

MÓDULO: CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

CONTENIDOS

1	<u>ALGUNOS CONCEPTOS INTRODUCTORIOS</u>	3
1.1	GENERALIDADES	3
1.2	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA	3
1.3	ESTRUCTURA VERTICAL DE LA ATMÓSFERA	3
1.4	ESTABILIDAD E INESTABILIDAD ATMOSFÉRICAS	4
1.5	INVERSIONES LOCALES DE TEMPERATURA	7
2	<u>FUENTES DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES A LA ATMÓSFERA</u>	9
2.1	EMISIÓN E INMISIÓN	9
2.2	CLASIFICACIÓN DE FUENTES DE EMISIÓN	9
2.3	PRINCIPALES SECTORES EMISORES EN URUGUAY	10
3	<u>CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES</u>	11
3.1	CLASIFICACIÓN POR EL MOMENTO EN QUE SE GENERAN	10
3.2	PRESENTACIÓN FÍSICA DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	11
4	<u>CONTAMINANTES CRITERIO</u>	12
4.1	MONÓXIDO DE CARBONO CO	13
4.2	DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂)	14
4.3	ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO _x)	15
4.4	OZONO (O ₃)	17
4.5	PARTÍCULAS INHALABLES PM ₁₀ (DIÁMETRO INFERIOR A 10 MM)	18
5	<u>OTROS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS</u>	20
5.1	DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)	20
5.2	ÁCIDO SULFÚDRICO (H ₂ S)	20
5.3	ÓXIDO NITROSO (N ₂ O)	20
5.4	COMPUESTOS ORGÁNICOS	20
5.5	PAN	22
5.6	COMPUESTOS CLOROFLUOROCARBONADOS CFC	22
5.7	METALES	23
5.8	AGENTES BIOLÓGICOS	25
6	<u>EMISIONES A LA ATMÓSFERA</u>	25

6.1	MÉTODOS DE DISPERSIÓN	25
6.2	FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN LA EVOLUCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA	26
6.3	DESCARGA DE FUENTES PUNTUALES. PLUMAS O PENACHOS.	27
6.4	MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA	29
7	<u>NORMATIVA.....</u>	34
7.1	ASPECTOS GENERALES	34
7.2	DECRETO 135/021	35
8	<u>ÍNDICES DE CALIDAD DEL AIRE.....</u>	39
8.1	APLICACIONES	39
8.2	EL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE DE MONTEVIDEO ICAIRE	40
9	<u>CONTAMINACIÓN URBANA.....</u>	42
9.1	ESMOG ÁCIDO Y ESMOG FOTOQUÍMICO	42
9.2	REACCIONES FOTOQUÍMICAS.....	43
9.3	EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS PROCESOS DE ESMOG FOTOQUÍMICO	45
9.4	MEDIDAS DE GESTIÓN PARA ATENUAR LAS CONSECUENCIAS ADVERSAS DE LOS PROCESOS DE ESMOG FOTOQUÍMICO	46
10	<u>PROBLEMAS REGIONALES DE CONTAMINACIÓN DE AIRE: LLUVIA ÁCIDA.....</u>	47
10.1	GENERALIDADES	47
10.2	CAUSAS ANTROPOGÉNICAS DE LA LLUVIA ÁCIDA	48
10.3	CONSECUENCIAS DE LA LLUVIA Y DEPOSICIÓN ÁCIDAS	50
10.4	MEDIDAS DE GESTIÓN	57
11	<u>CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE</u>	58
11.1	ASPECTOS GENERALES	58
11.2	SITUACIÓN DURANTE LA PANDEMIA DE SARS-CoV2	61
12	<u>CONTROL DE EMISIONES DE CONTAMINANTES QUÍMICOS A LA ATMÓSFERA.....</u>	62
12.1	RECOMENDACIONES GENERALES	62
12.2	SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIÓN DE PARTÍCULAS	63
12.3	SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIÓN DE GASES	66
	<u>BIBLIOGRAFÍA BÁSICA</u>	67
	<u>ANEXO: DECRETO Nº 135/021: REGLAMENTO DE CALIDAD DEL AIRE</u>	68

1 Algunos conceptos introductorios

1.1 Generalidades

Se designa como *atmósfera* la capa de gases y partículas asociadas que envuelve a un planeta. En el caso de la Tierra, se trata de una atmósfera poco densa. En los primeros 100 km de altura desde la faz de la Tierra, se verifica que:

- Queda comprendido el 99,99 % de la masa total de la atmósfera, que se estima en $5,6 \times 10^{25}$ toneladas.
- La densidad decae exponencialmente con la altura y tiene un valor medio a nivel del mar de $1,20 \text{ kg/m}^3$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y de $1,29 \text{ kg/m}^3$ a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (valores para humedad relativa del 70 %).
- La presión decae exponencialmente con la altura y tiene un valor a nivel del mar de $1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ (= $1013 \text{ hPa} = 0,1 \text{ MPa} = 1 \text{ atm}$).
- Sus principales componentes se encuentran mezclados en forma homogénea y en proporciones más o menos constantes; por eso, este tramo de la atmósfera recibe el nombre de *homósfera*.

1.2 Composición química de la atmósfera

La composición de la atmósfera ha variado a través de la historia de la Tierra, y lo sigue haciendo. Se puede hablar de gases que participan en su composición en **proporciones fijas**, y de otros cuya presencia se da en **proporciones variables**. En la Tabla 1-1 se presentan las proporciones volumétricas en que se encuentran los principales gases que componen la atmósfera.

Tabla 1-1 Composición química de la atmósfera (en términos volumétricos)

Gases en proporciones fijas	N ₂	78,084 %
	O ₂	20,95 %
	Ar	0,934 %
	Ne	18,18 ppmV
	He	5,24 ppmV
	Kr	1,14 ppmV
	Xe	0,087 ppmV
Gases en proporciones variables	CO ₂	421 ppmV Fluctuación anual: 1 %; crecimiento anual estimado: 4 ppmV
		0,04 % máximo (trópico)
	H ₂ O	0,00001 % mínimo (polos)

ppmV = partes por millón volumétricas

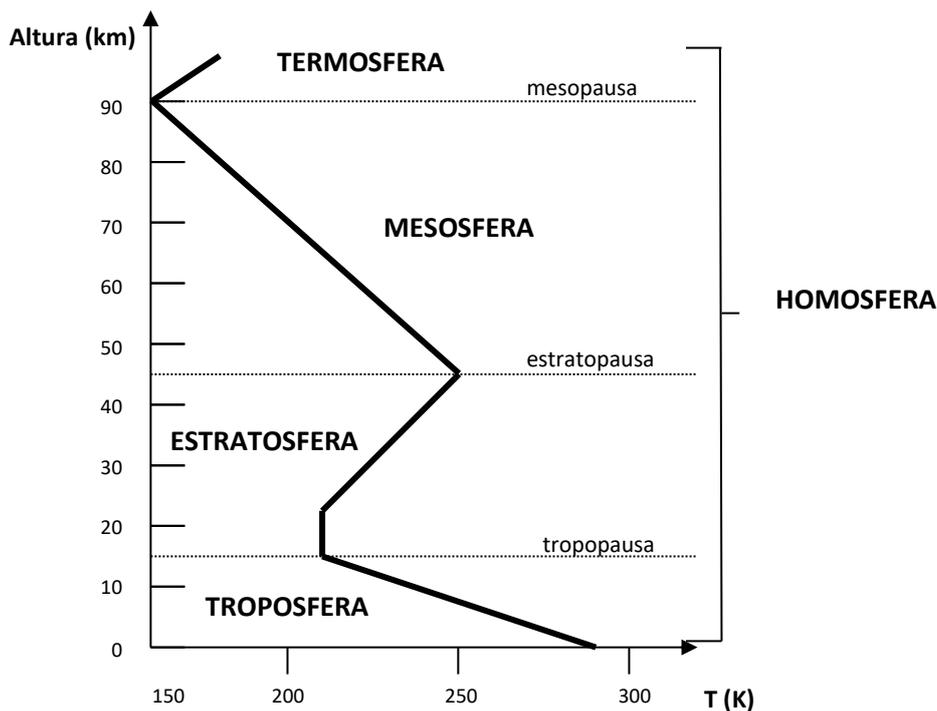
1.3 Estructura vertical de la atmósfera

La estructura vertical de la atmósfera se vincula directamente con la variación de la temperatura con la altura. La expresión $T = T(z)$ recibe el nombre de *curva de estado*. En altura alternan capas en las que la temperatura desciende al aumentar la altura (las que se designan como capas inestables o capas de mezcla) y otras en las que ocurre lo contrario (capas estables). Si bien los conceptos de *estabilidad* e *inestabilidad* se discuten en la próxima sección, conviene adelantar que las capas inestables son aquellas en que la temperatura disminuye al aumentar la altura, mientras que en las capas extremadamente

estables sucede lo contrario. En la Figura 1-1 se esquematiza la estructura vertical de la atmósfera; en la Tabla 1-2, se brinda una breve información acerca de cada una de las capas que integran la homósfera. Así, es de utilidad definir el **gradiente atmosférico** $\Gamma_{AMB} = (-dT/dz)_{AMB}$ como el opuesto de la variación de la temperatura de la atmósfera en función de la altura. El hecho de que se considere el opuesto del valor de la variación de la temperatura con la altura implica que lo esperable en la tropósfera es que la temperatura descienda al aumentar la altura sobre la faz de la tierra. Este perfil vertical podría medirse, por ejemplo, con un termómetro que se elevara con un globo aerostático.

Tabla 1-2 Estructura vertical de la atmósfera

	Altura máxima aprox. desde la faz de la Tierra	Delimitación en altura	Condición de Estabilidad	Observaciones
Tropósfera	12 km - 15 km	Desde la faz de la Tierra hasta la tropopausa	Capa de mezcla	Es la zona en la que se desarrolla la vida. Contiene aproximadamente el 90 % de la masa total de la atmósfera.
Estratósfera	45 km	Desde la tropopausa hasta la estratopausa	Inversión térmica	En esta capa se encuentra la capa de ozono, responsable de la filtración de radiaciones UV.
Mesósfera	90 km	Desde la estratopausa hasta la mesopausa	Capa de mezcla	Contiene menos del 1 % de la masa total de la atmósfera.
Termósfera	600 km	Desde la mesopausa hasta la termopausa	Inversión térmica	Se considera la última de las capas constitutivas de la homósfera.



Nota: los valores de temperatura son meramente indicativos

Figura 1-1 Estructura vertical de la atmósfera. Redibujado de: Programa de Evaluación de la Calidad del Aire aplicado a la República Oriental del Uruguay, 2000.

Si se amplía el gráfico anterior para observar más detalladamente lo que ocurre en la base de la tropósfera, podría verse que, a nivel local, la curva de estado va variando tanto en el tiempo como en el espacio, debido a efectos topográficos locales, patrones de circulación de aire, etc. Eso hace que, a lo largo del día, varíen las condiciones para la dispersión de contaminantes en la atmósfera al variar las **condiciones de estabilidad**.

1.4 Estabilidad e inestabilidad atmosféricas

1.4.1 Teoría de la Parcela

En esta sección se presentan los conceptos de **estabilidad** e **inestabilidad** atmosféricas, empleando una aproximación usual a los conceptos termodinámicos involucrados desde lo que se conoce como “*teoría de la parcela*”. A través de ella se discute el comportamiento de una parcela de aire que originalmente se sitúa a una cierta altura en la atmósfera, rodeada por aire con cierta presión y temperatura.

