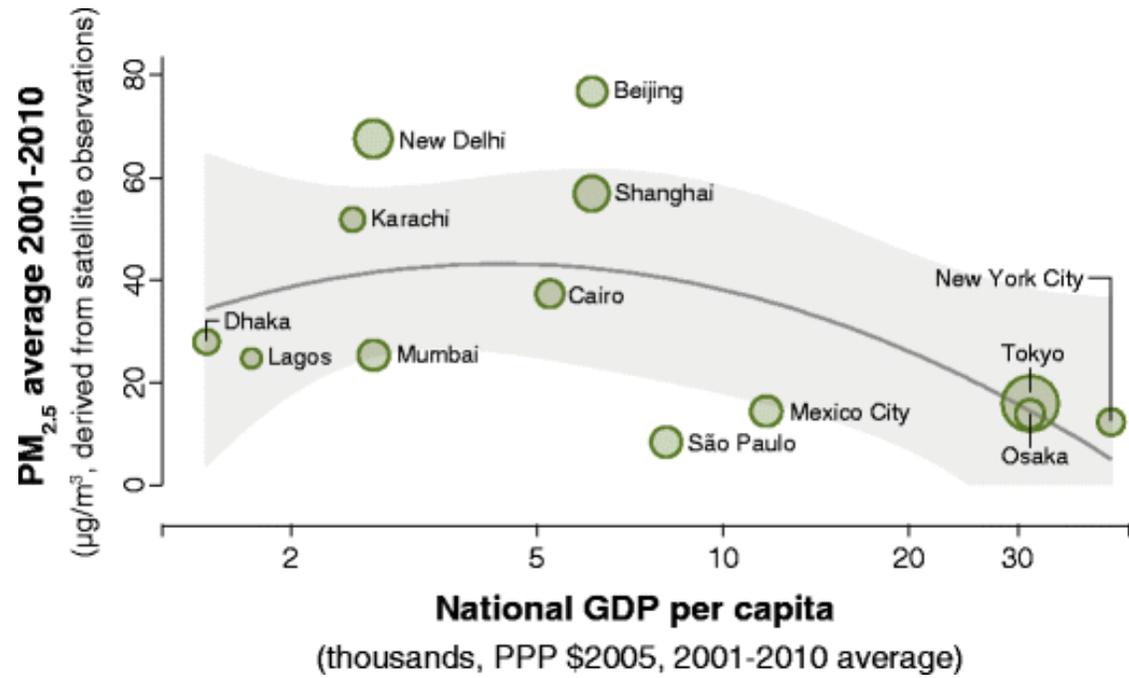
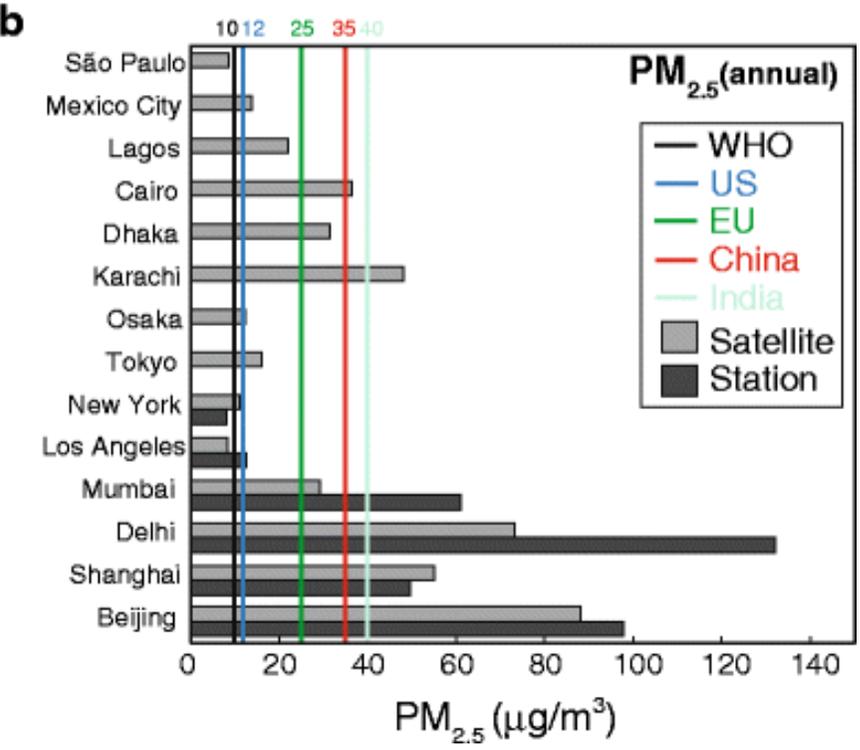
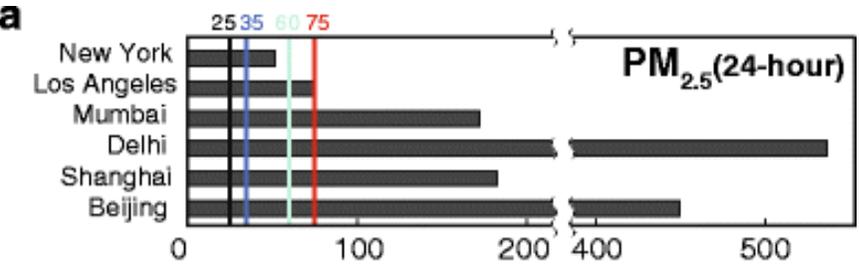
Norte da Índia, 29 de outubro de 2020

