

Contaminació atmosfèrica: factors, legislació i salut

Barcelona, 21 de març de 2026



XXXI METEOCAT 2026

METEOROLOGIA, CLIMA I SALUT

21 de març de 2026

Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Mireia Udina Sistach

Professora Lectora. Grup Meteorologia. Departament de Física Aplicada. Universitat de Barcelona

Índex

1. Introducció a la contaminació atmosfèrica
2. Gasos i partícules a l'atmosfera i impactes en la salut i els ecosistemes
3. Factors meteorològics en la dispersió de contaminants
4. Legislació i regulació

Composició de l’atmosfera

Gasos fixes o permanents

Gas	Chemical formula	Volume fraction	Residence time	Major sources
Nitrogen	N ₂	78.084%	2 × 10 ⁷ years	Biological
Oxygen	O ₂	20.946%	3–4,000 years	Biological
Argon	Ar	0.934%		Radiogenic
Carbon dioxide	CO ₂	400 ppmv	5-100 years	Biological, combustion
Neon	Ne	18.2 ppmv		Primordial
Helium	He	5.24 ppmv	3 × 10 ⁶ years	Radiogenic
Krypton	Kr	1 ppmv		Primordial
Xenon	Xe	0.1 ppmv		Primordial
Methane	CH ₄	1.7 ppmv	9 years	Biological, agriculture
Hydrogen	H ₂	0.56 ppmv	~2 years	Biological, anthropogenic
Nitrous oxide	N ₂ O	0.31 ppmv	150 years	Biological, anthropogenic
Carbonyl sulphide	OCS	0.5 ppbv	~5 years	Biological

Box and Box, 2024

El **temps de residència** (τ) d’un gas a l’atmosfera és el temps mitjà que una molècula d’aquest gas roman a l’atmosfera abans de ser eliminada per processos com la deposició (seca i/o humida), la reacció química o l’absorció pels oceans i biosfera.

$$\tau = \frac{\text{massa espècie}}{\text{taxa eliminació}}$$

Composició de l'atmosfera

Gasos variables

Box and Box, 2024

Gas	Formula	Volume fraction	Residence time	Major sources
Ozone (strat.)	O ₃	Up to 10 ppmv		Photochemical
Ozone (trop.)	O ₃	10–100 ppbv	Days–weeks	Photochemical
Carbon monoxide	CO	40–200 ppbv	~60 days	Anthropogenic, photochemical
Non-methane hydrocarbons		5–20 ppbv	Variable	Biological, anthropogenic
Halocarbons		~4 ppbv	Variable	Anthropogenic
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂	0.1–10 ppbv	1 day	Photochemical
Reactive nitrogen species (see text)	NO _y	10 pptv–1 ppmv	Variable	Lightning, soil, anthropogenic
Formaldehyde	CH ₂ O	0.1–1 ppbv	~1.5 hours	Photochemical
Ammonia	NH ₃	10 pptv–1 ppbv	2–10 days	Biological
Sulphur dioxide	SO ₂	10 pptv–1 ppbv	Days	Photochemical, anthropogenic
Dimethyl sulphide	(CH ₃) ₂ S	10–100 pptv	0.7 days	Biological: oceanic
Hydrogen sulphide	H ₂ S	5–500 pptv	1–5 days	Biological: swamps, etc.
Carbon disulphide	CS ₂	1–300 pptv	~5 days	Biological, anthropogenic
Hydroxyl radical	OH	0–0.4 pptv	~1 s	Photochemical
Hydroperoxyl radical	HO ₂	0–5 pptv		Photochemical

Els gasos **variables** generalment son altament reactius, amb **temps de residència** d'una setmana o menys. Les seves concentracions varien considerablement, especialment geogràficament, en funció de les fonts rellevants i la seva variabilitat. Moltes d'aquestes fonts estan íntimament relacionades amb l'activitat humana, especialment la crema de combustibles fòssils i altres pràctiques industrials i agrícoles.

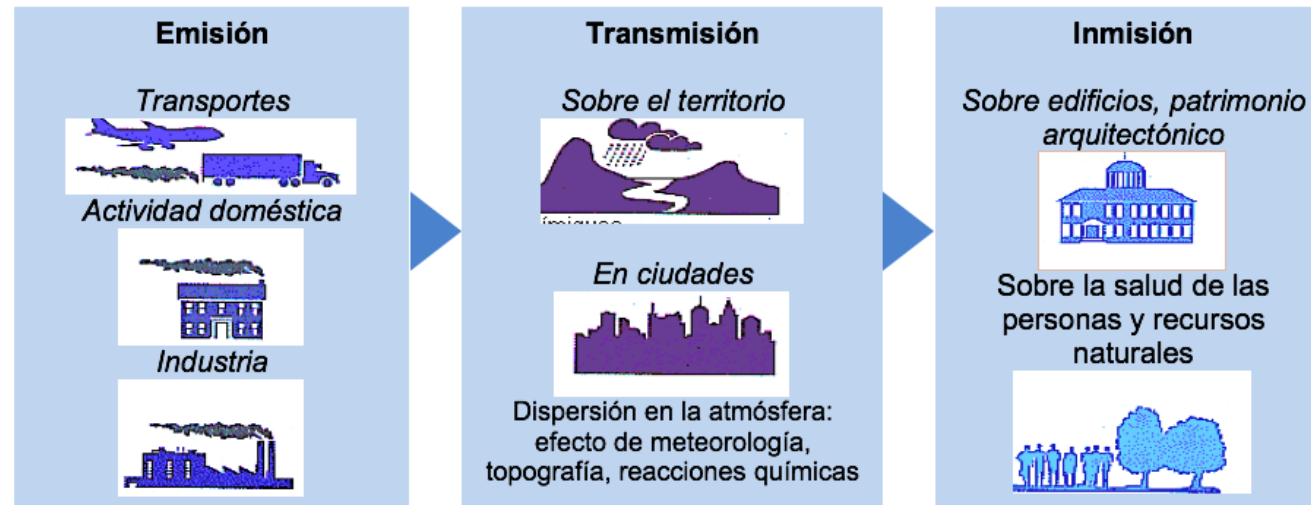
Gasos traça

A part dels principals gasos (N_2 , O_2 , Ar, H_2O) la resta de gasos presents a l'atmosfera en concentracions molt més baixes s'anomenen gasos **traça**. Malgrat la seva **baixa concentració** són de gran importància per l'efecte hivernacle, efectes sobre la salut dels éssers vius, la capa d'ozó, l'smog fotoquímic i altres problemes ambientals.

Podem distingir entre els gasos traça:

- Gasos **efecte hivernacle** (GEH) (GHG: *Green house gases*)
 CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs (i H_2O com a part del cicle hidrològic)
- Gasos contaminants **forçadors climàtics** de vida curta (SLCFs = short-lived climate forcers) -> impacten el clima a curt termini (alteren el balanç radiatiu)
 CH_4 , O_3 , partícules BC (black carbon) i alguns altres aerosols. Com a precursors de l'ozó també inclouríem NO_x , CO i COVs.
- Gasos contaminant amb **efecte** en la **salut i el medi ambient** (qualitat de l'aire)
 NO_x (NO_2 , NO), NH_3 , CO, COVs (no metànics), SO_2 , H_2S , O_3 . També aerosols o PM (PM10, PM2.5).

El procés de contaminació atmosfèrica



- **Emissió:** l'alliberament de substàncies a l'atmosfera a partir d'un punt concret.
- **Transmissió:** transport i dispersió d'aquestes substàncies contaminants a través de l'atmosfera des del punt d'emissió fins als diferents punts de l'espai.
- **Immissió** és el nivell de substàncies contaminants que podem mesurar en un punt concret de l'espai, independentment de la font d'on prové (en ppm, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, etc).

Conèixer el nivell d'immissió dels diferents contaminants és conèixer el nivell de **qualitat de l'aire**.

A igualtat de substàncies contaminants provinents de fonts emissores, la contaminació pot assolir nivells d'immissió (o de qualitat d'aire) diferents. Això es degut en bona part a les **condicions atmosfèriques**.

Òxids de nitrogen (NO_x)

Òxids de nitrogen (NO_x): monòxid de nitrogen (NO) i diòxid de nitrogen (NO₂)

Son resultat de la combustió a elevades temperatures. Són substàncies altament contaminants que participen en les reaccions que condueixen a la formació d'ozó (O₃), de l'smog fotoquímic i de partícules nitrat.

Principals fonts **antropogèniques** (~50-70% del total)

- Combustió combustibles fòssils (vehicles transport)
- Centrals tèrmiques i de producció d'energia
- Processos industrials



- ❖ Efectes salut: problemes respiratoris, asma, bronquitis
- ❖ Efectes en el medi ambient: pluja àcida
- ❖ És un forçador climàtic de vida curta (precursor ozó i partícules nitrat)

Temps residència: d'hores a dies

Òxids de nitrogen (NOx)

Efectes dels òxids de nitrogen (NOx) sobre la salut

- **Irritació** del sistema **respiratori**: irrita les vies respiratòries i provoca inflamació dels pulmons.
- **Empitjorament** de malalties respiratòries: pot agreujar malalties com l'asma i la bronquitis, augmentant la freqüència i la gravetat dels símptomes.
- **Reducció** de la **funció pulmonar**: l'exposició prolongada pot disminuir la capacitat pulmonar (especialment en nens i persones grans).
- Augment de la **sensibilitat a infeccions**: danya les defenses naturals de les vies respiratòries, facilitant infeccions respiratòries.
- Formació de **contaminants secundaris** perjudicials: Participa en la formació d'ozó (O_3) troposfèric i de partícules fines (nitrats), que també tenen efectes negatius sobre el sistema respiratori i cardiovascular.