Sea, entonces, una parcela de aire con propiedades uniformes en su interior y cuya presión interna es igual a la presión externa en todo momento (Figura 1-2). Esta parcela tiene permitidos movimientos verticales **adiabáticos**, es decir, en los que no intercambia calor con el exterior.

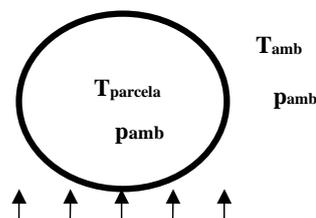


Figura 1-2 Parcela (elaboración propia)

Si la parcela de aire sufre, por algún motivo, un **movimiento ascendente**, ésta aumentará su volumen al encontrarse con una atmósfera a menor presión. La pérdida de energía interna consumida en el trabajo de **expansión** causará una **disminución de su temperatura**. Si la parcela contiene vapor de agua en su interior, parte de éste se condensará al disminuir la temperatura y liberará calor; en tal caso la disminución de la temperatura no será tan pronunciada. En cambio, si la parcela de aire sufre un **movimiento descendente**, ésta se comprimirá al encontrarse con una atmósfera a mayor presión. El trabajo de **compresión** realizado por el ambiente sobre ella produce un **aumento en la temperatura** interna de la parcela.

1.4.2 Estabilidad e inestabilidad absolutas

Sea Γ el gradiente de temperatura de la parcela en la dirección vertical. Dependiendo de su contenido de humedad, los valores absolutos de Γ están acotados entre $6,5 \text{ }^\circ\text{C/km}$ (parcela absolutamente saturada de humedad) y $10 \text{ }^\circ\text{C/km}$ (parcela absolutamente seca). Estos valores consideran el calor necesario para vaporizar la humedad, lo que hace que la variación de temperatura sea mayor cuando la parcela está absolutamente seca.

Al imponer que la parcela se mantenga a igual presión que el medio exterior, si ésta se enfría más rápido que la atmósfera circundante a medida que se eleva, entonces llegará una altura a la que estará más fría que el aire a su alrededor; en esa situación, tenderá a bajar. Recíprocamente, si la parcela baja, estará más caliente que el aire que la circunda y eso hará que tienda a subir. En este caso los movimientos verticales de la parcela están restringidos: cualquier desplazamiento desde la posición inicial anticipa un regreso a ella. Aunque no se conozca el contenido de humedad de la parcela, si el valor absoluto de Γ_{AMB} es menor que el menor de los valores posibles de Γ , cualquier parcela tenderá a volver a su posición inicial; lo mismo ocurriría si Γ_{AMB} cambiara de signo (es decir, si la temperatura ambiente se incrementara al alejarse de la superficie terrestre). En este caso **cualquier parcela** liberada

a la atmósfera **tenderá a regresar a su posición inicial**. Se dice entonces que la **atmósfera es absolutamente estable**.

Por el contrario, si el valor absoluto de Γ_{AMB} es superior al mayor de los valores posibles de Γ , los movimientos verticales de la parcela no estarán restringidos: **cualquier desplazamiento** desde la posición inicial **redunda en un desplazamiento aún mayor**. En este caso, la atmósfera resultará ser **absolutamente inestable**. La parcela siempre se enfriará más lentamente que la atmósfera circundante a medida que se eleve, por lo que, a partir de cierta altura, estará más caliente y seguirá subiendo sin restricciones. Recíprocamente ocurrirá si comenzara a bajar. En resumen, se tienen los siguientes casos posibles (Figura 1-3):

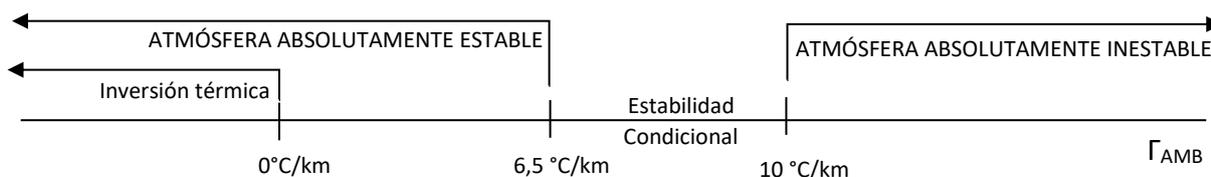


Figura 1-3 Estados de la atmósfera, según valores teóricos de Γ_{AMB} .

Las condiciones de estabilidad e inestabilidad atmosférica varían a lo largo de las 24 horas del día (Figura 1-4), por lo que no existe una única condición a tener en cuenta en el estudio de los fenómenos de contaminación atmosférica.

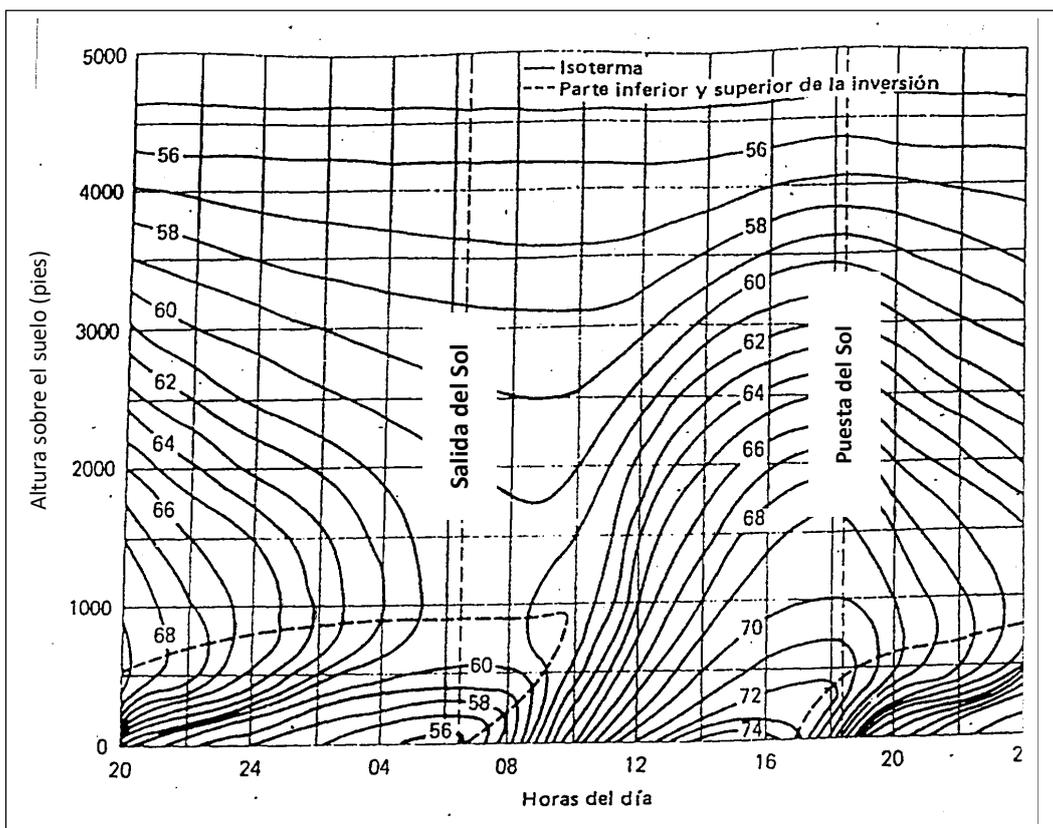


Figura 1-4 Variación del perfil vertical de temperaturas en función de la hora del día (adaptado de Wark and Warner, 1990)

En los diagramas de la Figura 1-5 se muestran perfiles verticales obtenidos a diferentes horas del día a partir de la Figura 1-4.

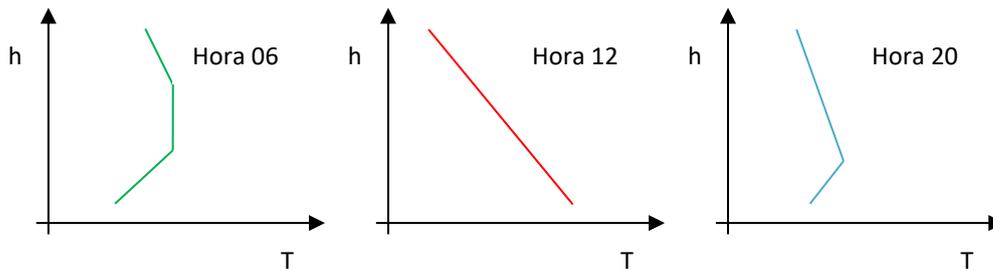


Figura 1-5 Perfiles verticales de temperaturas en función de la hora del día (esquematisados a partir de Figura 1-4)

1.5 Inversiones locales de temperatura

En función de la variación de la temperatura con la altura, se dice que se está ante una **inversión térmica** cuando la temperatura se incrementa al alejarse de la superficie terrestre. En general, una **inversión térmica** o **inversión de temperatura** ocurre cuando una masa de aire frío está vertical y superiormente limitada por una masa de aire caliente (Figura 1-6).

Existen fenómenos locales -orográficos, meteorológicos, etc.- susceptibles de producir fenómenos de inversión de temperatura con carácter local. Dos de los casos más típicos de inversión local de temperaturas son la inversión marina y la inversión por radiación.

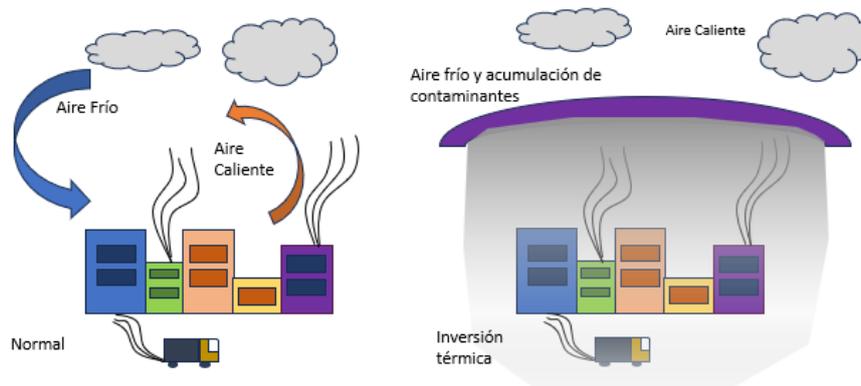


Figura 1-6 Inversión térmica (redibujado de <https://www.goconqr.com/en/p/550369-inversi-n-t-rmica---ciencias-de-la-tierra-notes>)

1.5.1 Inversión marina

Ocurre en las proximidades de las grandes masas de agua. Al comenzar el ciclo diario de calentamiento-enfriamiento de tierra y mar, el aire que se encuentra en contacto con este último está a mayor temperatura que el que yace sobre la tierra. Pero al calentarse la faz de la misma, se calienta también el aire que la envuelve y esa masa gaseosa caliente tiende a elevarse. El sitio que antes ocupaba el aire que se eleva es llenado ahora por aire oceánico más frío, que a su turno se calentará y también se elevará. Esto ocurre a lo largo del día, haciendo que el viento sople del mar a la tierra para “reponer” el aire más caliente que se eleva.