# Knowledge Park - III, Greater Noida Air Pollution: Real-time Air Quality Index (AQI)

## AIR QUALITY FORECAST



29 de outubro até 3 de novembro de 2020



**a** Maximum 24-h  $PM_{2.5}$  concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) recorded in 2014 at USA Embassy locations in Mumbai, Delhi, Shanghai, and Beijing and USA E.P.A. sites in Los Angeles and New York. Measurements provided by the USA Department of State Embassy locations are not fully verified or validated. *Lines* correspond to daily standards (Fig. S1). **b** Annual average  $PM_{2.5}$  concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) based on stations (for 2014) and satellite data (for 2011)

2001–2010 average  $PM_{2.5}$  [6, 7••] versus national GDP for the 13 cities shown in Fig. 1b, with each city represented by population size.  $PM_{2.5}$  [6, 7••] was extracted for a 100-km buffer around each urban agglomeration. The *shaded area* is the 95 % confidence interval around the quadratic fitted line. GDP data from World Bank Development Indicators; *PPP* purchasing power parity adjusted

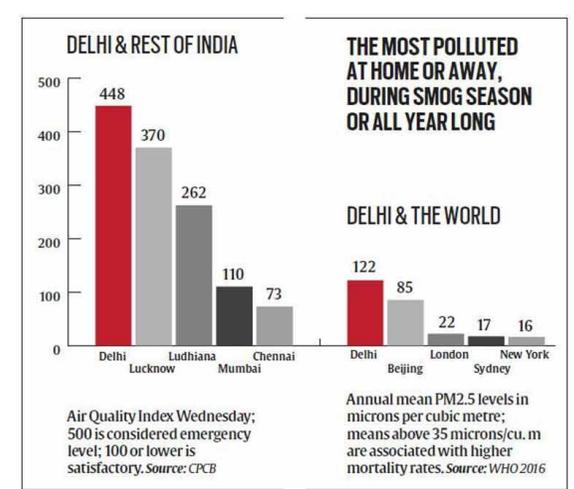
Marlier et al., Extreme Air Pollution in Global Megacities, [Current Climate Change Reports](#), 2(1), 15-27, 2016



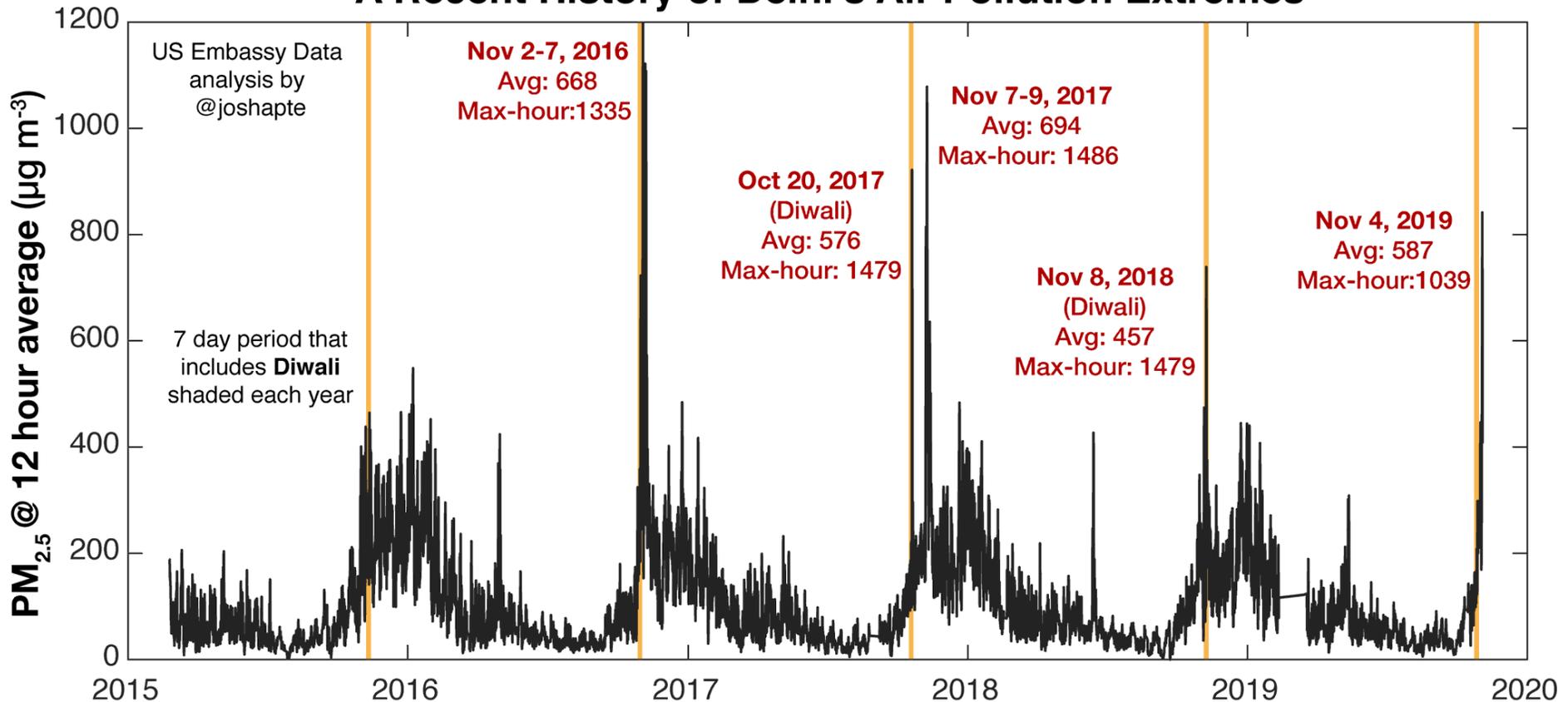
Air pollution is once again surging in Delhi. It's part of a larger pollution problem in India. *Sanjeev Verma/Hindustan Times/Getty Images (11/2019)*