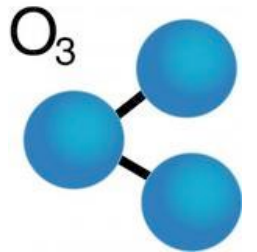


Ozó troposfèric (O₃)

És un gas **secundari** que es forma a l'atmosfera a partir **d'NO_x, hidrocarburs (COVs, CH₄, etc.)** i la presència de **radiació solar** incident amb energia suficient.

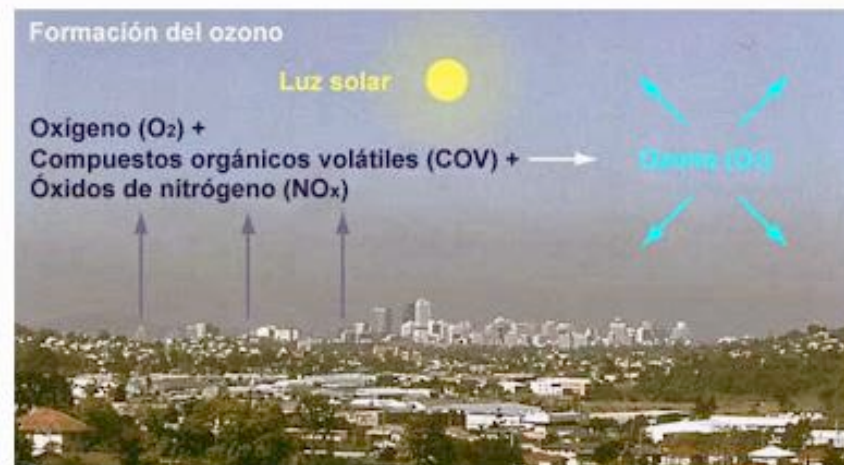
A concentracions elevades és tòxic per als **humans** i per a la **vegetació**, perquè **oxida** el teixit biològic. En concentracions altes causa **dificultats per respirar**, augmenta el risc d'asma i d'altres malalties pulmonars. També pot afectar persones amb malalties cardiovasculars i la salut general de la població.

En llocs propers a zones poblades amb presència de NO_x i hidrocarburs es pot formar ràpidament. Es converteix en un problema regional, ja que es pot formar en zones allunyades, rurals, on han arribat els precursors transportats des de les zones urbanes.



Impactes:

- ❖ Efecte sobre la salut i el medi ambient
- ❖ Forçador climàtic de vida curta

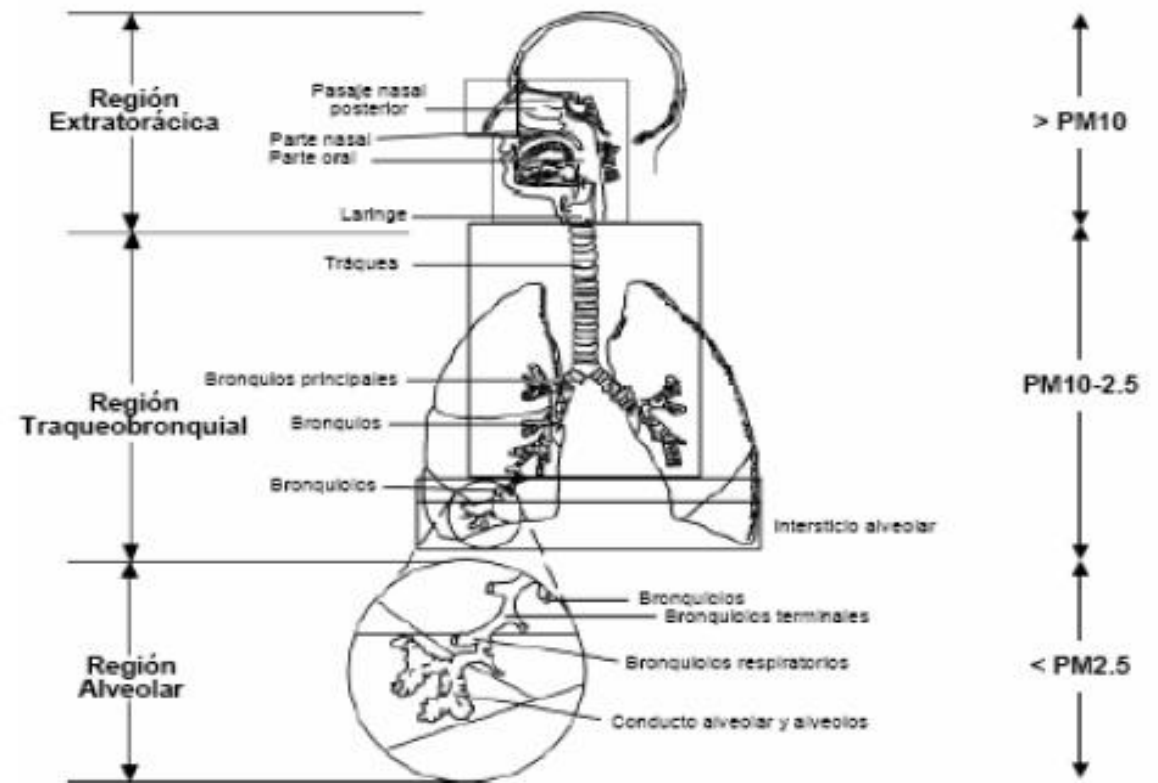


Partícules o aerosols: són petites partícules sòlides i/o líquides suspeses a l'aire amb velocitats terminals negligibles.

PM10: partícules de diàmetre inferior a 10 micròmetres.
PM2.5: partícules de diàmetre inferior a 2.5 micròmetres.
PM1: partícules de diàmetre inferior a 1 micròmetres.

Les partícules inferiors a les 10 μm presenten una important correlació amb l'asma i altres malalties cròniques que obstrueixen les vies respiratòries.

El **benzopirè** (forma part de les PM10 i PM2.5) és un contaminant ambiental molt tòxic que es genera en processos de combustió incompleta i representa un risc greu per a la salut, especialment pel seu potencial cancerigen.



Partícules o aerosols

Química i composició del PM₁₀

- A l'estiu predominen els aerosols secundaris (SOA) biogènics (derivats d'isoprè i α -pineno).
- A l'hivern, sobretot a Manlleu i Bellver, el PM₁₀ està dominat per traces de biomassa.

Els compostos més **tòxics** (PAHs i quinones) s'associen principalment a combustió de biomassa.

Les mostres de **Manlleu i Bellver a l'hivern** van mostrar la **major toxicitat** en cèl·lules pulmonars A549.

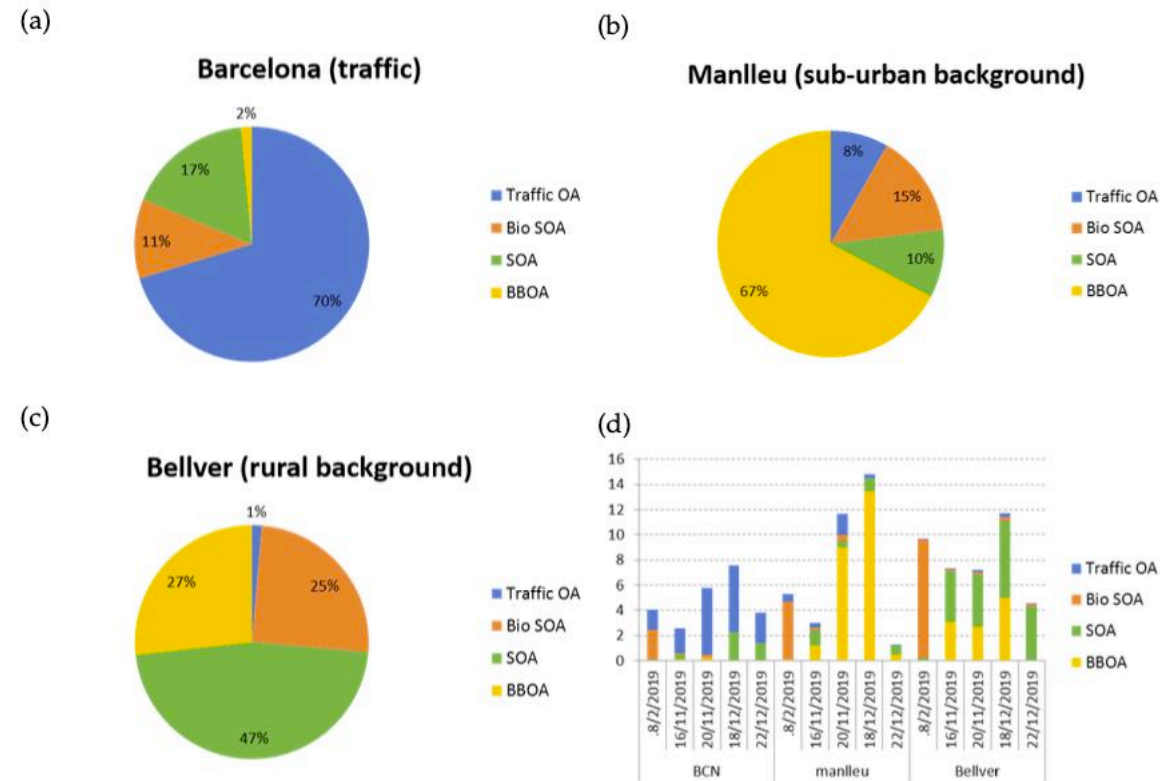


Figure 7. Contributions (a–c) and score values (d) of the four components obtained after MCR-ALS analysis.