Al caer la tarde, llegará un momento en que el aire sobre la tierra no logrará calentarse lo suficiente como para subir y quedará atrapado bajo una masa superior de aire más caliente, dando lugar a lo que se designa como *inversión marina*. También puede invertirse el sentido del viento y pasar a soplar de tierra a mar. Este cambio de sentido es lo que usualmente se designa como “virazón”.



Figura 1-7 Inversión térmica marina (redibujado de <http://meted.ucar.edu/> de COMET® de la University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) ©1997-2015)

1.5.2 Inversión por radiación

Ocurre en valles y zonas bajas en general rodeadas por elevaciones, que modifican los patrones naturales de circulación del aire. El aire “encerrado” sobre el valle tarda más en enfriarse por la noche que el que se encuentra en las zonas elevadas. Cuando se inicia el ascenso de las masas de aire caliente desde la zona más baja, el espacio que estaban ocupando resulta llenado por masas de aire frío que se deslizan desde la zona elevada y que, una vez allí, no pueden escapar hasta que se inicie un nuevo ciclo diario de calentamiento. Cuando en el valle hay fuentes de emisión de contaminantes (Figura 1-8), la dispersión de los mismos se ve muy restringida por este fenómeno, que constituye una de las principales causas de la existencia de elevadas concentraciones de contaminantes en las faldas de los montes y en el valle propiamente dicho.

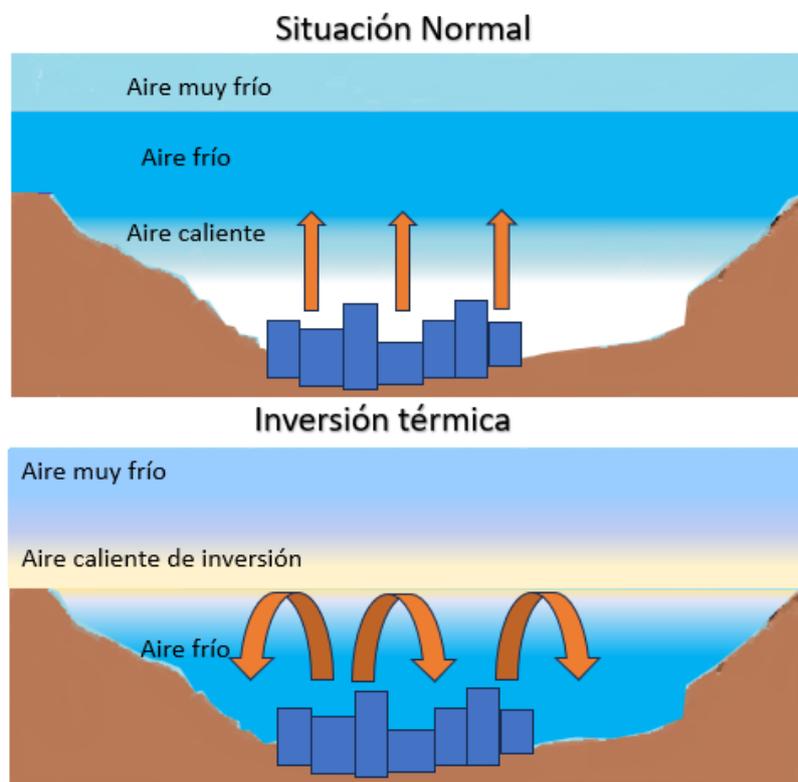


Figura 1-8: Inversión térmica por radiación (redibujada de <https://biodeluna.wordpress.com/2011/01/16/inversion-termica-niebla-ctm/>)

2 Fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera

La contaminación del aire por agentes químicos (que es a los que se refiere este capítulo) consiste en *la presencia en la atmósfera exterior de uno o más contaminantes o sus combinaciones, en cantidades tales y con tal duración que puedan afectar la salud y comodidad humanas, de animales, de plantas, la calidad de bienes materiales, o interferir con el goce de la vida, de la propiedad o el ejercicio de actividades.*

2.1 Emisión e Inmisión

Se entiende por **emisión** a la atmósfera a la descarga al aire de sustancias, cualquiera sea su estado físico o fuente, o de alguna forma de energía (acústica, térmica, etc.). El desarrollo de esta sección se centrará en el tratamiento de emisiones de contaminantes en forma de *gases, partículas o aerosoles*.

Se denomina **inmisión** al contenido de un cierto contaminante que presenta la atmósfera en un sitio dado. Inicialmente la inmisión se caracterizaba a través de la concentración del contaminante considerado a nivel del suelo o en los primeros 2 metros de altura sobre él, pero en la actualidad se designa como inmisión al valor del parámetro en cuestión que caracteriza a un punto del ambiente receptor a cualquier altura de interés. Para la evaluación cuantitativa de la inmisión comúnmente se emplean unidades de concentración tales como ppmV (partes por millón volumétricas) y $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La necesidad de establecer límites a las concentraciones de diversos contaminantes admisibles tanto en emisión como en inmisión tiene que ver con varios objetivos: la preservación de la calidad del aire en sí misma, el mantenimiento del equilibrio ecológico -no afectación a la flora y a la fauna-, la preservación de la salud humana, la preservación de bienes materiales que pudieran verse afectados por un deterioro de la calidad del aire, es decir, evitar que la presencia de ciertos agentes en la atmósfera dé lugar a un evento de contaminación de aire.

2.2 Clasificación de fuentes de emisión

Las fuentes contaminantes se pueden clasificar de distintas formas:

- Según la variación de su **posición** en el tiempo: fuentes **fijas** (por ejemplo, chimeneas, vertederos de residuos sólidos) y **móviles** (el caso típico son los medios de transporte motorizados).
- Según su **naturaleza**: fuentes **naturales** (volcanes, incendios forestales, etc.) y **antropogénicas** (por ejemplo, automóviles, plantas de generación de energía eléctrica).
- Según su **representación** a la escala de trabajo: fuentes **puntuales**, **lineales** o **superficiales**.

Fuentes puntuales: son aquellas que, a los efectos prácticos y en la escala de trabajo, pueden asemejarse a un único punto de emisión de contaminantes. La descarga de fuentes puntuales fijas se efectúa convencionalmente a través de chimeneas.

Fuentes lineales: son aquellas que, por sus características, y a los efectos de su estudio, pueden considerarse como unidimensionales. Es el caso de las vías de tránsito por encima de una cierta densidad vehicular mínima: aunque cada uno de los vehículos es una fuente puntual móvil, si la escala de trabajo lo permite, la aproximación de fuente lineal suele ser muy adecuada para representarlas.

Fuentes superficiales: son aquellas que no es adecuado tratar ni como fuentes puntuales ni como fuentes lineales a la escala de trabajo, sino que deben representarse como fuentes bidimensionales. A cierta escala de trabajo, una fuente de área o superficial puede ser, por ejemplo, un vertedero de residuos sólidos o un tanque a cielo abierto. Trabajando en la macroescala, una ciudad geográficamente extensa podría ser considerada una fuente de área.

2.3 Principales sectores emisores en Uruguay

Los contaminantes son emitidos a la atmósfera por una gran diversidad de fuentes. Algunas de ellas sólo emiten una clase de contaminantes, pero la gran mayoría emite varios simultáneamente. A los efectos de clasificar el origen de las emisiones, internacionalmente se suelen considerar cinco sectores: industrial; comercios y servicios; agropecuario; vehicular; residencial. Uno de los sectores más preocupantes en cuanto emisor de contaminantes a la atmósfera a nivel mundial es el transporte. Sus emisiones son de muy difícil control, dado que el número de vehículos se incrementa en forma sostenida aun cuando la tecnología se esmere en reducir las emisiones individuales de cada uno de ellos. En un balance general, las emisiones de SO₂ se asocian mayoritariamente con emisiones de combustión en fuentes fijas (tanto industriales como domésticas), en tanto las de NO_x se asocian con las fuentes móviles.

De acuerdo con el Inventario de Emisiones a la Atmósfera 2015, en Uruguay el transporte es el responsable mayoritario de las emisiones de NO_x pero no de otros contaminantes. Por ejemplo, en el caso de PM₁₀ y CO, el sector emisor principal es el sector residencial, a través de la quema de leña en estufas o instalaciones similares (Tabla 2-1 y Figura 2-1).

Tabla 2-1 Principales sectores emisores en Uruguay

	Emisor 1	Emisor 2
SO ₂	Industrial (96 %)	Residencial (3 %)
NO _x	Transporte (60 %)	Industrial (27 %)
PST	Industrial (55 %)	Residencial (36 %)
PM ₁₀	Residencial (60 %)	Industrial (25 %)
CO	Residencial (48 %)	Transporte (34 %)
COV	Residencial (76 %)	Agropecuario (10 %)

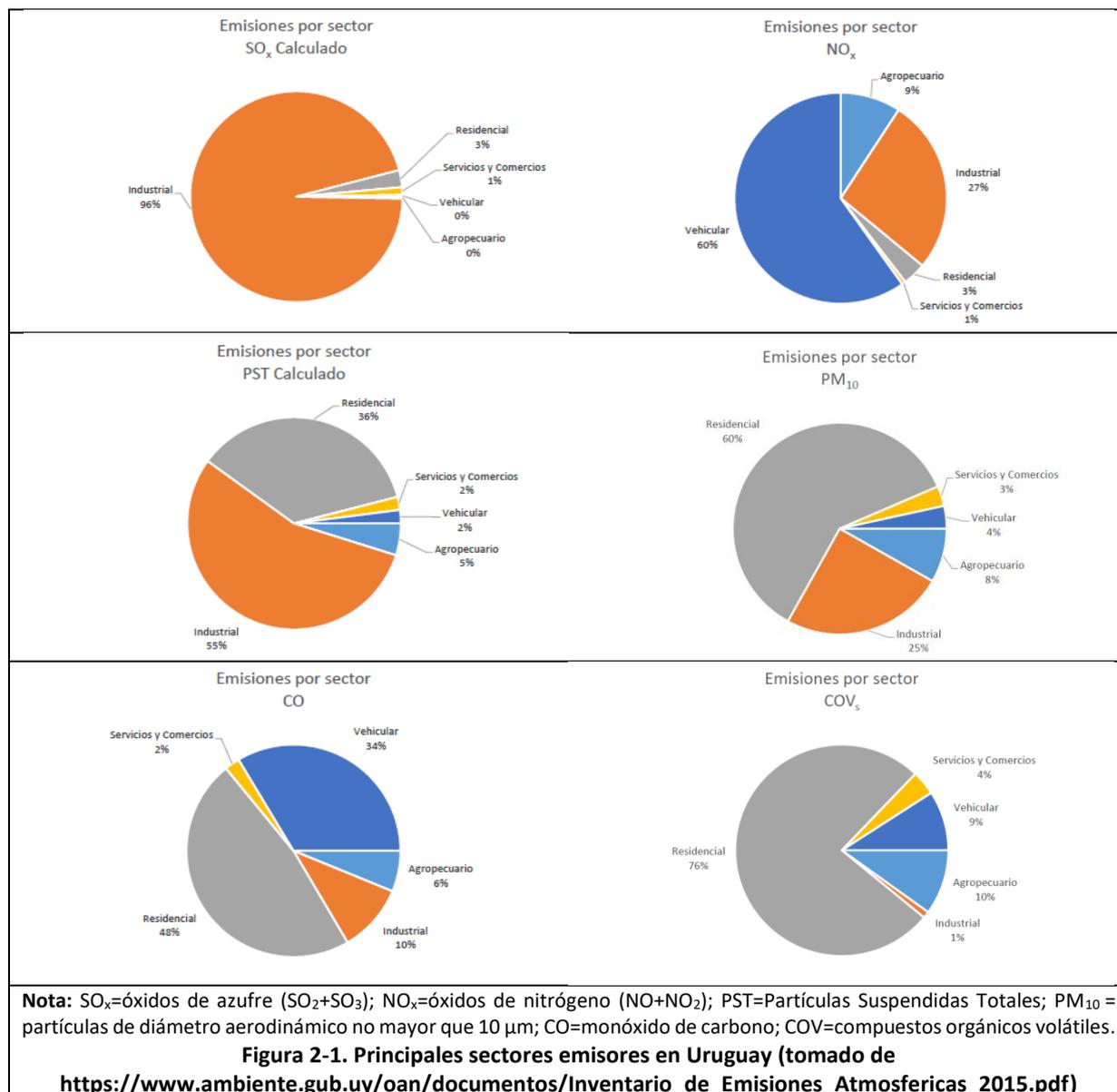
3 Clasificación de contaminantes

Hay muchas posibles clasificaciones de contaminantes atmosféricos. En esta sección se presentan sólo dos de las más generales. Las características sobresalientes de los contaminantes de mayor interés a los efectos de los objetivos de este curso se discuten en los capítulos 4 y 5 de estas notas.