Air pollution has been a major problem for New Delhi for years. This month it got worse. *(Altaf Qadri/AP). 11/2017*



## A Recent History of Delhi's Air Pollution Extremes



<https://twitter.com/joshapte/status/>

<http://apte.caee.utexas.edu/jsapte/>

# Health effects of air pollution

Efeitos agudos

Efeitos crônicos

## short-term effects

## long-term effects

exacerbation of asthma

cough, wheezing and shortness of breath

stroke

lung cancer

respiratory conditions

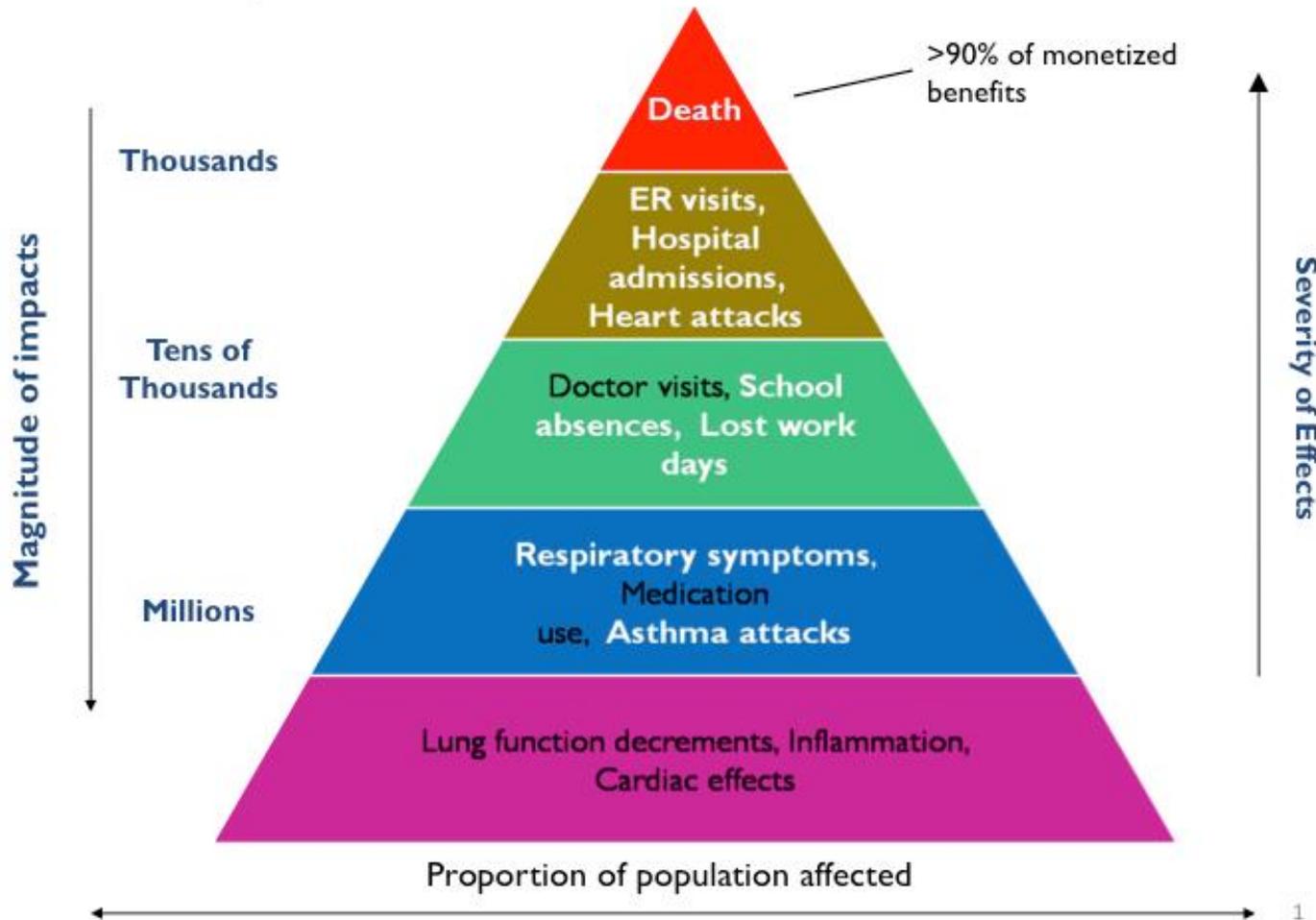
cardiovascular disease

episodes of high air pollution increase respiratory and cardiovascular hospital admissions and mortality