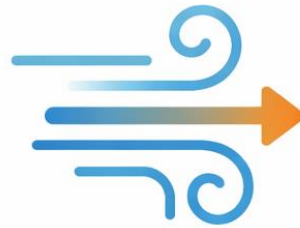
Jaén et al. 2021

Factors meteorològics en la dispersió de contaminants

- Masses d'aire a gran escala
- Vent: velocitat i direcció
- Estratificació tèrmica i estabilitat de l'aire
- Topografia i circulacions associades



Masses d'aire
a gran escala



Vent:
velocitat i
direcció



Estratificació
tèrmica i
estabilitat de l'aire



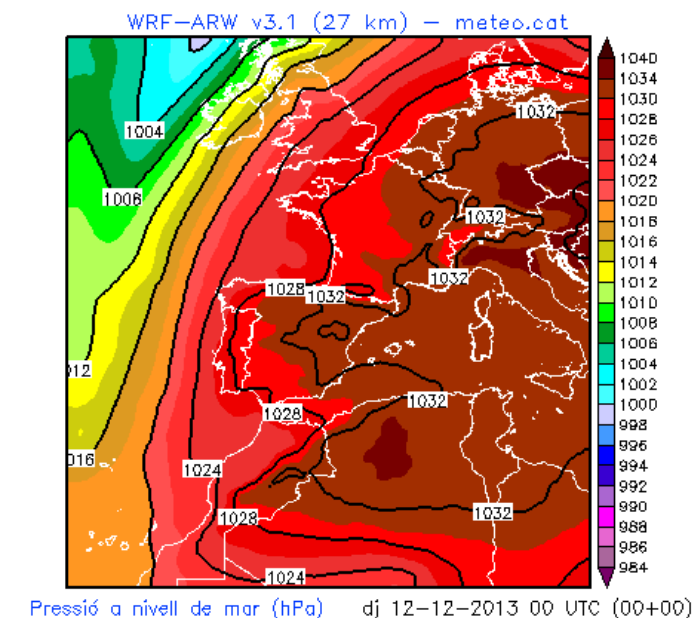
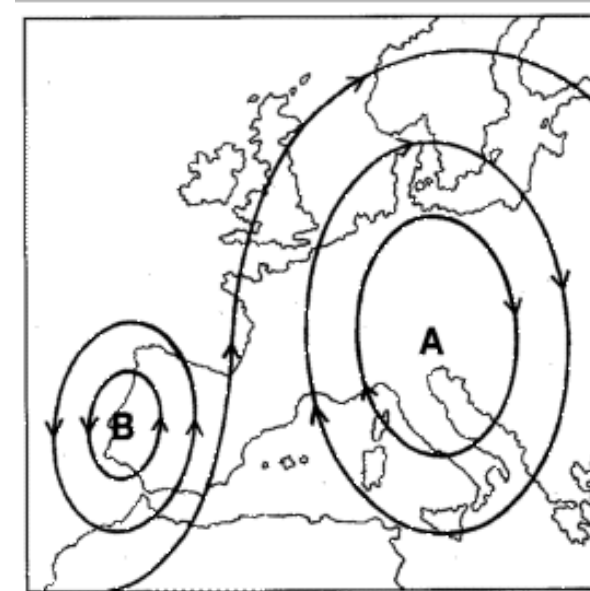
Topografia i
circulacions
associades

Masses d'aire a gran escala

Anticiclons i Borrasques

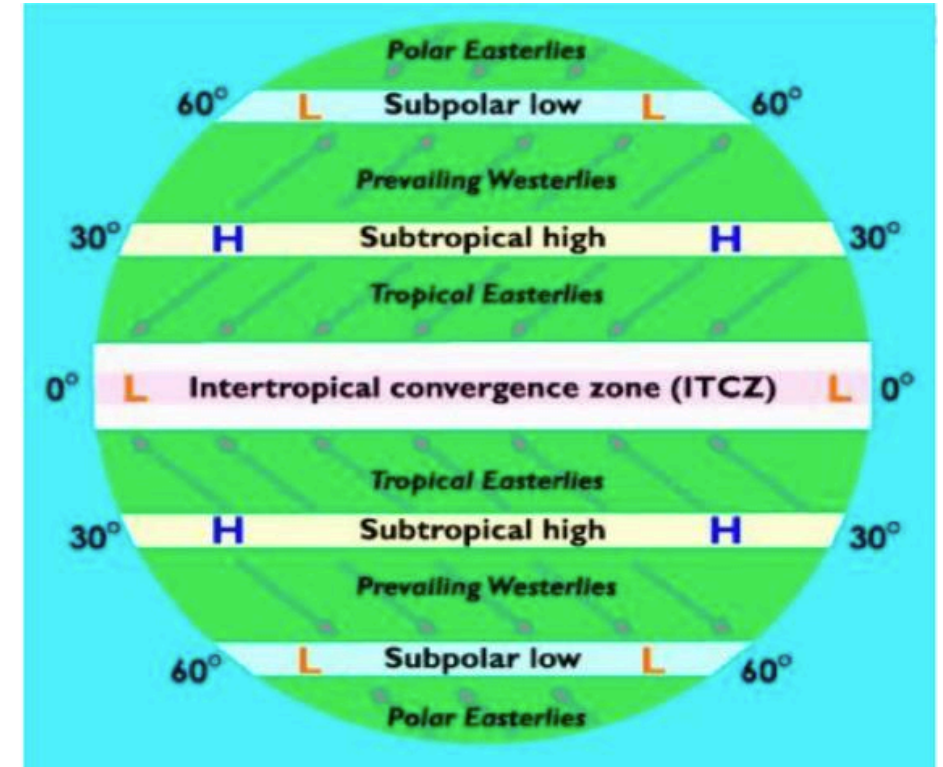
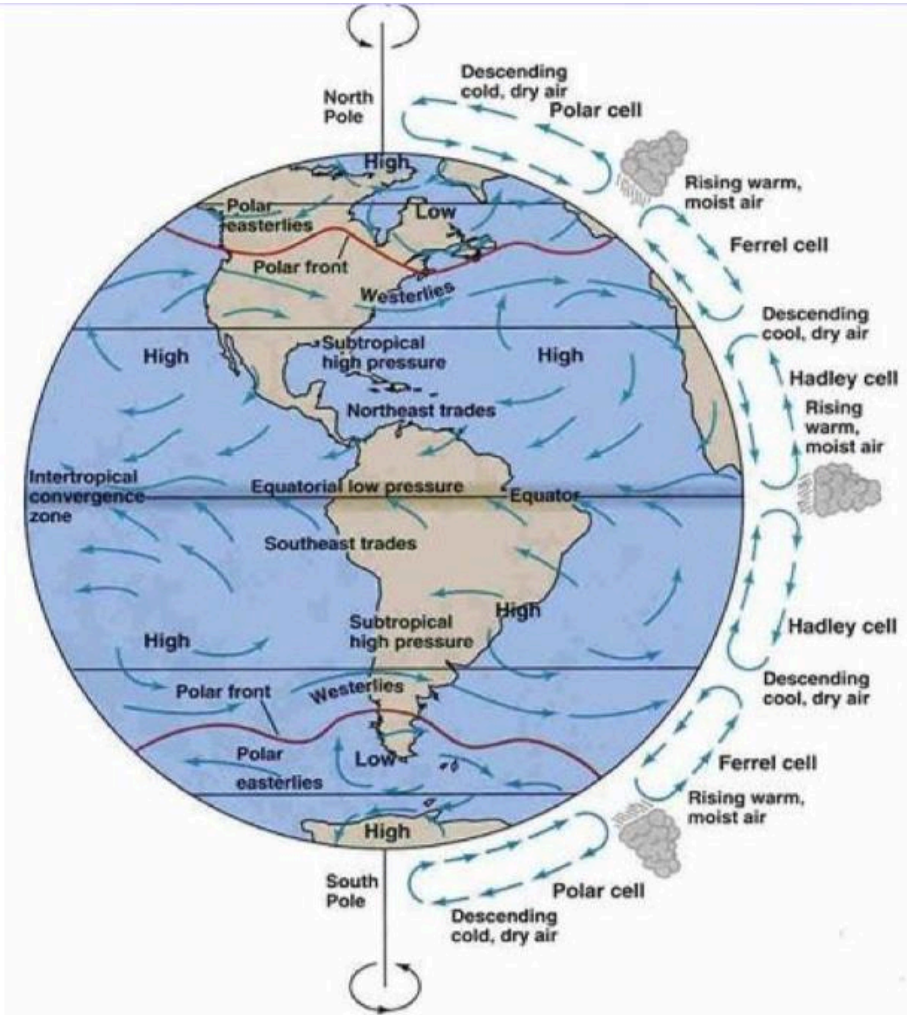
Les zones **d'alt** i **baix** pressions tant siguin del tipus semi permanent o d'origen tèrmic afecten, donades les seves característiques, a la contaminació atmosfèrica.