3.1 Clasificación por el momento en que se generan

De acuerdo con el momento en que son generados, los contaminantes se designan como **primarios** o **secundarios**.

- **Contaminantes primarios:** son aquellos que son emitidos directamente desde las diferentes fuentes. Pueden medirse tanto en emisión como en inmisión.



- **Contaminantes secundarios:** Se forman en la atmósfera luego de la emisión de los contaminantes primarios y a partir de ellos. No se les puede asignar una fuente directa de emisión, por lo que sólo pueden ser medidos en inmisión.

3.2 Presentación física de los contaminantes atmosféricos

De acuerdo con su presentación, los contaminantes atmosféricos pueden ser gases, vapores o aerosoles.

Gases: son sustancias que se encuentran en estado gaseoso a 25 °C y 1 atmósfera de presión. Son fluidos que ocupan el espacio que los contiene y que pueden cambiar de volumen por cambios de presión y/o temperatura. Las partículas que los componen son de tamaño molecular.

Vapores: Se designa de esta forma a la fase gaseosa de una sustancia cuyo estado físico a 25 °C y 1 atmósfera de presión, es sólido o líquido. El vapor puede pasar a sólido o líquido actuando o sobre su

presión o sobre su temperatura. El tamaño de las partículas que lo componen es, como en el caso de los gases, molecular.

Aerosoles: un aerosol es una dispersión de partículas sólidas o líquidas, de tamaño inferior a 100 μm , en un medio gaseoso. Dentro de la familia de los aerosoles hay una serie de variantes:

- **Polvo:** es una suspensión en el aire de partículas sólidas de tamaño pequeño, por lo general procedentes de procesos físicos de disgregación. La gama de tamaños de las partículas de polvo es amplia; en general se la considera entre 0,1 μm y 25 μm . Los polvos no flocculan excepto bajo fuerzas electrostáticas, no se difunden en el aire y pueden sedimentar por acción de la gravedad.
- **Humo:** Es una suspensión en el aire de partículas sólidas originadas en procesos de combustión incompleta. Generalmente su tamaño es inferior a 0,1 μm .
- **Niebla:** es una suspensión en el aire de pequeñas gotitas de líquido que se generan por condensación de un estado gaseoso o por la desintegración de un estado líquido por atomización, ebullición, etc. El tamaño de estas gotitas líquidas es muy variado, de 0,01 μm a 10 μm . Algunas pueden ser apreciables a simple vista.
- **Bruma:** Se trata de una suspensión en el aire de pequeñas gotas líquidas apreciables a simple vista, originadas por condensación del estado gaseoso. Su tamaño está comprendido entre 2 μm y 60 μm . Algunos autores no diferencian los términos *niebla* y *bruma*.
- **Esmog:** es el término que acepta la Real Academia Española como castellanización del vocablo inglés "*smog*"¹, que resulta de la unión de las palabras "*smoke*" -humo- y "*fog*" -niebla-. La definición que da la Real Academia es la siguiente: "*Niebla mezclada con humo y partículas en suspensión, propia de las ciudades industriales*".

4 Contaminantes Criterio

Los **contaminantes criterio** son un conjunto de agentes muy abundantes especialmente en los centros urbanos, con potencial de generar efectos perjudiciales para la salud de las personas. Debido a ello y para evitarlos, se suele establecer límites (valores guía y estándares) para proteger la salud y el bienestar humano. Tales valores se fijan con un razonable margen de seguridad, para que efectivamente cumplan esa función de protección.

Aunque los contaminantes criterio pueden ser definidos legalmente en cada país (por ejemplo, la USEPA continúa considerando al plomo entre ellos), de acuerdo con la Nota Descriptiva 313 de 2014 de la Organización Mundial de la Salud son: monóxido de carbono **CO**, dióxido de azufre **SO₂**, óxidos de nitrógeno **NO_x**, ozono **O₃** y partículas de diámetro menor que 10 μm **PM₁₀**. En lo que sigue se presenta brevemente cada uno de ellos.

¹ En México es usual hablar de "*neblumo*".

4.1 Monóxido de Carbono CO

4.1.1 Generalidades

El CO es un gas incoloro e inodoro, producto de procesos de combustión incompleta.

4.1.2 Fuentes emisoras

El CO es uno de los contaminantes más generalizados, por tener que ver tanto con fuentes fijas como móviles. En Uruguay, el principal sector emisor de CO es el residencial, a través de la combustión de leña.

A nivel mundial se considera que la fuente emisora actual más importante es el tránsito. Es de hacer notar que las emisiones durante el arranque de los vehículos cuando las temperaturas ambientales son bajas resultan ser más elevadas con respecto a las que ocurren con condiciones ambientales más favorables.

4.1.3 Efectos sobre la salud humana

El CO es un gas asfixiante, es decir, es capaz de impedir la llegada de oxígeno a los tejidos. En particular, es un **asfixiante** de tipo **químico**: impide la llegada de oxígeno a las células, por tener mayor afinidad con la hemoglobina de la sangre que el oxígeno. En efecto, si hay CO presente, los glóbulos rojos lo prefieren. En vez de formarse oxihemoglobina, se forma carboxihemoglobina. Esto puede producir daños cardiovasculares y neurológicos.

Por lo general, a partir de concentraciones del 2 % comienzan a aparecer efectos adversos. La concentración de carboxihemoglobina en la sangre de una persona fumando puede alcanzar el 15 %. Las concentraciones propias de un ambiente cerrado en el que se fuma, que son análogas a las que se puede tener en zonas de mucho tráfico y que oscilan en las 100 ppmV, producen persistentes dolores de cabeza. Exposiciones prolongadas pueden causar problemas de aprendizaje, destreza manual o percepción visual.

Las afecciones causadas por el CO son más peligrosas en lugares a gran altura sobre el nivel del mar, donde la presión parcial del oxígeno es menor y, en consecuencia, también lo es la disponibilidad de éste para el organismo.

4.1.4 Otros efectos

El CO está presente en concentraciones elevadas en zonas en las que hay congestionamiento de tránsito. Su permanencia en el ambiente no es demasiado prolongada, ya que se oxida naturalmente a CO₂. También por esto es que no suele desplazarse a grandes distancias de la fuente emisora.

Su participación en los procesos de smog fotoquímico es prácticamente despreciable; apenas participa en una de una gran cantidad de reacciones en cadena.

Si bien no es un gas termoactivo o de efecto invernadero (GEI), al ser precursor del CO₂, contribuye indirectamente con el calentamiento atmosférico.

4.1.5 Medidas de control

El mantenimiento preventivo es de rigor en todo tipo de fuente para mantener la eficiencia de la combustión. A su vez, el uso de convertidores catalíticos en vehículos a gasolina permite que el CO complete su oxidación y sea emitido como CO₂.

4.2 Dióxido de Azufre (SO₂)

4.2.1 Generalidades

El SO₂ es un gas incoloro e irritante que se produce por oxidación del azufre. Es muy hidrosoluble.

4.2.2 Fuentes emisoras

Las emisiones de SO₂ se producen por la quema de combustibles que contienen azufre como impureza. Los procesos antropogénicos, y en particular la quema de combustibles fósiles, constituyen la mayor fuente de emisión de óxidos de azufre.

Como el azufre es uno de los principales constituyentes de la materia orgánica, está presente como impureza en todos los combustibles orgánicos (carbón, hidrocarburos líquidos, leña, etc.). En particular, la quema de combustibles fósiles ocasiona la emisión a la atmósfera de millones de toneladas al año de óxidos de azufre. En general las emisiones primarias son de SO₂, aunque puede haber una pequeña proporción de SO₃.

Cuanto más pesada es la fracción de combustible, mayor es su contenido de azufre. En consecuencia, las emisiones de SO₂ se asocian principalmente con fuentes fijas, que son las que emplean como combustible las fracciones más pesadas de la refinación del petróleo (por ejemplo, fuel oil). De hecho, según el Inventario Nacional de Emisiones Atmosféricas 2015, el sector industrial produce el 96 % de las emisiones de óxidos de azufre de nuestro país.

4.2.3 Efectos sobre la salud humana

Los óxidos de azufre (en particular el SO₂, que es la forma predominante en los episodios de contaminación atmosférica) pueden provocar efectos adversos sobre el aparato respiratorio, agravar enfermedades respiratorias o cardiovasculares preexistentes y pueden llegar a causar cuadros mortales.

El SO₂ es irritante del sistema respiratorio. Causa inflamación de las vías respiratorias, tos, secreción mucosa y aumenta la vulnerabilidad a las infecciones respiratorias. Es muy soluble en las mucosas de las vías respiratorias superiores, en las que causa una inflamación en las áreas con las que entra en contacto, debido a la formación de ácido sulfúrico H₂SO₄.

El SO₂ es broncoconstrictor² para las personas y otras especies animales, por lo que tiene un efecto sofocante durante exposiciones a concentraciones moderadas. También irrita los ojos y agrava enfermedades cardíacas, particularmente cuando pasa a formar finas partículas de sulfatos. Los fumadores (activos y pasivos) padecen cuadros agudos de bronquitis ocasionados por el SO₂ inhalado.

La mayoría de los individuos presenta reacción al SO₂ a concentraciones de 5 ppm o mayores, aunque algunos individuos sensibles muestran ligeros efectos ya ante concentraciones de 1 o 2 ppm. La población más vulnerable está constituida por asmáticos e individuos con enfermedades pulmonares o cardiovasculares crónicas, así como también niños y ancianos.

² De acuerdo con el Diccionario de la Real Academia Española (Ed. 23^a, actualizado a 2023): **constreñir** (Del lat. *constringĕre*): 3. tr. Apretar y cerrar, como oprimiendo.

4.2.4 Otros efectos

Los óxidos de azufre pueden generar daños a árboles y cultivos, ocasionando lesiones en las hojas, reducción en la fotosíntesis y en el crecimiento de los vegetales.