reduced life expectancy

# Estimativas dos efeitos econômicos e para a saúde devido poluição do ar

## A “Pyramid of Effects” from Air Pollution



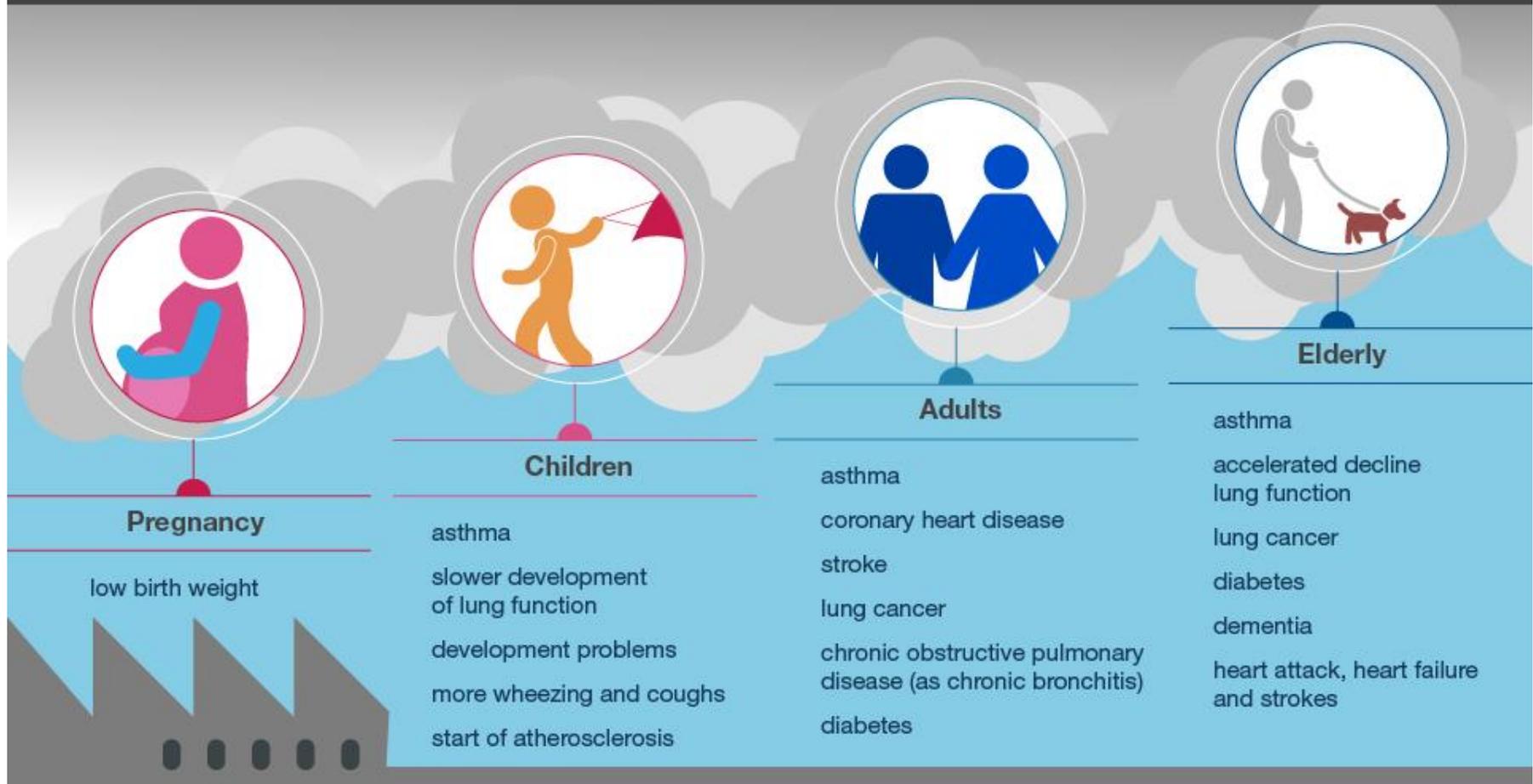
• **Partículas finas** podem entrar profundamente nos pulmões e atingir a corrente sanguínea. Os impactos das partículas na saúde incluem:

- morte prematura;
- ataques cardíacos não fatais;
- asma agravada.