- **Anticicló:** l'aire tendeix a descendir (moviment subsident). El vent circula en sentit horari al voltant del centre de l'anticicló (hemisferi nord). Les isòbares més separades → **vents més febles**; centre de pressió més alt.
- **Borrasca:** l'aire tendeix a ascendir (formació de núvols i precipitacions). La circulació del vent és en sentit antihorari. Les isòbares més juntes → **vents més intensos**; centre de pressió més baix.



Masses d'aire a gran escala

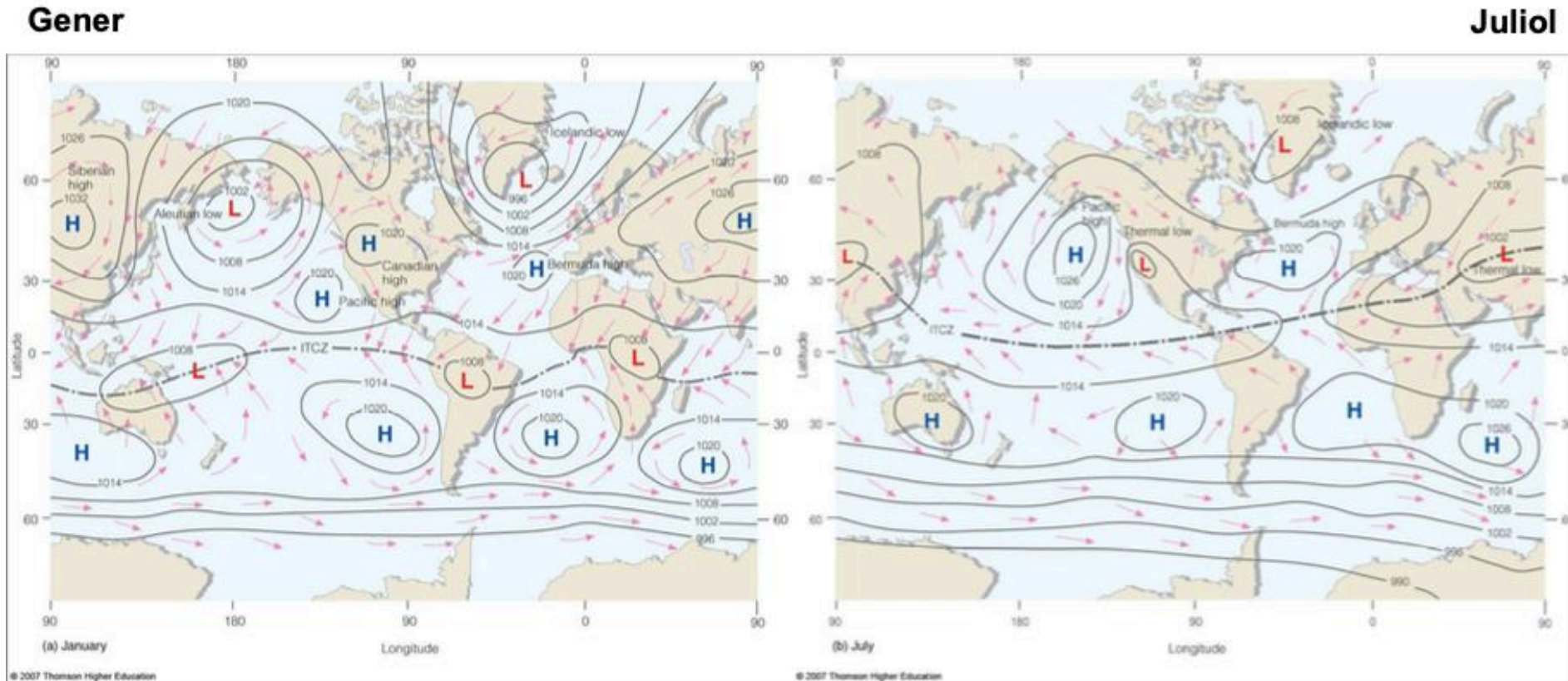
Borrasques i anticiclons semi permanents -> circulació general atmosfèrica



Masses d'aire a gran escala

Borrasques i anticiclons semipermanents -> circulació general atmosfèrica

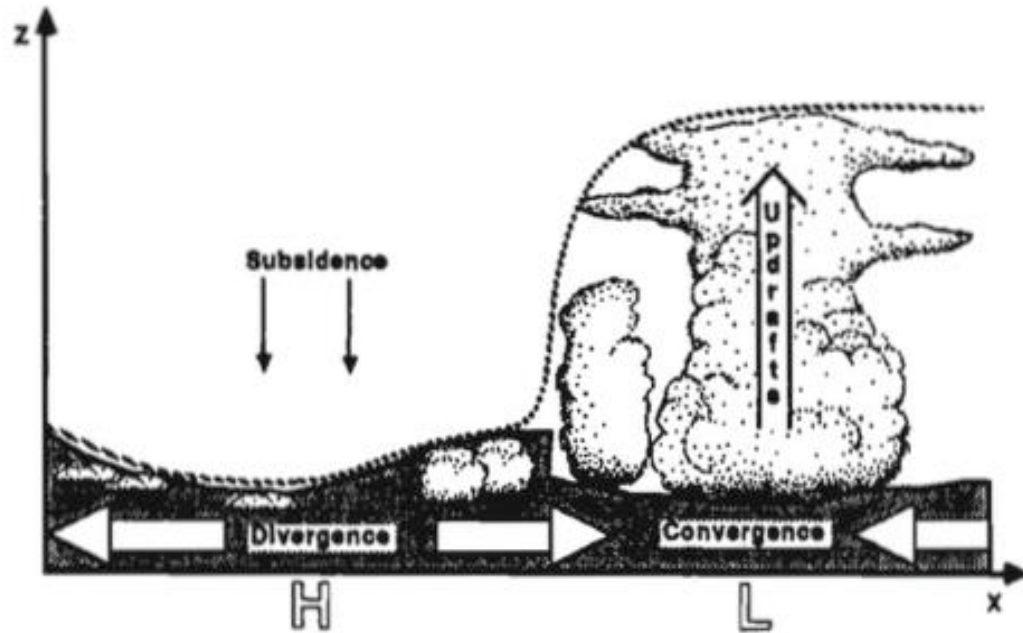
Vents i pressió a nivell del mar



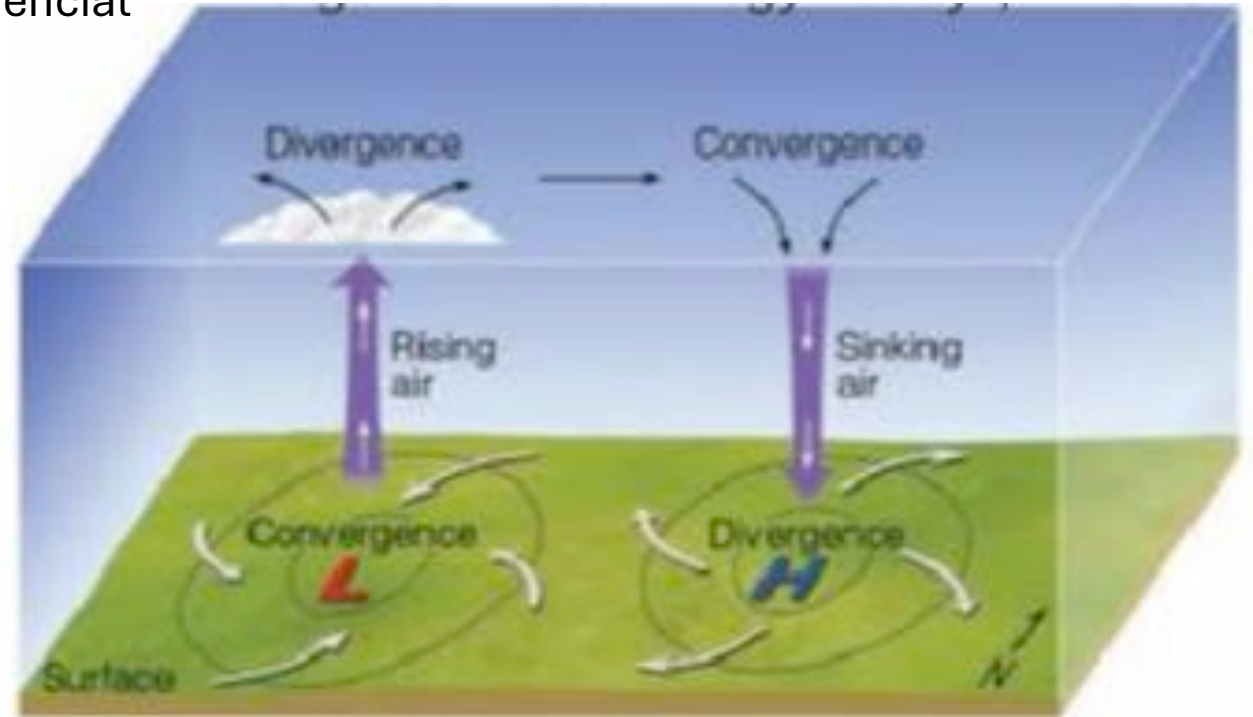
Observem diferències estacionals i hemisfèriques