En concentraciones ambientales elevadas (concentraciones de más de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y humedad ambiente mayor que el 50 %), el SO_2 produce reducción de la visibilidad. Además, es corrosivo, capaz de atacar metales y estructuras.

El SO_2 es el contaminante primario por excelencia del smog ácido y uno de los dos contaminantes primarios principales de la lluvia ácida. Cuando se combina con agua, particularmente luego de oxidarse a SO_3 , que es muy afín con el vapor de agua, produce ácido sulfúrico. El H_2SO_4 es uno de los dos ácidos fuertes protagonistas en la lluvia ácida; ésta puede ocasionar acidificación de suelos y de cuerpos de agua.

Por otra parte, el SO_2 y las partículas de sulfato que se forman a partir de él tienden a oponerse al calentamiento global: contribuyen con el enfriamiento de la atmósfera a nivel local.

4.2.5 Medidas de control

El control de emisiones de SO_2 se realiza mayoritariamente a través de la desulfurización, que es la remoción del azufre presente como impureza, previo al uso del combustible; de este modo, se logra quemar solamente combustibles con bajos tenores de azufre.

De ser necesario, se aplican tecnologías de control para reducir el contenido de óxidos de azufre en emisiones gaseosas previo a su descarga a la atmósfera. Como las fracciones más pesadas de combustibles fósiles se suelen quemar en fuentes fijas, esto facilita mucho la implementación de tecnologías de control para adecuar la calidad de las emisiones a la normativa vigente.

En Uruguay, desde que en 2013 entró en operación la planta desulfuradora en la refinería de ANCAP, el contenido máximo de azufre en gasolinas es de 30 ppm. En gasoil para uso vehicular, el contenido máximo de azufre es de 50 ppm para el gasoil 50-S y de 10 ppm para el gasoil 10-S. ANCAP produce además otros tipos de combustible, con especificaciones particulares de acuerdo a su uso o a solicitud del cliente.

4.3 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

4.3.1 Generalidades

Se suele designar como “óxidos de nitrógeno” NO_x a la suma del NO y NO_2 que participan en los procesos de contaminación atmosférica. La mayor parte de los NO_x son emitidos a la atmósfera como NO . Suele emitirse primero el monóxido de nitrógeno, que se forma por oxidación del nitrógeno del aire en procesos de combustión a alta temperatura y presión, como ocurre, por ejemplo, en el interior de los motores de combustión. Éste pasa con facilidad a NO_2 , que se suma al NO_2 directamente emitido (en el caso de motores de combustión, el NO_2 emitido directamente es menos del 5 % de los NO_x emitidos). El problema de los óxidos de nitrógeno no radica únicamente en su presencia, sino en su capacidad de ser precursores de contaminantes atmosféricos secundarios (por ejemplo, ozono y material particulado). En efecto, el NO_2 es la principal fuente de aerosoles de nitrato, que constituyen una importante fracción de partículas respirables $\text{PM}_{2.5}$ (ver 4.5).

4.3.2 Fuentes emisoras

Las principales fuentes antropogénicas de NO_x son los vehículos automotores y las plantas de generación termoeléctrica. Hay también otras fuentes antropogénicas, por lo general vinculadas a la quema de combustibles en los sectores industrial, comercial y residencial, y algunas fuentes naturales, que incluyen desde tormentas eléctricas a procesos biológicos.

En nuestro país las emisiones de NO_x se asocian principalmente con las fuentes móviles y, entre ellas, en particular, los camiones a gasoil. La generación termoeléctrica se ha reducido significativamente, y las calderas de Central Batlle, otrora grandes emisores, han dejado de operar en 2017.

4.3.3 Efectos sobre la salud humana

Los NO_x se asocian con daños al sistema respiratorio, especialmente al tejido pulmonar. El NO es de menor interés, ya que rápidamente se oxida a NO_2 , que es poco soluble en agua. Éste ingresa al aparato respiratorio en estado gaseoso y puede alcanzar los pulmones, en los que ocasiona un efecto irritante. Concentraciones inferiores a 0,1 ppmV ya pueden causar efectos adversos a nivel respiratorio. Además, la exposición prolongada a baja concentración de NO_2 puede incrementar otras deficiencias respiratorias.

Para las concentraciones usuales en la atmósfera, el NO_2 puede tener efecto irritante y potencialmente se relaciona con fibrosis pulmonar crónica. El aumento progresivo en la exposición a NO_2 puede producir problemas de percepción olfativa, molestias respiratorias, dolores respiratorios agudos y edema pulmonar.

4.3.4 Otros efectos

Los NO_x pueden causar lesiones y daños en los vegetales.

El NO_2 absorbe la luz visible y a una concentración de 0,25 ppm causa una reducción apreciable de la visibilidad.

El NO_2 es uno de los dos contaminantes primarios principales de la lluvia ácida. Al reaccionar con el vapor de agua presente en la atmósfera, puede formar ácido nítrico HNO_3 , que es uno de los dos principales ácidos que participan en la lluvia ácida. Aunque ni el NO ni el NO_2 causan daños directos a los materiales, el HNO_3 puede generar corrosión de superficies metálicas. Al participar en la lluvia ácida, sus efectos pueden trasladarse a suelos y cuerpos de agua a través de procesos de acidificación ambiental.

Ambos gases, NO y NO_2 , tienen importante participación en los episodios de smog fotoquímico. Son gases muy fotoactivos que actúan como precursores en la formación de ozono y de otros irritantes como los PAN (peroxiacetilnitratos). El NO se considera el principal contaminante primario en el smog fotoquímico, aunque no es incorrecto decir que los NO_x en su conjunto son contaminantes primarios en tales episodios.

En algunos casos, pueden ser precursores de altas concentraciones de PM_{10} (partículas de diámetro equivalente inferior a 10 μm) y particularmente de partículas de nitratos, que suelen integrar la fracción $\text{PM}_{2,5}$.

Los NO_x no son gases de efecto invernadero (GEI), pero indirectamente contribuyen al incremento de la temperatura de la atmósfera, ya que actúan como precursores de O_3 , a través de procesos de smog

fotoquímico, y de N_2O a través de procesos biológicos de desnitrificación, en que ocurren las siguientes reacciones de reducción:



4.3.5 Medidas de control

Como el principal emisor es el sector transporte, el control de las emisiones de NO_x no es para nada sencillo: aunque los avances tecnológicos permitan que cada automóvil tenga cada vez menores emisiones de NO_x , el crecimiento sostenido de la flota automotriz a nivel mundial impide marcar una tendencia decreciente. En la medida que la flota vehicular a nivel mundial se convierta progresivamente a otras fuentes de energía (electricidad, hidrógeno, etc.), este problema se irá atenuando, aunque posiblemente nuevos desafíos emerjan.

El control en fuentes fijas es posible, aplicando tecnologías que permitan reducir el contenido de NO_x de las emisiones previo a su descarga a la atmósfera.

Entre las medidas que se consideran de necesaria aplicación para controlar las emisiones de NO_x se cuentan: el desestímulo al uso del vehículo individual a través de la mejora de los servicios de transporte público y el estímulo al transporte multimodal; el control de las emisiones de gases de escape de los vehículos, previendo sanciones por incumplimiento; el uso obligatorio de convertidores catalíticos en los vehículos que lo requieren, para reducir los NO_x y emitirlos como $\text{N}_2 + \text{O}_2$; la aplicación de tecnologías adecuadas a cada caso para el control de las emisiones de NO_x ; la promoción de fuentes energéticas alternativas más limpias, tanto en el transporte como en otros sectores emisores.

4.4 Ozono (O_3)

4.4.1 Generalidades

El ozono es una forma alotrópica inestable del oxígeno que tiene una gran capacidad oxidante. Sus concentraciones se elevan ante descargas eléctricas, arcos voltaicos, rayos X, radiaciones UV, vertederos de centrales hidráulicas.

Por lo general la cuantificación del O_3 a nivel troposférico incluye otros oxidantes fuertes que se originan como contaminantes secundarios en los procesos fotoquímicos, que se suelen expresar en términos de ozono equivalente.

4.4.2 Fuentes emisoras

A nivel de la tropósfera el ozono es un contaminante secundario, es decir, no se asocia con ninguna fuente de emisión directa, sino que su presencia deriva de la ocurrencia de reacciones en la atmósfera protagonizadas o desencadenadas por otros contaminantes.

En particular, sus precursores son los NO_x y los compuestos orgánicos volátiles COV, que reaccionan en la atmósfera en presencia de luz solar. En Uruguay, el mayor emisor de COV es el sector residencial; sin embargo, generalmente los COV se asocian con emisiones del transporte.

4.4.3 Efectos sobre la salud humana

El O_3 es un irritante fuerte. No es demasiado soluble en agua, por lo que puede generar efectos irritantes tanto en el tracto respiratorio superior como a nivel del tejido pulmonar. Como ocurre con los irritantes en general, por tratarse de sustancias muy reactivas el efecto está mayoritariamente condicionado por la concentración del agente y no por el tiempo de exposición. Cuando reacciona, causa efectos tóxicos en la superficie de las vías respiratorias menores, especialmente en los bronquiolos terminales.

El O_3 y otros oxidantes fotoquímicos pueden provocar irritación de los ojos y del tracto respiratorio; causar o agravar problemas respiratorios (inflamación pulmonar, tos); desencadenar ataques de asma; causar o agravar enfermedades pulmonares; reducir la función pulmonar; potenciar infecciones bacterianas en el pulmón; aumentar el contenido de colágeno en el tejido pulmonar y causar fibrosis; agravar enfermedades cardiovasculares; producir efectos sistémicos por ejemplo en el hígado; producir fatiga, dolor en el pecho, dolor de cabeza y falta de coordinación.

4.4.4 Otros efectos

El O_3 genera disminución de la visibilidad. También produce manchas blancas en la vegetación, lesiones y necrosis en las hojas, limita el crecimiento de los vegetales y disminuye su reproducción.

En cuanto a materiales, deteriora textiles y pinturas, produce la desintegración del hule y corrosión de metales.

El O_3 es un gas termoactivo, al igual que otros gases triatómicos. En la tropósfera sólo tiene incidencia local y un ciclo muy breve, por lo que no se toma en consideración en los balances de emisiones de gases de efecto invernadero.

4.4.5 Medidas de control

Dado que los precursores de la formación de O_3 (NO_x e hidrocarburos no quemados) se asocian con fuentes móviles, las medidas de control se deben aplicar sobre el sector transporte.

En particular, son de aplicación las mencionadas en la sección anterior para el control de emisiones de NO_x . Entre ellas, cabe remarcar la importancia de apuntar a un transporte público eficiente que desestime naturalmente el uso del vehículo individual y el uso obligatorio de convertidores catalíticos en los vehículos que lo requieren, para reducir los NO_x y emitirlos bajo la forma de N_2 y O_2 , así como para oxidar totalmente los hidrocarburos no quemados y emitirlos como CO_2 y H_2O .

4.5 Partículas inhalables PM_{10} (diámetro inferior a $10 \mu m$)

4.5.1 Generalidades sobre partículas en la atmósfera

El material particulado presente en la atmósfera incluye una diversidad de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen. En general se asume que las partículas presentes en la atmósfera tienen dimensiones comprendidas entre $0,005 \mu m$ a $100 \mu m$ (diámetro aerodinámico).