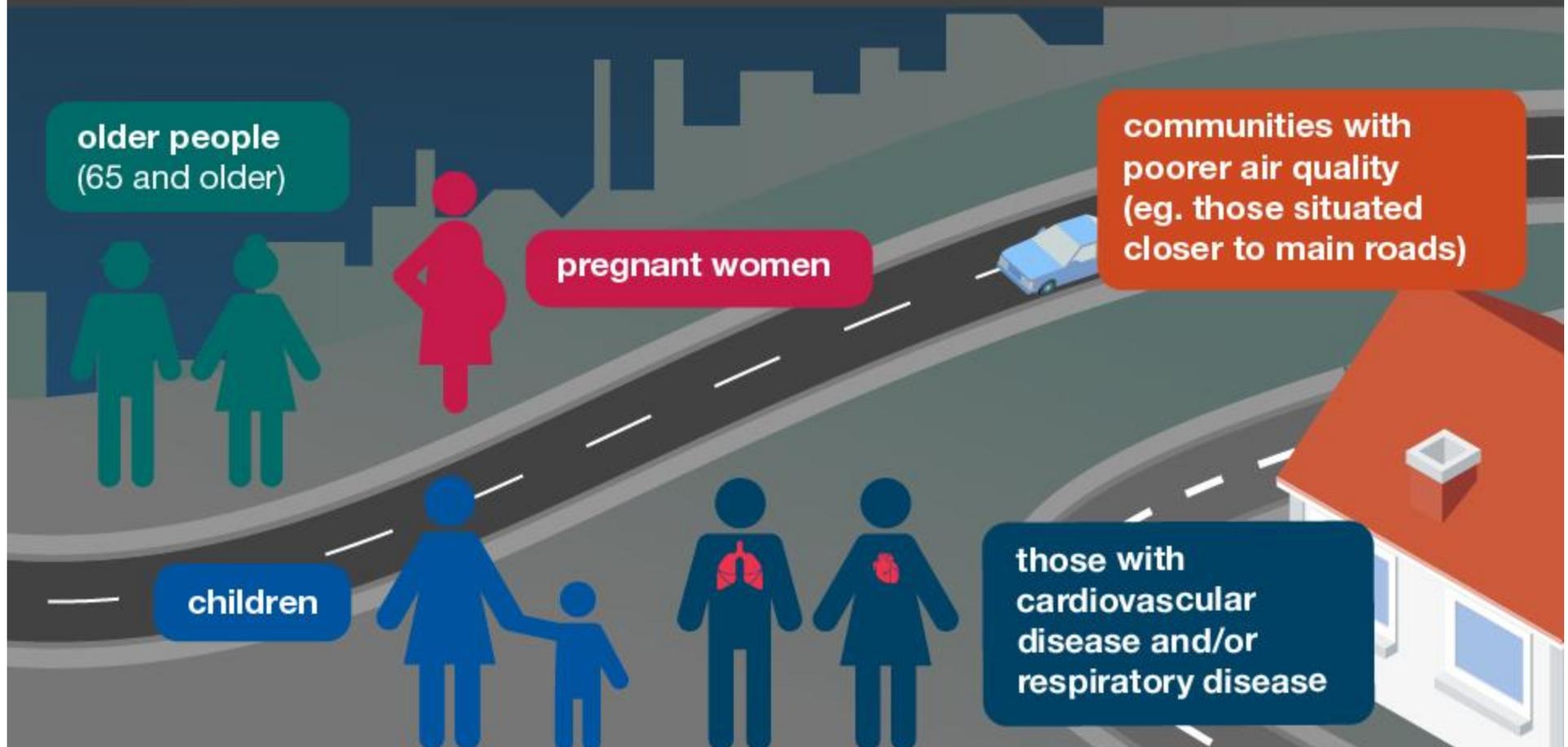
O **ozônio ao nível do solo** é um oxidante que pode irritar as vias respiratórias nos pulmões. Os impactos do ozônio na saúde incluem:

- morte prematura;
- asma agravada;
- dias perdidos de escola

# Air pollution affects people throughout their lifetime



# Air pollution affects everyone but there are **inequalities in exposure** and the **greatest impact on the most vulnerable**





## Create opportunities and promote active travel

Addressing air pollution by providing **good quality infrastructure** and **public transport** and encouraging people **to walk** and **cycle** rather than drive can help people to become fitter and healthier.



# Why travel makes a difference England



## Walking & cycling

If your journey is **less than a mile** try walking or cycling which is good for our physical and mental health. Switching more journeys to active travel will improve health, quality of life and reduce air pollution

## car trips/mile

Distance



## The school run

**41% of trips to schools for 5 -10 year olds are by car.** Cycling or walking to school with your children will help reduce the impact of air pollution. If you do have to drive, then turn off your engine when waiting for your children



## Public transport

By taking public transport we are **reducing the number of cars** on the road. Consider walking or cycling to the tram or train and avoid main roads using quieter routes which can help reduce exposure

## how we travel

Percentage



## Our choices can make a difference

**The majority of our journeys are by car.** By leaving your car at home and choosing to cycle, walk or use public transport, you can help reduce air pollution

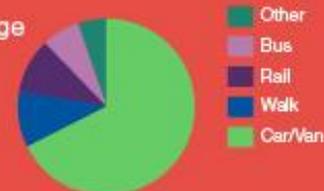


## Driving

Driving increases pollution through **combustion products or brake and tyre wear.** If you do need to drive avoid morning and evening rush hours if you can to reduce increased congestion

## how we get to work

Percentage



## Change the way you drive

Driving economically, such as **accelerating gently** and **adhering to speed limits** and ensuring your tyre pressures are correct, saves money by using less fuel, reduces the number of road collisions and reduces air pollution

# Efeitos da poluição por ozônio nos ecossistemas

Quando ozônio suficiente entra nas folhas de uma planta sensível, ele pode:

- ❖ reduzir a fotossíntese, que é o processo que as plantas usam para converter a luz solar em energia para viver e crescer.

- ❖ retardar o crescimento da planta.

- ❖ Em plantas sensíveis aumenta o risco de:

- ✓ doença

- ✓ dano por insetos

- ✓ efeitos de outros poluentes

- ✓ danos causados pelo mau tempo (chuvas, secas, frio e calor intensos).

Além disso, algumas plantas podem mostrar marcas visíveis em suas folhas quando o ozônio está presente sob certas condições.



# Efeitos da poluição por ozônio nos ecossistemas

O ozônio pode afetar a vegetação e os ecossistemas sensíveis, incluindo florestas, parques, refúgios de vida selvagem e áreas selvagens.