Masses d'aire a gran escala

Borrasques i anticiclons -> moviment vertical molt diferenciat



Stull, 1988



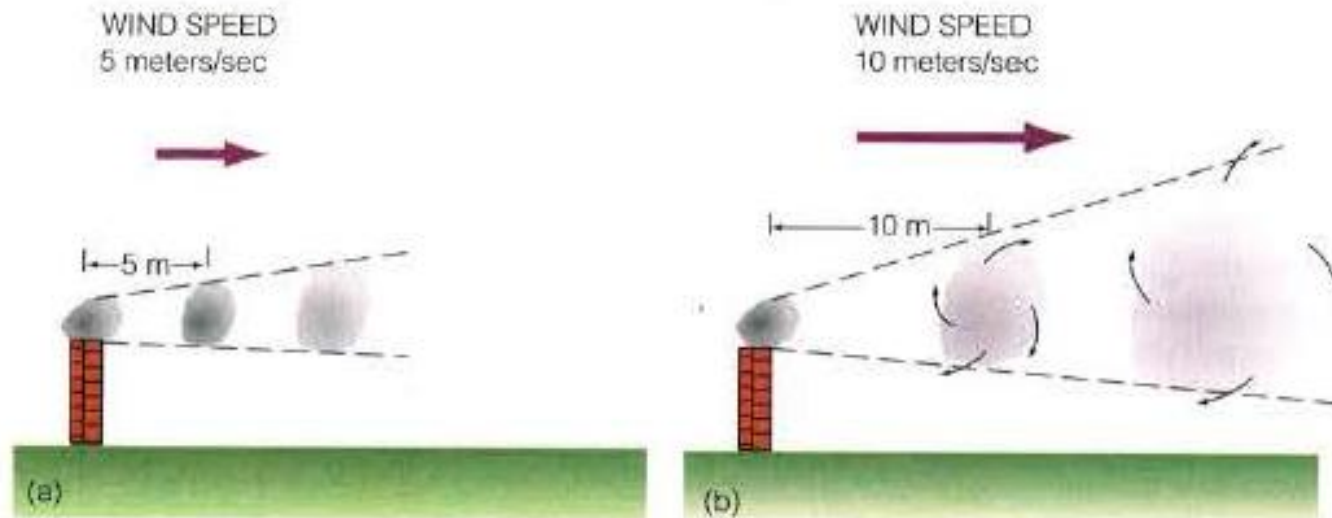
Ahrens, 2015

- Els **anticiclons** provoquen subsidència i dificultat a la l'aire proper a la superfície per desplaçar-se amb la conseqüent acumulació de gasos i partícules.
- Les **borrasques** són regions d'ascensos d'aire, moviments verticals i, per tant, facilitat per a la dispersió de contaminants.

Vent: velocitat i direcció

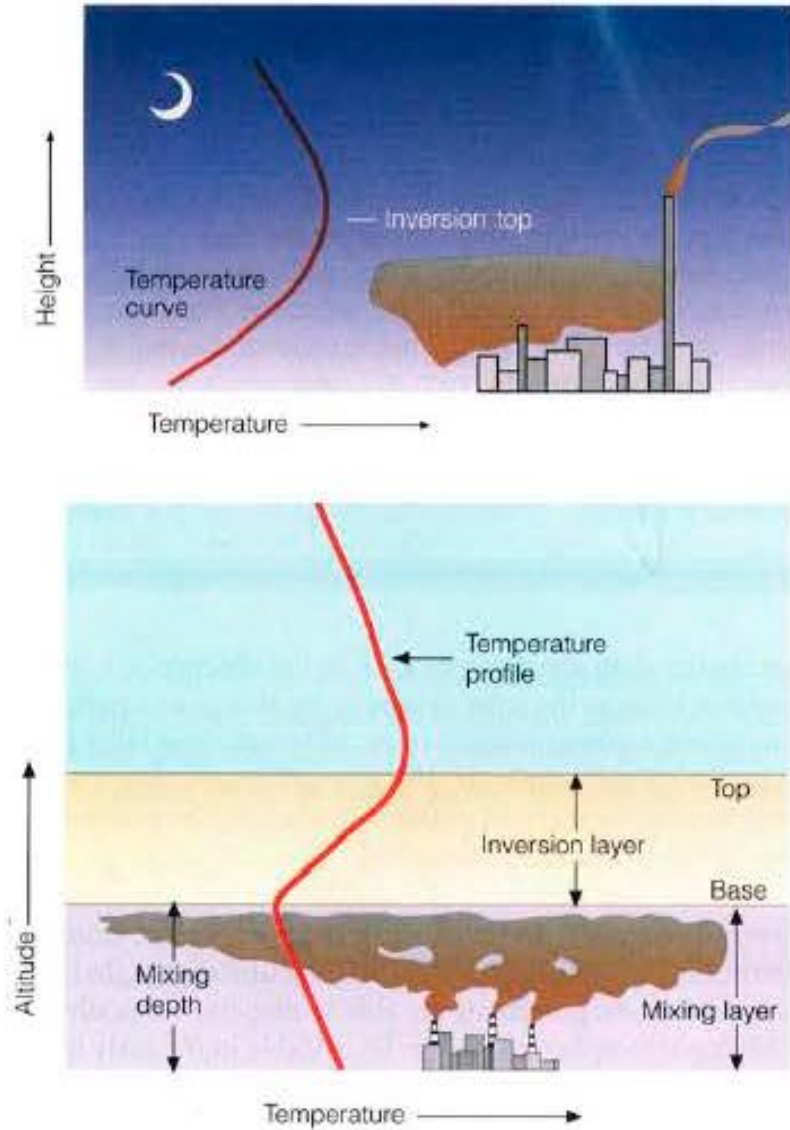
La velocitat i la direcció del vent són factors importants en la dispersió dels contaminants.

- Vent fort → més dispersió. S'afavoreix la **dilució**, perquè barreja gran quantitat d'aire net amb l'aire contaminat.
- Vent feble → **acumulació** dels contaminants. Si el vent és molt suau o gairebé inexistent, els contaminants tendeixen a estancar-se



Estratificació tèrmica i estabilitat de l'aire

Inversions de temperatura



Inversió per radiació
Inversió de subsidència



Fum d'un incendi atrapat per una
inversió de temperatura (Menlo
Park, California, 2001)



Crema de matalassos i altres residus en una planta de tria i reciclatge a Vic

Estratificació tèrmica i estabilitat de l'aire

Formes ideals dels plomalls de contaminants segons l'estratificació tèrmica



Inversió nocturna des de superfície → poca dispersió vertical dels contaminants



Inversió elevada → contaminants atrapats en les capes properes a la superfície



Inversió poc profunda → contaminants es dispersen per sobre la inversió (si la xemeneia està per sobre)

Ahrens, 2015



Estratificació tèrmica i estabilitat de l'aire

Estancament de l'aire i formació de **boires**



Boires de radiació: Nits cel serè es produeix refredament del terra per radiació. L'aire en contacte aporta calor al terra per conducció → l'aire perd calor, es refreda i la pressió de vapor de saturació disminueix i es forma el núvol tocant a terra → boira