La designación de **partículas suspendidas totales PTS** abarca la totalidad del material particulado. Las fracciones que comprenden las partículas de hasta un cierto diámetro se designan como **PM_{ϕ}** , donde

ϕ es el diámetro aerodinámico de interés expresado en μm . Las fracciones que usualmente son de mayor interés son **PM₁₀** y **PM_{2,5}**.

Las partículas de gran tamaño (diámetro aparente superior a 10 μm) tienen una velocidad de sedimentación apreciable. Su potencial de penetración en las vías respiratorias es bajo. Normalmente estas partículas son retenidas en las vías respiratorias superiores, a nivel de las fosas nasales.

Las partículas de diámetro inferior a 10 μm (**PM₁₀**) son las más susceptibles de generar afecciones respiratorias, ya que en general se mantienen en suspensión sin sedimentar.

Las comprendidas entre 5 μm y 10 μm reciben el nombre de "**fracción inhalable**"; esta fracción penetra por las vías respiratorias, pero normalmente no accede a los pulmones.

Las partículas de diámetro inferior a 5 μm (**PM₅**) constituyen la "**fracción respirable**", que sí tiene el potencial de llegar hasta los pulmones. En esta fracción están incluidos los agentes neumoconióticos (causan el efecto de "pulmón sucio"). Ambientalmente, la fracción respirable se representa por la concentración de **PM_{2,5}** (partículas de diámetro inferior a 2,5 μm).

4.5.2 Fuentes emisoras

Las partículas pueden formarse por procesos naturales o antropogénicos. Cuando las partículas resultan de procesos de combustión, el aerosol que forman se designa como "humo".

Las partículas pueden ser emitidas directamente desde una fuente emisora (partículas primarias) o pueden formarse en la atmósfera (partículas secundarias) por reacciones. Es el caso, por ejemplo, de los nitratos que se forman a partir de los óxidos de nitrógeno; procesos análogos ocurren con los óxidos de azufre o los compuestos orgánicos.

4.5.3 Efectos sobre la salud humana

En función de su diámetro y de su naturaleza, las partículas pueden tener efectos diversos sobre la salud, como irritar la vista o el aparato respiratorio, agravar enfermedades respiratorias o cardiovasculares, generar efectos sistémicos, alterar el sistema inmunológico, producir daños al tejido pulmonar, generar cáncer o producir la muerte.

Los niños, ancianos y quienes padecen enfermedades respiratorias o cardiovasculares crónicas, asma o gripe, constituyen la población más sensible a los efectos de la inhalación de partículas.

4.5.4 Otros efectos

El efecto ambiental directo de mayor interés que se asocia con las partículas es la pérdida de visibilidad.

Por otra parte, la mayor parte de los aerosoles derivados de emisiones antropogénicas tienden a enfriar la atmósfera a nivel local, en parte porque refractan la luz solar y en parte porque proporcionan núcleos para el inicio de procesos de condensación y formación de nubes, que también contribuyen a la refracción.

4.5.5 Medidas de control

Las medidas de control dependen del tamaño y origen de las partículas, por lo que se deben seleccionar en función del proceso en que se originan, de las dimensiones y de la naturaleza de las partículas (ver capítulo 12 de estas notas).

5 Otros contaminantes atmosféricos

5.1 Dióxido de Carbono (CO₂)

Es producto de la combustión completa y, aunque a una escala mucho menor, también de procesos de respiración aerobia. Aunque naturalmente forma parte de la composición atmosférica, en proporciones superiores a las normales es considerado como agente contaminante.

En lo que hace a sus efectos sobre la salud humana, es un agente asfixiante simple, es decir, desplaza al oxígeno y en consecuencia reduce su concentración en el aire.

En cuanto a efectos ambientales, es un gas termoactivo, o sea que absorbe radiaciones infrarrojas presentes en la atmósfera y contribuye a elevar la temperatura en la tropósfera. El CO₂ es el gas de referencia para todo lo referente a calentamiento atmosférico y cambio climático.

5.2 Ácido Sulhídrico (H₂S)

Es un gas que, a temperatura ambiente, es incoloro y de olor desagradable. Es el gas de más bajo nivel de detección para el olfato humano.

Las principales fuentes de emisión son refinerías de petróleo, plantas de gas, industrias metalúrgicas y procesos biológicos anaerobios (esta última fuente es mucho menor en magnitud que las otras).

Cuantitativamente, las erupciones volcánicas generan importantes emisiones de H₂S, pero no revisten interés en nuestro país.

5.3 Óxido Nitroso (N₂O)

El óxido nitroso N₂O es un gas termoactivo que participa en el calentamiento atmosférico. Proviene de procesos biológicos, principalmente del sector agropecuario, por excretas de animales y utilización de fertilizantes nitrogenados. También hay emisión de N₂O a partir de las excretas humanas.

El N₂O no forma parte de los NO_x, aunque se relaciona con ellos a través del ciclo del nitrógeno, en procesos de desnitrificación (ver capítulo 4.3).

5.4 Compuestos Orgánicos

Los hidrocarburos son compuestos que contienen carbono e hidrógeno, aunque a veces pueden contener además otros elementos.

5.4.1 Compuestos Orgánicos Volátiles COV

Los hidrocarburos con hasta 5 átomos de carbono se clasifican como **compuestos orgánicos volátiles COV**, los que a su vez se subcategorizan en **metano** (CH₄) y **compuestos orgánicos volátiles distintos**

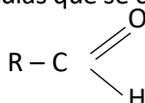
del metano (COVDM) o **compuestos orgánicos volátiles no-metano** (COVNM)⁽³⁾. Cuando tienen de 1 a 4 átomos de carbono se presentan en estado gaseoso a temperatura ambiente.

Los COVDM no son gases de efecto invernadero, pero contribuyen indirectamente al calentamiento atmosférico. Además, participan como precursores en la formación de esmog fotoquímico.

En cambio, el metano es un gas termoactivo o GEI; en contrapartida, no participa en los procesos de esmog fotoquímico. Sus emisiones se asocian con procesos anaerobios.

5.4.2 Aldehídos

De acuerdo con su estructura química, son moléculas que se caracterizan por un grupo:



Son gases irritantes y lacrimógenos, es decir, causan inflamación a nivel de vías respiratorias y de la vista.

5.4.3 Hidrocarburos Alifáticos

Son hidrocarburos de cadena lineal. Su principal efecto sobre las personas es el de actuar como asfixiantes simples (por desplazamiento). Sin embargo, los PAN a los que se refiere el punto 5.5, son hidrocarburos alifáticos que contienen nitrógeno y tienen además las propiedades de ser lacrimógenos y fitotóxicos.

5.4.4 Hidrocarburos Aromáticos

Son hidrocarburos con un anillo de benceno en su estructura.

Son liposolubles, por lo que su uso como disolventes industriales incluso a nivel artesanal y doméstico genera riesgos a la salud tanto por exposición aguda como por exposición crónica. Por exposición aguda tienen efectos anestésicos (depresores del sistema nervioso central), en tanto por exposición crónica los hidrocarburos aromáticos son cancerígenos.

5.4.5 Hidrocarburos Polinucleados

Los hidrocarburos polinucleados, como por ejemplo benzoantraceno, benzopireno, benzoperileno, son compuestos que tienen en su molécula varios anillos y cuya acción principal sobre la salud humana radica en ser cancerígenos.

Un subgrupo de interés ambiental dentro de los hidrocarburos polinucleados es el que constituyen las **dioxinas y furanos** (policlorodibenzo-p-dioxinas PCDD y policlorodibenzofuranos PCDF).

Se trata de compuestos aromáticos clorados tricíclicos con propiedades químicas similares. Integran la lista de 12 contaminantes orgánicos persistentes (COP) prioritarios del PNUMA. Las dioxinas se diferencian de los furanos en la cantidad de átomos de oxígeno presentes en la molécula: los furanos tienen un átomo de oxígeno y las dioxinas, dos. Las estructuras básicas de estos compuestos se presentan en la Figura 5.1. Las posiciones numeradas pueden ser ocupadas tanto por átomos de hidrógeno como de cloro. La suma de átomos de hidrógeno y cloro en las moléculas de las dioxinas y

³ Los COVNM son una lista medianamente extensa de sustancias que reaccionan en la atmósfera: butano, propano, xileno, alcohol butílico, metiletilcetona, acetona, etilenglicol, tricloroetileno, clorobenceno y limoneno.

furanos es igual a ocho. Se conocen 75 isómeros de dioxinas y 135 furanos, que se diferencian por la cantidad de átomos de hidrógeno que son sustituidos por átomos de cloro y por la posición de éstos en el interior de la molécula.

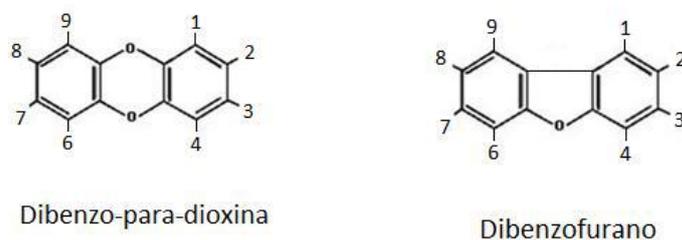


Figura 5.1 Estructuras de dioxinas y furanos (tomado de Echeverri, 2012)

Los policlorodibenzo-p-dioxinas (PCDD) y los policlorodibenzofuranos (PCDF) suelen aparecer como subproductos de casi todos los procesos de combustión, así como de varios procesos industriales.

Son compuestos poco volátiles, poco solubles en agua, un poco más liposolubles que hidrosolubles, estables a la descomposición térmica por debajo de los 850 °C y se descomponen rápidamente por acción de la luz en presencia de hidrógeno. Cuando se incorporan al suelo o a los cuerpos de agua son prácticamente inalterables, persistentes y bioconcentrables; en general resultan ser también bioacumulables.

Las dioxinas y furanos poseen efectos cancerígenos y mutagénicos. Al igual que los PCB (moléculas sintetizadas por el hombre para su uso como fluido dieléctrico de máxima estabilidad en transformadores), las dioxinas alteran el sistema reproductor.

5.5 PAN

Los PAN (nitratos de peracilo o de peroxiacetilo, o peroxiacetilnitratos $\text{CH}_3\text{COO}_2\text{NO}_2$) son compuestos orgánicos de cadena lineal que aparecen como contaminantes secundarios en los procesos de esmog fotoquímico.

Son compuestos irritantes, fitotóxicos y lacrimógenos. A veces se los incluye simplemente entre los contaminantes orgánicos alifáticos, pero el efecto principal de aquéllos se asocia más bien con asfixia simple que con irritación.

5.6 Compuestos clorofluorocarbonados CFC

Se trata de hidrocarburos saturados en los que los átomos de hidrógeno se sustituyen por átomos de flúor y/o cloro. Son compuestos antropogénicos cuya vida media estimada en la atmósfera es muy prolongada (se estima hasta en 500 años). Fueron sintetizados en 1928, con el objetivo de ser empleados como refrigerantes y propelentes inertes.

Son gases termoactivos, con poder de calentamiento atmosférico muy alto, miles de veces mayor que el del CO_2 . Además, participan en forma protagónica en la destrucción catalítica del ozono estratosférico. Sus concentraciones atmosféricas muestran un descenso sostenido (Figura 5.3). En Uruguay, el uso de CFC cesó en 2009.