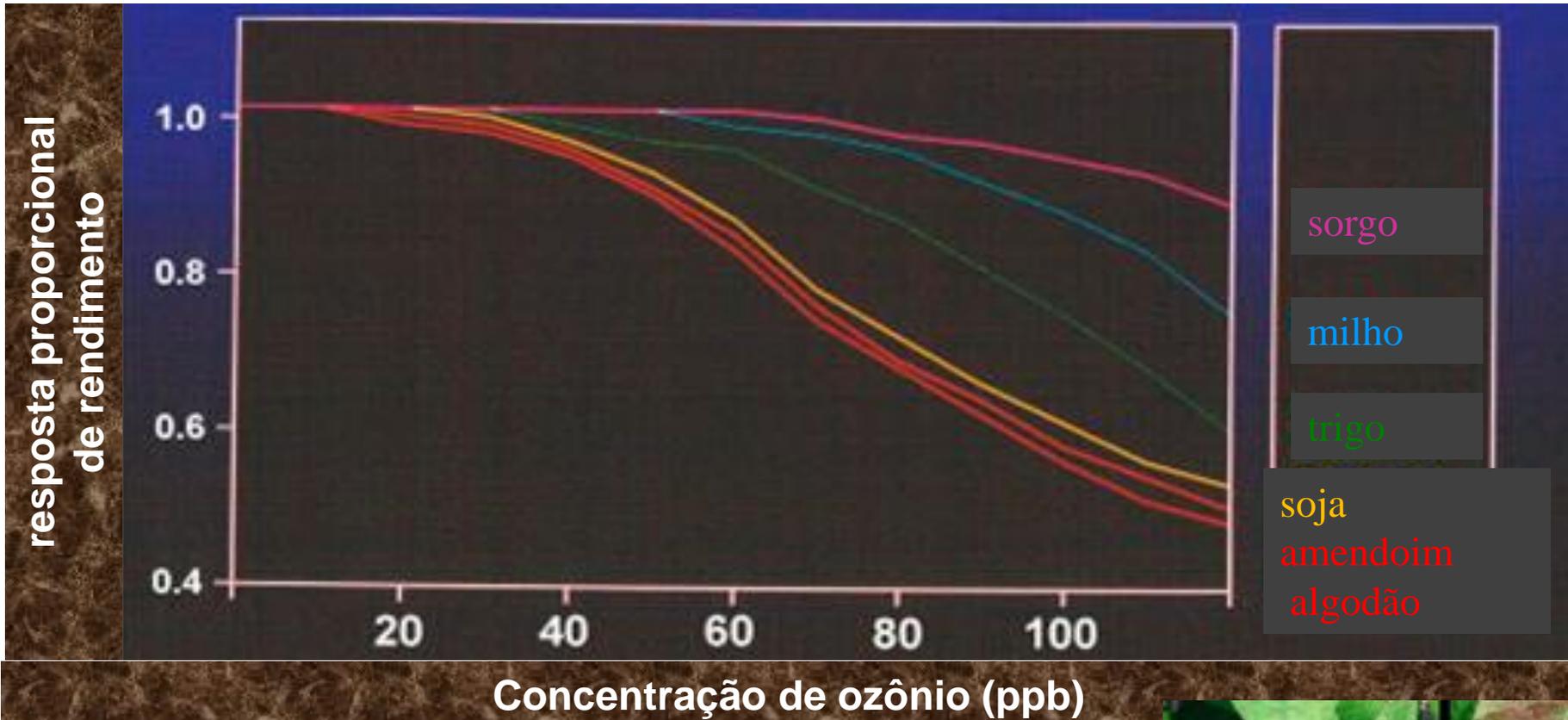
O que acontece com o ecossistema?

Os efeitos do ozônio em plantas individuais podem ter impactos negativos nos ecossistemas, incluindo:

- perda de diversidade de espécies (menos variedade de plantas, animais, insetos e peixes);
- mudanças no sortimento específico de plantas presentes em uma floresta;
- mudanças na qualidade do habitat;
- mudanças nos ciclos de água e nutrientes.

<https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ecosystem-effects-ozone-pollution>