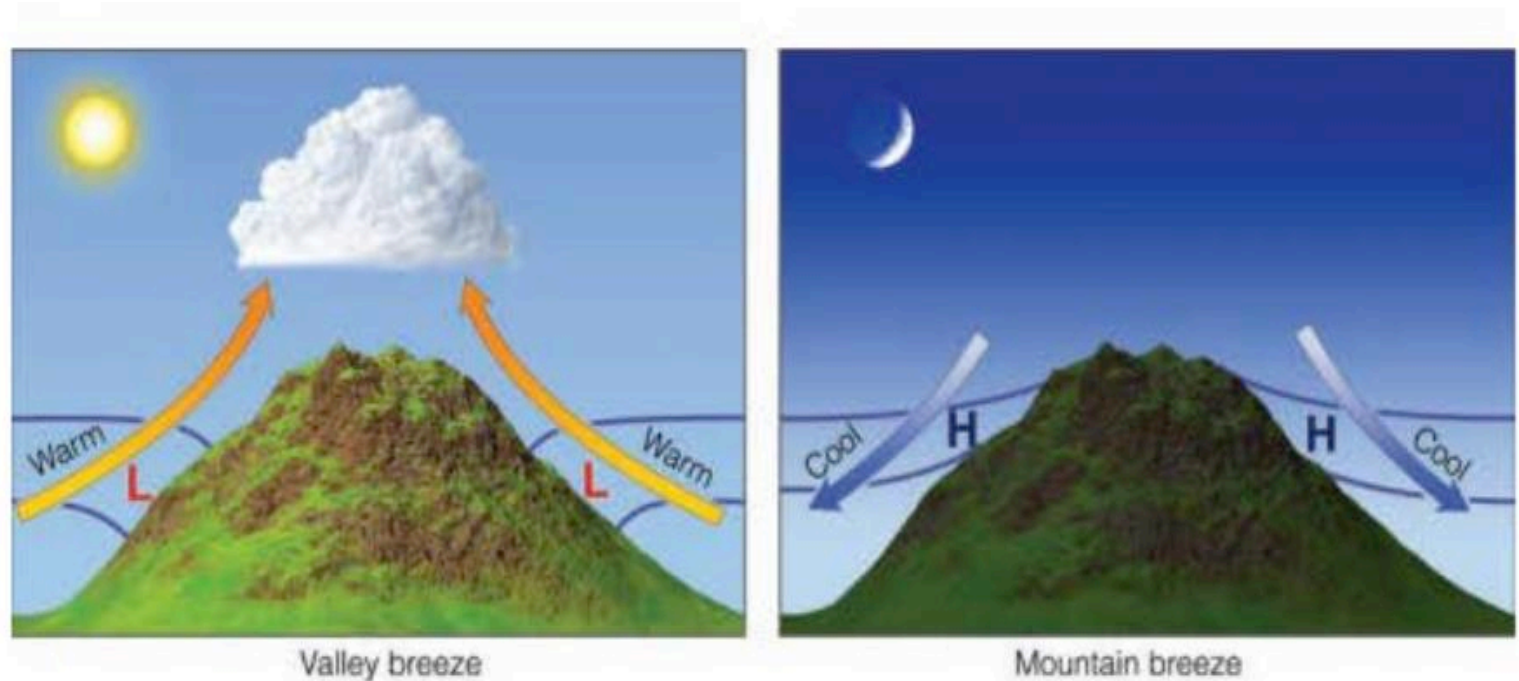


No hi arriba radiació solar a la superfície que pugui afavorir els moviments turbulents de l'aire → s'intensifiquen les inversions de temperatura

Topografia i circulacions associades

Brises orogràfiques

Brises de mar

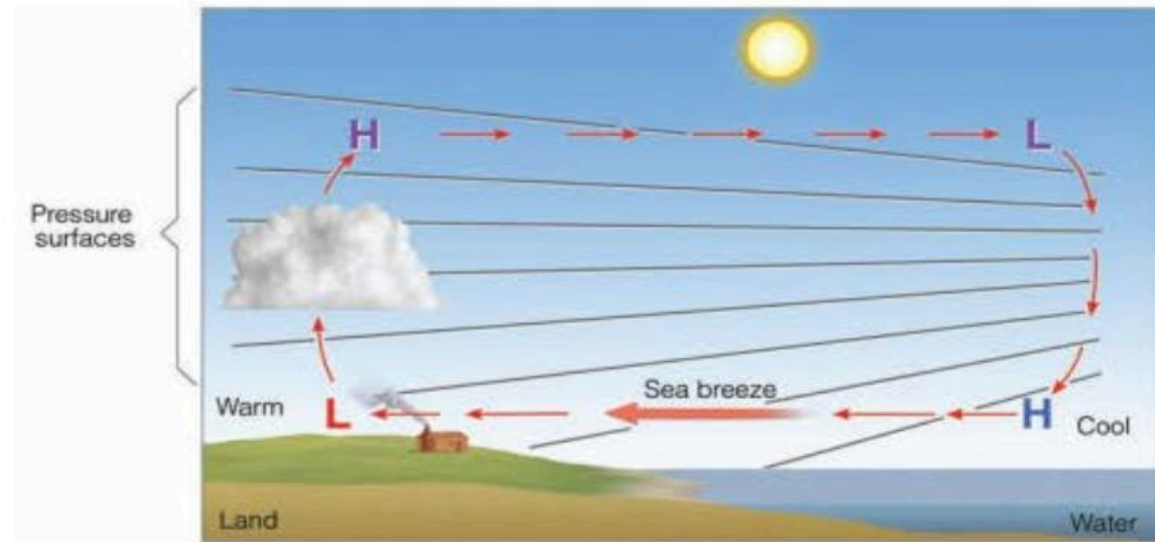


Ahrens, 2015

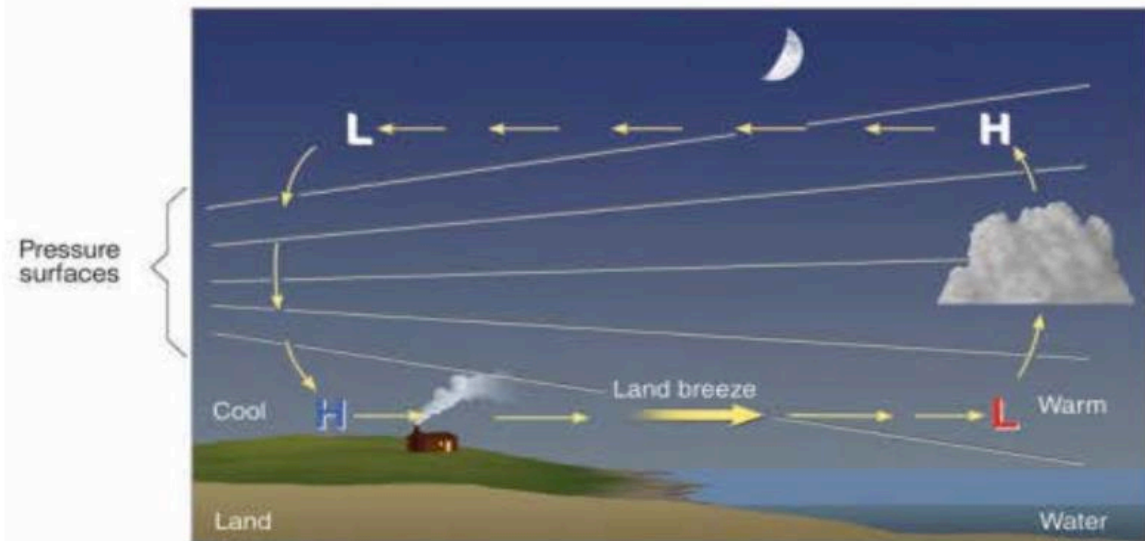
Topografia i circulacions associades

Brises orogràfiques

Brises de mar

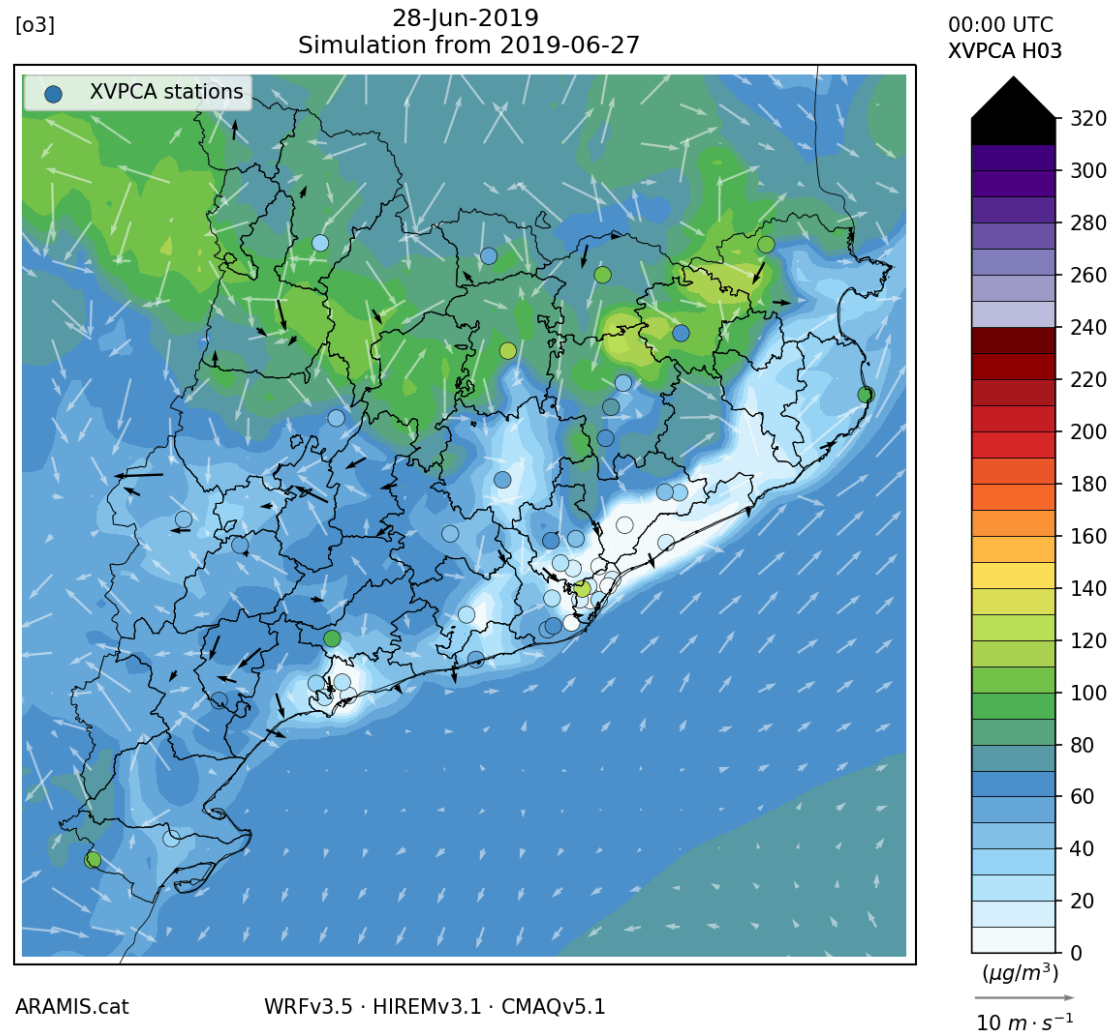


(a) Sea breeze



(b) Land breeze

Exemple d'influència de la brisa



La temperatura catalitza
les reaccions de
formació d'ozó

Història de la legislació sobre Contaminació atmosfèrica

Desembre de 1952 -> Great smog: gran desastre a Londres, més de 4000 morts i 100.000 malalts degut a una situació de contaminació per acumulació d'aire fred + anticicló durant 5 dies seguits.