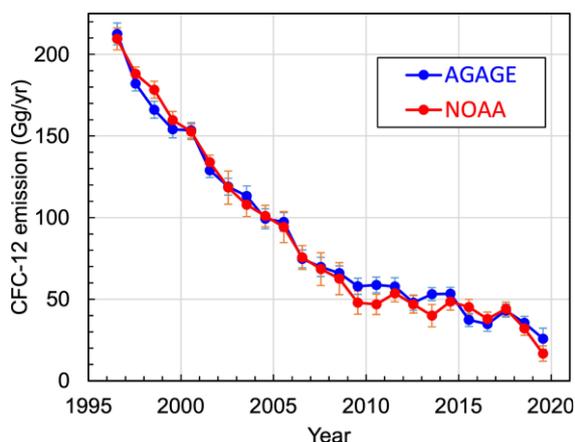


Figura 5.2 Reducción de emisiones de CFC-12.
Tomado de Montzka et al. (2021)

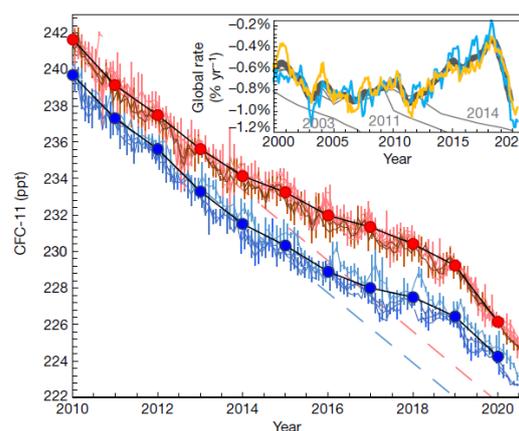


Figura 5.3 Fracciones molares de CFC-11 medidas en la atmósfera, en 12 sitios, según US-NOAA. Rojo: hemisferio norte; azul: hemisferio sur. En el recuadro, evolución de las tasas de cambio anuales. Tomado de Montzka et al. (2021)

5.7 Metales

El origen de los metales en la atmósfera es muy variado. Por ejemplo, la porción inorgánica de las cenizas emitidas a la atmósfera suele contener varios de ellos.

En general los metales son tóxicos sistémicos, es decir, actúan sobre un cierto sistema u órgano blanco.

Los metales se categorizan según la preocupación ambiental que existe en torno a ellos; para algunos existen redes de monitoreo a nivel mundial, por lo que se consideran de importancia primaria, como por ejemplo mercurio, plomo, aluminio, hierro. Un caso particular que debe mencionarse es el del plomo, que durante mucho tiempo integró la lista de contaminantes atmosféricos criterio de la OMS y aún integra la de Estados Unidos. El plomo (Pb) es un metal pesado no ferroso y uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. Como aparece como impureza en muchos minerales con usos muy diversos, está presente también en el polvo emitido por muchísimas fuentes, es decir, en el material particulado, preferentemente en las fracciones de menor diámetro. Es emitido tanto por fuentes naturales como antropogénicas. Históricamente, las mayores emisiones antropogénicas de Pb se asociaron con el uso de tetraetilo de plomo como antidetonante en gasolinas. Actualmente hay varios procesos industriales que emiten óxidos de plomo, como la combustión de carbón y la fundición de metales, entre otros.

El plomo se acumula en el organismo, por un lado, porque resulta de difícil remoción para el organismo humano, pero por otro, porque el propio organismo lo “confunde” con calcio, por ser ambos elementos de valencia +2. La intoxicación aguda, que por lo general tiene que ver con exposición ocupacional, produce un cuadro abdominal que se designa como *cólico saturnino*.

La intoxicación crónica genera efectos de gravedad, muchos de los cuales no son reversibles a menos que la exposición haya sido moderada; es necesario recurrir a tratamientos médicos especiales, como la quelación, para intentar descontaminar el organismo y revertir las alteraciones constatadas. El plomo inhibe la síntesis de la hemoglobina en los glóbulos rojos por lo que causa anemia; daña el funcionamiento del hígado y riñones; produce insuficiencia respiratoria; y causa daños neurológicos a nivel del sistema nervioso central (saturnismo). Los niños con altos niveles de plomo en la sangre presentan desórdenes en su comportamiento social y desarrollo mental restringido con efectos neuroconductuales irreversibles, entre ellos la reducción de su capacidad de aprendizaje.

El plomo se acumula en los tejidos de mamíferos y aves propios del ambiente urbano y puede tener incidencia, por ejemplo, en el desarrollo de los huevos de las aves o en el sistema óseo de los mamíferos. El contenido de plomo en sangre en perros es indicador del nivel de contaminación atmosférica por Pb. Este método fue desarrollado por la Facultad de Química de la UdelAR hace casi dos décadas.

La medida principal para reducir las emisiones de plomo al ambiente ha sido la sustitución del tetraetilo de plomo empleado como antidetonante en gasolinas por otro agente que permita obtener el efecto buscado. En nuestro país esto ocurrió en 2003. Se pasó entonces al uso del MTBE (metil-tertbutil-éter) como antidetonante; actualmente se emplea con ese fin un producto orgánico que se conoce como “aditivo multifuncional” y que es un producto dispersante-detergente.

A título informativo, en la Tabla 5.1 se presentan las principales consecuencias de la exposición ocupacional a vapores metálicos en ambientes de trabajo, por procesos de soldadura.

Tabla 5.1 Consecuencias de la exposición ocupacional a vapores metálicos en procesos de soldadura (tomado de www.aepsal.com)

	Intoxicación aguda	Intoxicación crónica
Aluminio	Encefalopatía (pacientes de diálisis)	Enfermedad de Shaver (fibrosis pulmonar)
Berilio	Irritación de vías aéreas superiores: neumonitis química, fiebre de los metales	Fibrosis pulmonar. Cutánea: granulomas. Cancerígeno de pulmón.
Cadmio	Absorción respiratoria: fiebre de los metales, neumonitis química, edema de pulmón. Absorción digestiva: dolor abdominal, náuseas, vómitos, diarrea.	Rinitis: perforación del tabique nasal, anosmia, bronquitis, enfisema. Pigmentación amarilla en los dientes. Nefropatía cádmica: tubulopatía proximal. Cancerígeno de pulmón y de próstata.
Cobalto	Alteraciones respiratorias. Alteraciones digestivas.	Dermatitis de contacto. Fibrosis pulmonar.
Cobre	Fiebre de los metales. Alteraciones digestivas. Insuficiencia hepática. Insuficiencia renal.	Perforación del tabique nasal. Coloración verdosa de piel, uñas, pelos. Dermatitis de contacto. Alteraciones hepáticas.
Cromo	Gastrointestinal: dolor abdominal, náuseas, vómitos, diarrea, hemorragia intestinal. Insuficiencia renal aguda por necrosis tubular Insuficiencia hepática Coagulopatía	Cutánea: úlceras 5 – 10 mm indoloras, dorso de manos y dedos. Dermatitis de contacto. Respiratoria: rinitis, úlcera, perforación del tabique nasal. Cancerígeno de pulmón y senos nasales y paranasales.
Manganeso	Neumonitis química: neumonía mangánica	Alteraciones respiratorias. Cuadro neuropsiquiátrico: psicosis mangánica. Síndrome Parkinsoniano, con hipertonía y temblor de extremidades inferiores.
Níquel	Fiebre de los metales	Respiratoria: rinitis, perforación del tabique nasal. Sinusitis, anosmia. Cutánea: dermatitis de contacto. Cancerígeno de pulmón y senos nasales y paranasales.
Plomo	Digestivas: cólico saturnino, dolor, vómitos, estreñimiento. Encefalopatía saturnina: convulsiones, coma, muerte. Renales: albuminuria, cilindruria, oliguria. Hepáticas: de citosis a necrosis hepática.	Alteraciones hematológicas (anemia saturnina). Alteraciones digestivas (constipación). Sistema nervioso central: cefalea, insomnio, alteraciones del carácter y memoria. Sistema nervioso periférico: polineuropatía motora extremidades superiores. Hipoespermia. Hipertensión arterial por afección renal. Enfermedad renal crónica.
Zinc	Fiebre de los metales. Es el metal en el que se da con mayor frecuencia.	Respiratoria: rinitis, perforación del tabique nasal. Cutánea: dermatitis de contacto. Ocular: conjuntivitis. Alteraciones retinianas.

5.8 Agentes Biológicos

Los agentes biológicos incluyen microorganismos (bacterias, virus, protozoarios), hongos, algas, polen. Algunos agentes biológicos tienen el potencial de transmitir enfermedades y por ello se consideran como **agentes patógenos**; es el caso de muchas bacterias, virus u hongos. Otros, como el polen, la “pelusa” (vilano) de los plátanos en primavera o el pelo de mascotas, tienen **efectos alérgenos**⁴.

6 Emisiones a la atmósfera

El desarrollo de este capítulo se centra en emisiones de contaminantes químicos, ya sea en forma de gases, partículas o aerosoles.

6.1 Métodos de dispersión

La dispersión de los contaminantes en la atmósfera depende de varios factores: naturaleza física y química de la emisión, temperatura de la emisión, características meteorológicas del ambiente receptor, ubicación de la fuente en relación con obstáculos al movimiento del aire, etc.

Los principales métodos de dispersión en la atmósfera son (ver Figura 6.1): **difusión** (se asocia con mezcla de masas de diferente concentración); **convección** (vinculada con fenómenos de transporte vertical); **advección** (asociada con fenómenos de transporte horizontal).

		
<p>El principal método de dispersión de contaminantes a la atmósfera en la imagen es el de difusión.</p>	<p>Convección. Tomado de https://www.escolapedia.com/contaminacion-de-la-atmosfera/</p>	<p>El principal método de dispersión de contaminantes en la atmósfera en la imagen es el de advección.</p>
<p align="center">Figura 6.1 Métodos de dispersión de contaminantes en la atmósfera</p>		

6.1.1 Difusión

Es el más lento de los métodos de dispersión, y el de menor alcance espacial. Se vincula a la **dispersión de una masa de alta concentración en el seno de otra de baja concentración**, tendiendo a lograr uniformizar las concentraciones. Se reconocen dos escalas para el proceso de difusión: difusión molecular y difusión turbulenta.

⁴ Como se indicó en el Módulo Introductorio, la alergia es una reacción del organismo para defenderse de un agente que no debería representar un riesgo. Los agentes alérgenos producen efectos diferenciales según sea la susceptibilidad individual de los receptores.

6.1.2 Convección

Se refiere a movimientos de **transporte vertical** que tienen su origen en una **causa mecánica o térmica**. En general, se aplica el término al movimiento de ascensión de una masa de aire caliente ubicada originalmente por debajo de una masa de aire frío, tenga o no una velocidad inicial significativa. Es un proceso muy rápido y en función de la velocidad y la temperatura de la emisión, puede tener un gran alcance.

La velocidad y temperatura de la emisión inciden directamente en el ascenso que la misma logra antes de que el principal mecanismo de dispersión pase a ser la advección. La distancia vertical recorrida por la emisión, que se relaciona con su energía térmica y cinética, se denomina **sobreelevación del penacho (ΔH)**. A mayor sobreelevación del penacho, mayor será la dispersión esperada.