# Efeitos do ozônio as plantas

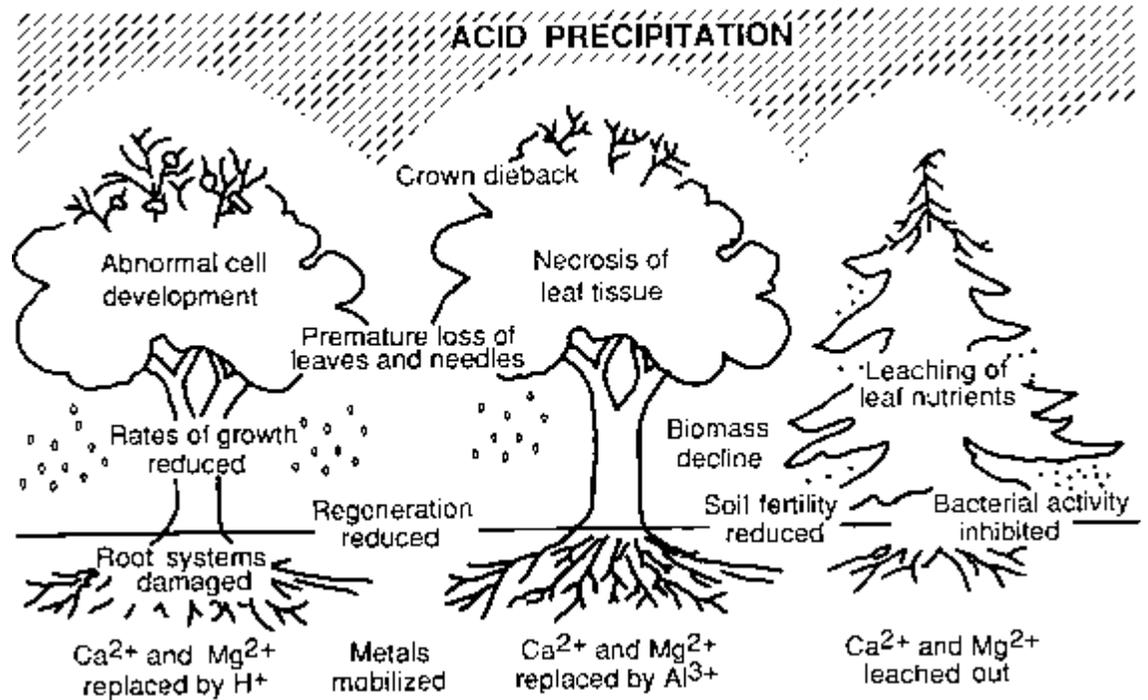
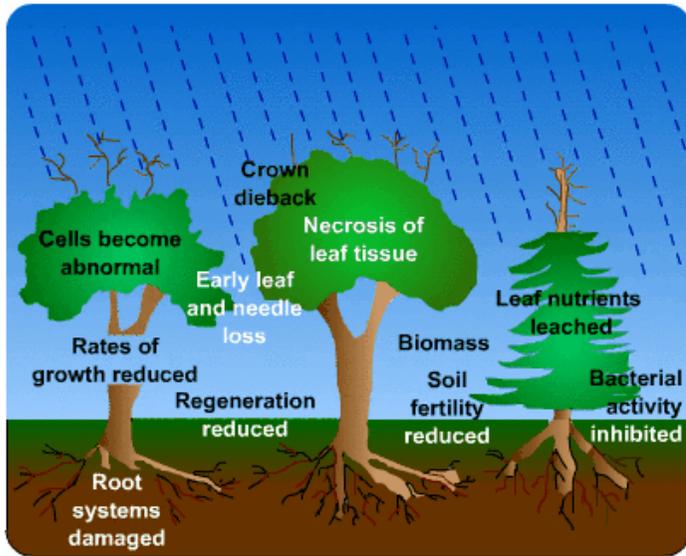


Ozônio ao nível do solo é absorvido pelas folhas das plantas, reduzindo a fotossíntese e causando diminuição do crescimento, também pode tornar as plantas sensíveis mais suscetíveis a determinadas doenças, insetos, intempérie e outros poluentes.