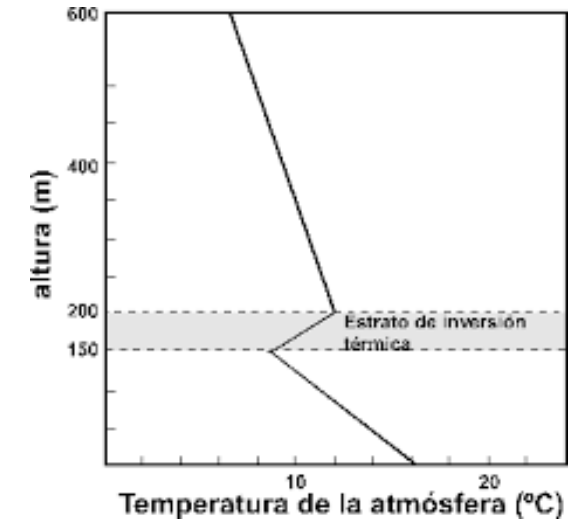
Molt fred: molta combustió de combustibles fòssils de baixa qualitat (amb molt Sulfre -> SO_2)



Legislació parlament anglès: Clean air act 1956

Legislació actual:

Reial Decret 102/2011: marca valors de referència per tots els contaminants



Regulació i legislació de la qualitat de l'aire

Vigent: Reial decret 102/2011, de 28 de gener, relatiu a la millora de la qualitat de l'aire. (Basat en Directiva 2008/50/CE)

Actualment -> **Directive (EU) 2024/2881** de l'European Parliament and of the Council of 23 Octubre 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj/eng>

Principals contaminants inclosos:

- PM_{2.5}
- PM₁₀
- NO₂
- O₃
- SO₂
- CO
- Benzè
- Plom, Cadmi, Niquel
- Benzo (α) pirè (BaP)

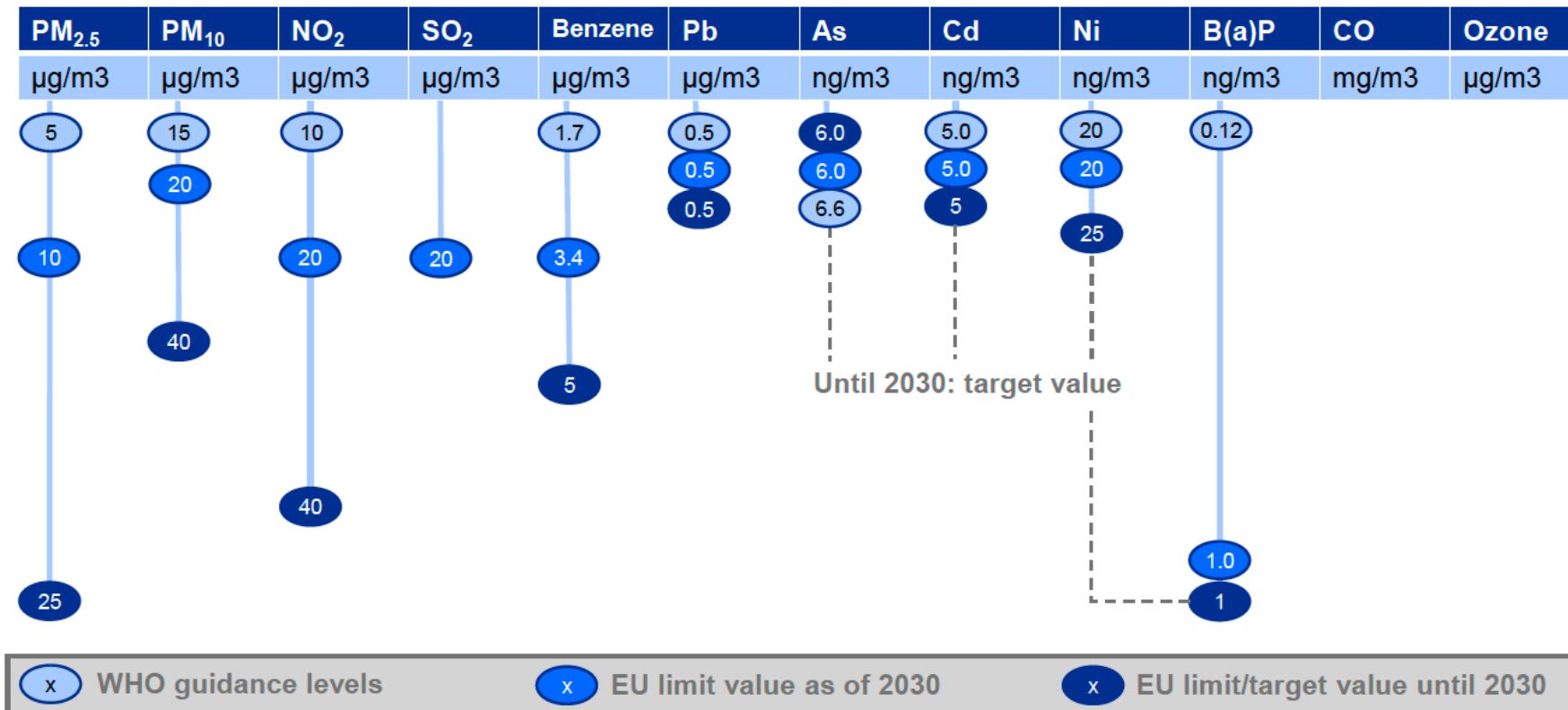


Nou Reial Decret
espanyol , en tràmit

Els **estats membres tenen termini fins al desembre de 2026** per transposar-la al seu dret intern.

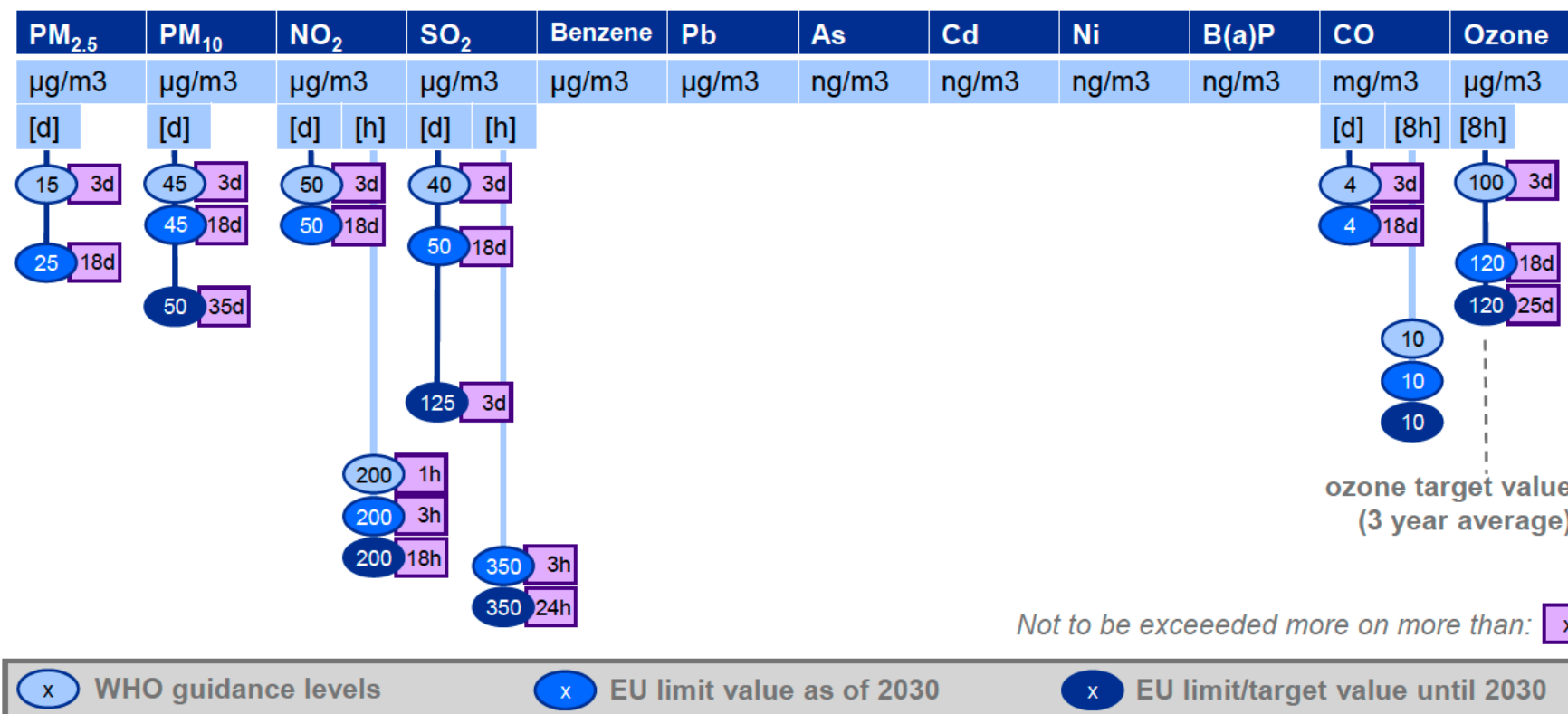
Valors anual

Air quality standards (annual)