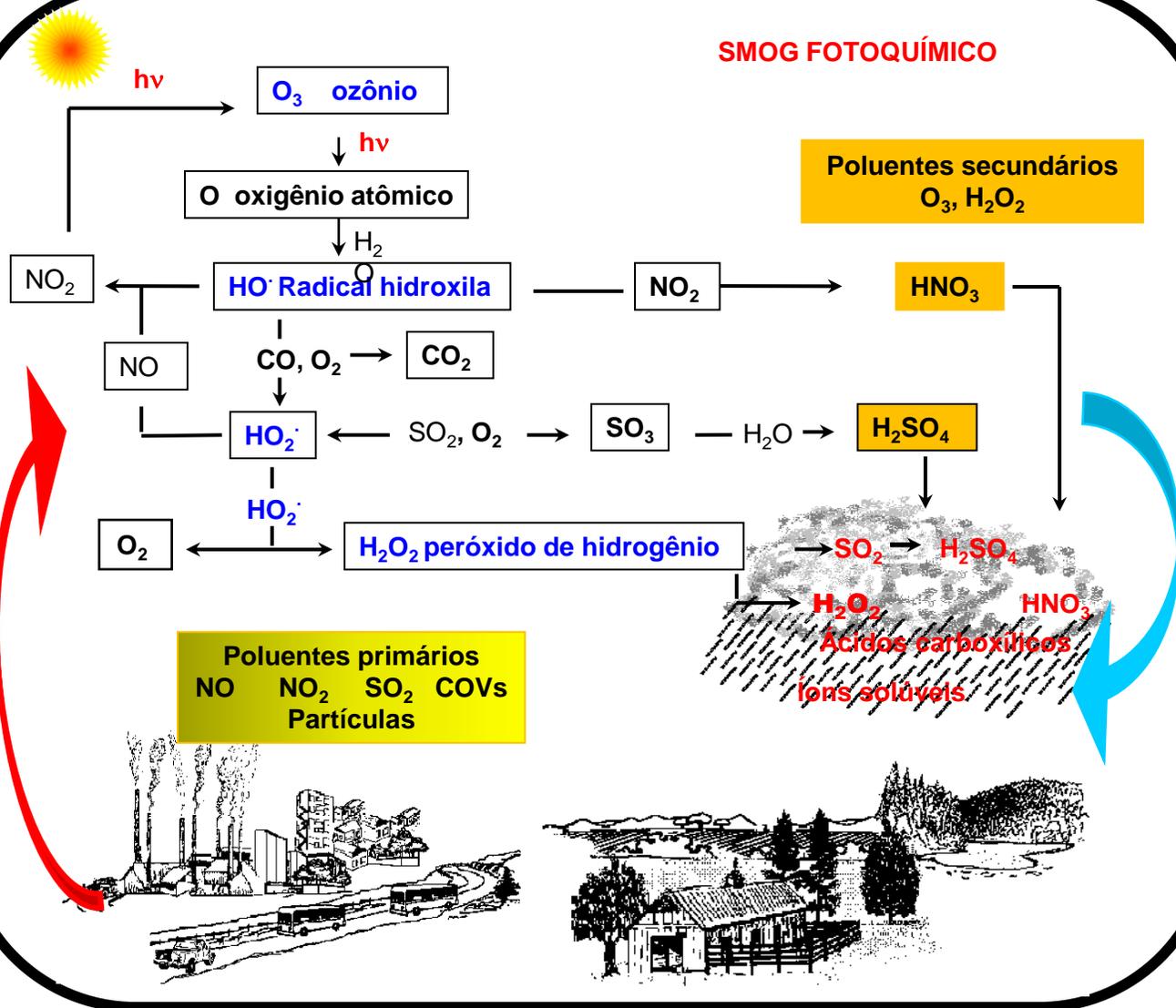
# Efeitos da poluição do ar à vegetação



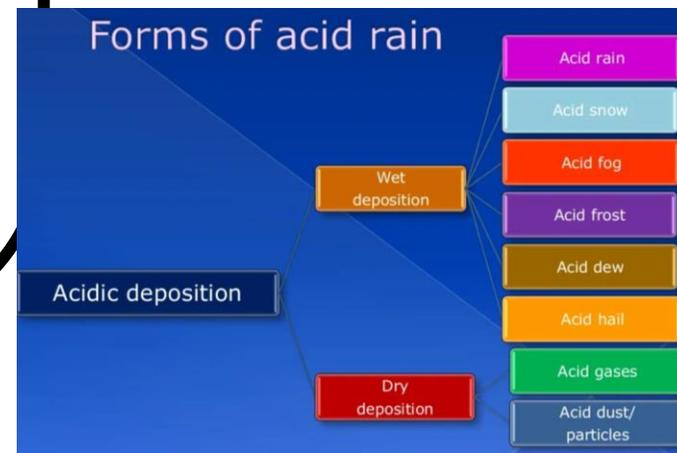


<https://www.briangwilliams.us/environmental-issues/acid-rain-and-the-terrestrial-environment.html>

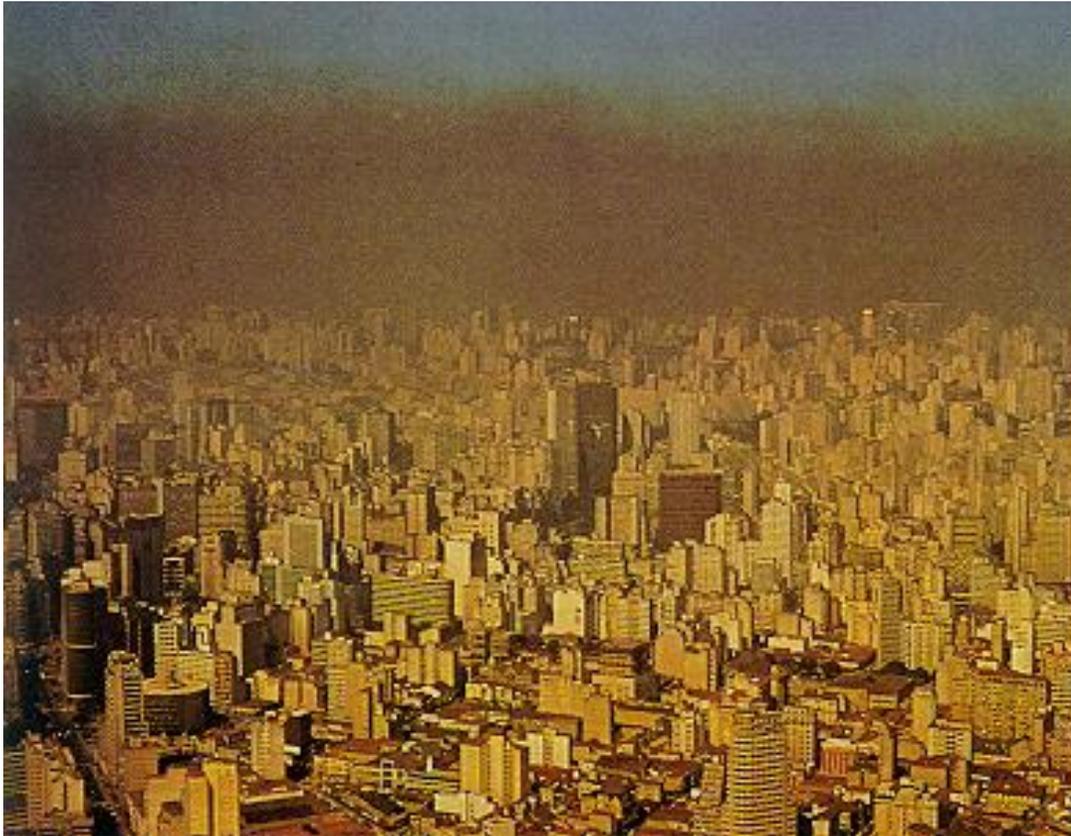
## SMOG FOTOQUÍMICO



Processos e reações em atmosfera urbana poluída.



# Smog fotoquímico



*Smog* fotoquímico em São Paulo (~1990).

O gás de cor castanha,  $\text{NO}_2$ , é formado quando o  $\text{NO}$ , que é um gás incolor, reage com o oxigênio do ar.

(P.W. Atkins, “*Atoms, Electrons, and Change*”, 1991)

## Efeitos da poluição do ar: deposição ácida



Deterioração de mármore - Herten, Alemanha.

# Perda de visibilidade

foto : Marcelo de Paula Corrêa



São Paulo  
Cidade Universitária

foto : Marcelo de Paula Corrêa