Valors diaris, 8-h o horaris

Air quality standards (short term)



Actualment: valors
referència OMS i
objectius fixats per la
nova directiva per al
2030

AQGs -> Air quality guidelines
WHO -> World Health
Organisation

Pollutant	Units	Averaging time	2005 WHO AQGs	2021 WHO AQGs	Directiva 2008	Directiva 2024
PM2.5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	10	5	20	10
		24-h*	25	15	-	25
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	20	15	40	20
		24-h*	50	45	50**	45***
NO ₂	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	40	10	40	20
		24-h*	-	25	-	50***
		1-h	-	-	200	200
O ₃	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	8-h*	100	100	120	120
		Peak season				
SO ₂	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual				20
		24-h	20	40	125	50
		1-h	-	-	350	350
CO	mg/m^3	24-h		4	-	4
		8-h	-	-	10	10

* Percentil 99 (i.e. 3-4 superacions de dies per any)

**not to be exceeded more than 35 times per calendar year

*** not to be exceeded more than 18 times per calendar year

<https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>

https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en

Llindars en la legislació: PM10 i PM2.5

En la legislació actual (Directiva 2008) la Comissió Europea determina llindars:

PM10

- Valor límit diari: **50 $\mu\text{g m}^{-3}$** que no s'hauria de superar més de 35 vegades l'any
- Valor anual: **40 $\mu\text{g m}^{-3}$**

PM2.5

- Valor anual: **25 $\mu\text{g m}^{-3}$**

La OMS al 2021 va proposar nous llindars per a les PM10 i PM2.5:

Pollutant	Averaging period	AQG	RL	Comments
PM ₁₀	1 day	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		99th percentile (3-4 exceedance days per year). Updated 2021 guideline
	Calendar year	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		Updated 2021 guideline
PM _{2.5}	1 day	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		99th percentile (3-4 exceedance days per year). Updated 2021 guideline
	Calendar year	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		Updated 2021 guideline

<https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022/world-health-organization-who-air>

La nova legislació (Directiva 2024) de qualitat de l'aire EU 2024/2881 determina (objectiu 2030):

PM10

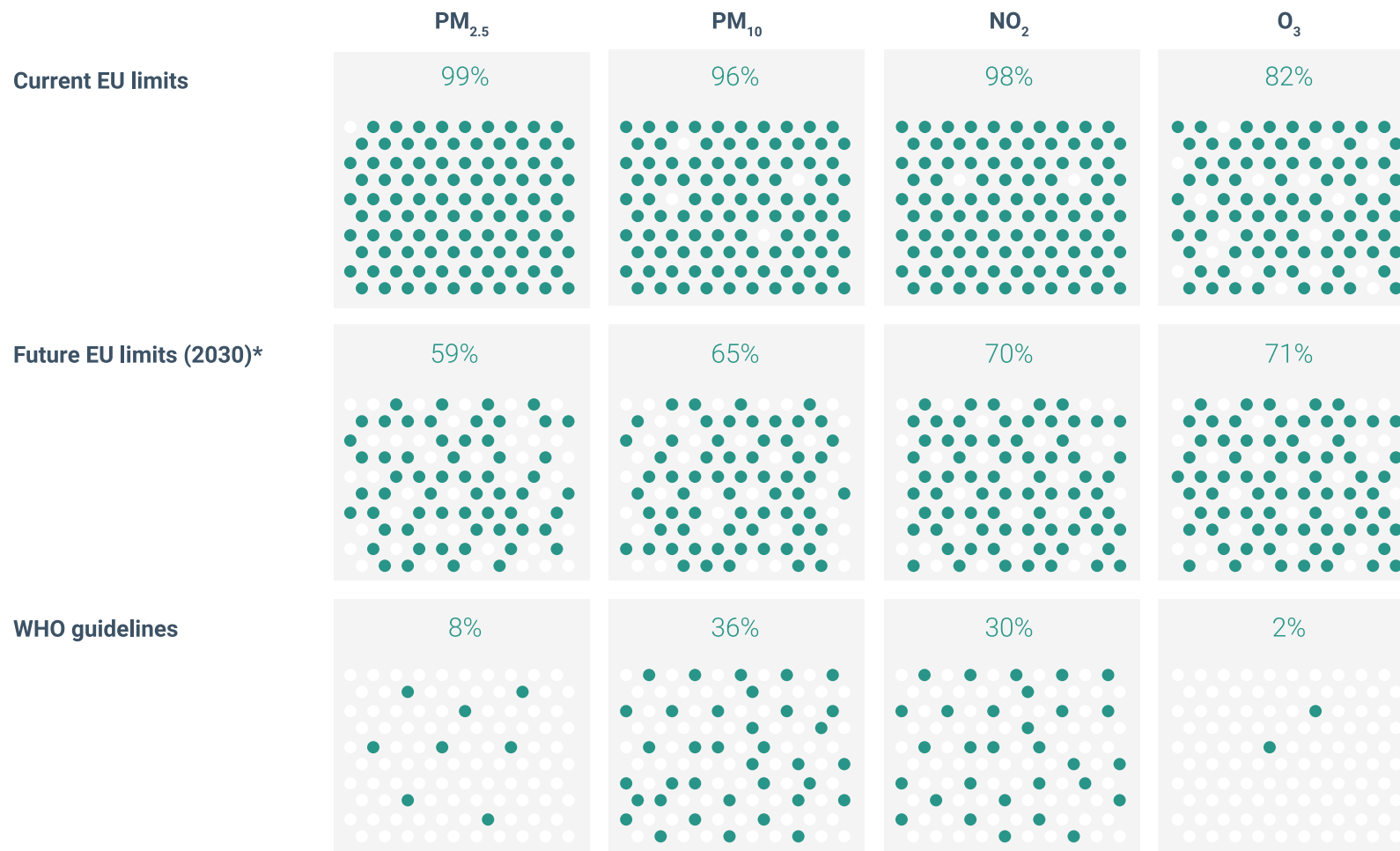
- Valor límit diari : **45 $\mu\text{g m}^{-3}$** que no s'hauria de superar més de 18 vegades l'any
- Valor anual: **20 $\mu\text{g m}^{-3}$**

PM2.5

- Valor límit diari : **25 $\mu\text{g m}^{-3}$** que no s'hauria de superar més de 18 vegades l'any
- Valor anual: **10 $\mu\text{g m}^{-3}$**

Informe Qualitat de l'Aire EEA

Percentage of monitoring locations in 2023 achieving air quality limit/guideline values



*The 2030 limit values are presented for comparative purposes only to show the distance to target to achieve these limits by 2030.

NO₂

Taula 3: Valors guia recomanats per la Guia Global de Qualitat de l'Aire de l'OMS de l'any 2021.

Contaminant	Temps d'avaluació	Interim 1	Interim 2	Interim 3	Interim 4	Valor guia
NO ₂ (µg/m ³)	1 any civil	40	30	20	-	10
	24 hores ^(a)	120	50	-	-	25
	1 hora	-	-	-	-	200

(a) S'avalua el percentil 99, és a dir, entre 3 i 4 dies de superació per any civil.

Taula 4: Punts de mesurament que incompleixen els valors guia recomanats de l'OMS en l'avaluació anual del diòxid de nitrogen

Contaminant i període d'avaluació	Nom	Valor	Percentatge de punts de mesurament que incompleixen el valor guia
NO₂ – Mitjana anual	Íterim 1	40 µg/m ³	0% (0 punts de mesurament)
	Íterim 2	30 µg/m ³	2% (1 punts de mesurament)
	Íterim 3	20 µg/m ³	31% (20 punts de mesurament)
	Nivell de qualitat de l'aire de la guia	10 µg/m ³	71% (46 punts de mesurament)
NO ₂ – 24 hores ^(a)	Íterim 1	120 µg/m ³	0% (0 punts de mesurament)
	Íterim 2	50 µg/m ³	22% (14 punts de mesurament)
	Nivell de qualitat de l'aire de la guia	25 µg/m ³	74% (48 punts de mesurament)
NO ₂ – 1 hora	Nivell de qualitat de l'aire de la guia	200 µg/m ³	0% (0 punts de mesurament)

(a) S'avalua el percentil 99, és a dir, entre 3 i 4 dies de superació per any civil. S'ha considerat 4 dies amb superació del valor de referència corresponent pel comptatge de punts de mesurament amb superació.

MOLTES GRÀCIES PER LA VOSTRA ATENCIÓ

Contaminació atmosfèrica: factors, legislació i salut

Barcelona, 21 de març de 2026



XXXI METEOCAT 2026

METEOROLOGIA, CLIMA I SALUT

21 de març de 2026

Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Mireia Udina Sistach

Professora Lectora. Grup Meteorologia. Departament de Física Aplicada. Universitat de Barcelona