6.1.3 Advección

Es una forma de **transporte horizontal** de contaminantes que se asocia fundamentalmente con el arrastre de los mismos a causa del **viento**. Depende, por lo tanto, del patrón físico de vientos (intensidad y dirección), lo que redundará en complejos patrones de dispersión. En cualquier caso, genéricamente es el método de dispersión de mayor alcance.

Los mayores niveles de contaminación se registran a favor de la dirección del viento, pero como dicha dirección varía a lo largo del día, todo estudio debe vincularse a un modelo o un análisis cuidadoso de las condiciones de cada caso en particular.

6.2 Factores ambientales que afectan la evolución de los contaminantes en la atmósfera

6.2.1 Condiciones meteorológicas

- **Temperatura:** Lo que interesa a los efectos de la dispersión de contaminantes es la variación de la temperatura en función de la altura (condición de estabilidad atmosférica). Para minimizar los niveles de inmisión, es condición favorable la existencia de una capa de inversión por debajo del punto de emisión pues reduce las posibilidades de que los contaminantes regresen rápidamente a tierra.
- **Viento:** Los mecanismos advectivos son muy importantes dentro de los procesos de dispersión atmosférica. Se debe considerar la velocidad, dirección y sentido del viento. Aunque el problema es mucho más complejo, en primera instancia se puede decir que el nivel ambiental de un cierto contaminante resulta inversamente proporcional a la velocidad del viento en el punto de emisión.
- **Precipitaciones:** En general la lluvia actúa como un sistema de “lavado a contracorriente” cuyo efecto principal consiste en trasladar el punto de máxima concentración a un sitio mucho más próximo a la fuente emisora. Una lluvia intensa y breve tiene gran capacidad de arrastre y es capaz de modificar por enfriamiento las condiciones de estabilidad de las capas inferiores de la atmósfera. Una lluvia muy fina puede mantener los contaminantes en suspensión. Cuando la humedad relativa supera el 75 %, actúa como una llovizna débil y persistente que afecta el funcionamiento de los mecanismos de dispersión.

6.2.2 Topografía, presencia de obstáculos

La **topografía** influye marcadamente sobre los niveles esperables de contaminación atmosférica. Una zona en general plana permitirá que los mecanismos de dispersión ocurran libremente sin imponerles modificaciones, pero la presencia de agentes que obstaculicen la normal circulación del aire redundará en una alteración de los patrones de dispersión al modificar la velocidad del viento o los ciclos de calentamiento - enfriamiento de la superficie terrestre.

Los dos ejemplos más claros los constituyen los vertidos en valles cerrados y las emisiones en ambiente urbano. En el primer caso, la formación de una inversión de temperatura sobre el valle conduce a que durante la noche se precipite a tierra gran parte de los agentes contaminantes presentes en la atmósfera; por su parte, la circulación de aire que ocurre sobre una zona deprimida cercada por elevaciones conduce a un incremento de las inmisiones en la falda de los montes circundantes (Figura 1-8).

Por otro lado, la complejidad de la topografía urbana influye en el movimiento de las masas de aire, disminuyendo su velocidad por la presencia de edificios y generando patrones locales de turbulencia asociados con la disposición de las calles.

El efecto denominado **“isla caliente”** o **“isla de calor”** (ver Figura 6.2) se refiere al área urbana en que la temperatura es significativamente superior a la de las áreas circundantes no urbanizadas, debido a actividades antrópicas.

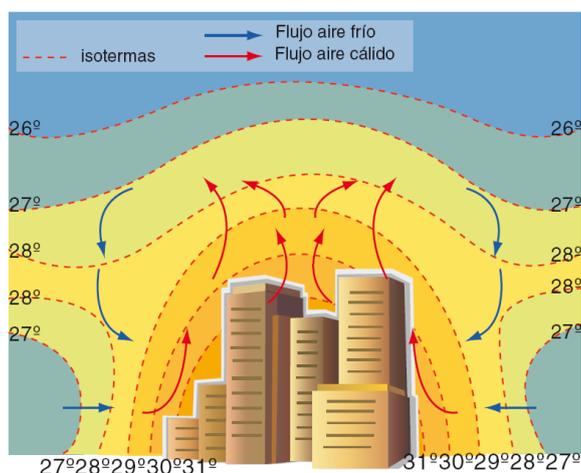


Figura 6.2 Formación de la isla de calor (tomado de Echeverri, 2012)

El calentamiento de edificios y pavimentos juega un importante rol en este microclima, ya que favorece la aparición de brisas urbanas y circulaciones cíclicas de las masas de aire frío de la periferia debido al ascenso del aire caliente del interior de la ciudad, provocando una situación de bajas presiones que atraen las masas de aire frío desde la periferia hasta el interior. Estos hechos contribuyen a hacer más compleja o, en todo caso, a dificultar la dispersión de los contaminantes.

6.3 Descarga de fuentes puntuales. Plumas o penachos.

La descarga de fuentes puntuales fijas se efectúa usualmente a través de **chimeneas**, cuya altura geométrica debe diseñarse de modo de minimizar los niveles de **inmisión**. La emisión más su estela es lo que se denomina **pluma o penacho**. La forma del penacho está vinculada a la relación entre las características de la emisión y la situación meteorológica reinante en el momento y lugar en que ésta ocurre.

En la Figura 6.3 se muestran distintos tipos de penacho y se relacionan con las condiciones atmosféricas. En los esquemas, las chimeneas están representadas por su **altura efectiva** y no por su **altura geométrica** (ver sección 6.4.1). La forma que adopta el penacho no está únicamente determinada por el gradiente de temperatura atmosférico, sino que es el producto de una serie de procesos interactivos más complejos, entre los que cabe citar la turbulencia y el perfil de velocidades del viento.

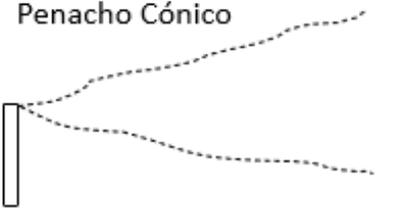
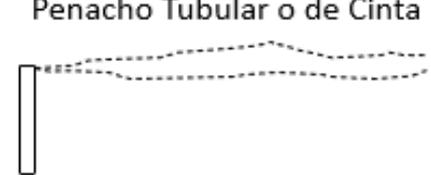
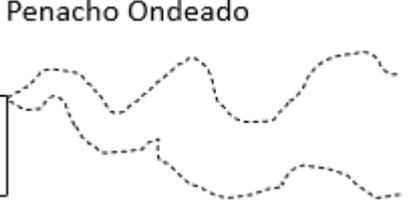
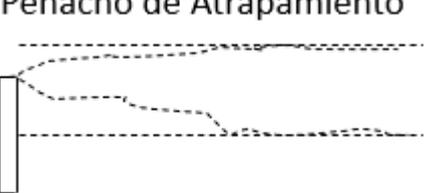
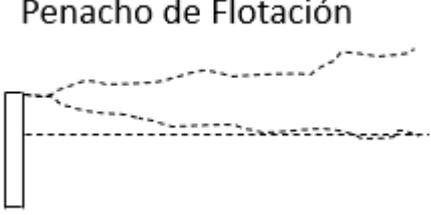
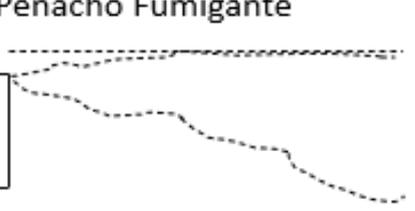
<p>Penacho Cónico</p> 	<p>Atmósfera neutra. En el caso del penacho cónico, hay estabilidad atmosférica neutra y la turbulencia es mecánica de pequeña escala. Ocurre cuando hay nubosidad durante el día o la noche y los vientos son de moderados a fuertes; esto impide la entrada de radiación solar durante el día y el escape de radiación terrestre durante la noche. El semiángulo de la pluma es de aproximadamente 10°.</p>
<p>Penacho Tubular o de Cinta</p> 	<p>Fuerte estabilidad atmosférica (emisión en una capa de inversión) Ausencia de vientos y turbulencia mecánica muy escasa. Hay una fuerte inversión a una gran distancia por encima de la altura de la chimenea. La atmósfera es extremadamente estable. Por debajo hay aire más denso, que impide que la emisión baje, y por encima hay aire menos denso, que actúa como un “techo” para la dispersión vertical.</p>
<p>Penacho Ondeadado</p> 	<p>Atmósfera inestable. Este tipo de penacho ondeado existe cuando hay un alto grado de turbulencia convectiva. Las condiciones atmosféricas son muy inestables. A pesar de haber una amplia dispersión de los contaminantes debido a los grandes remolinos, puede haber grandes concentraciones de estos en áreas localizadas del terreno. Estas plumas se asocian a un elevado calentamiento de la superficie del terreno con vientos ligeros.</p>
<p>Penacho de Atrapamiento</p> 	<p>Emisión entre dos capas de inversión. Este es un caso en el que ocurre una inversión tanto por debajo como por encima de la altura de la chimenea. La dispersión de los contaminantes se desarrolla entre las dos capas estables. Las concentraciones de inmisión a nivel del suelo y próximo a él son muy bajas.</p>
<p>Penacho de Flotación</p> 	<p>Emisión por encima de una capa de inversión. Este penacho, que se designa como penacho horizontal ascendente, se caracteriza por la existencia de una capa de inversión por debajo de la pluma y una capa inestable en la que se desarrolla la pluma y por encima de esta. Es una situación favorable desde el punto de vista de la inmisión resultante, porque los contaminantes son dispersados por la acción del viento sin que haya grandes concentraciones de contaminantes a nivel de terreno. Suele darse en horas de la tarde-noche, con atmósfera despejada.</p>
<p>Penacho Fumigante</p> 	<p>Emisión por debajo de una capa de inversión (el penacho fumigante es un caso particular de penacho horizontal descendente en condiciones de inestabilidad). Este caso ocurre cuando una capa estable de aire se encuentra a una corta distancia por encima del sitio de emisión de la pluma, y, además, la pluma se desarrolla en una capa de gran inestabilidad y turbulencia. Es la situación más desfavorable en cuanto a inmisión. Los movimientos vorticosos resuspenden el material ya depositado. Esta situación suele ocurrir en verano, en horas de la mañana. Generan grandes concentraciones en la superficie, pero no suelen durar demasiado tiempo.</p>

Figura 6.3 Principales formas de penachos (en los esquemas se representa la altura efectiva). Basado en Wark and Warner, 1990.

6.4 Modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera

6.4.1 El penacho gaussiano

Para el cálculo de niveles de inmisión a partir de la emisión de fuentes puntuales suele emplearse el modelo de **penacho gaussiano**. En ciertas hipótesis bastante amplias y razonables, la ecuación del penacho gaussiano es una solución explícita de la Ley de Fick (ecuación general de dispersión) que permite calcular los niveles de inmisión a cierta distancia de una fuente puntual (usualmente entre 300 m y 10.000 m) cuando se conocen la **altura geométrica** de la chimenea (su altura física); la **altura efectiva** (es la altura hasta la que subiría la emisión en ausencia de capas de inversión, hasta anular su energía inicial, térmica y cinética, es decir: **altura efectiva = altura geométrica + sobreelevación del penacho** o bien $H = h_g + \Delta h$); la **dirección del viento** y el módulo de su **velocidad u** ; y los **coeficientes de dispersión de Pasquill-Gifford σ_y y σ_z** que dependen de la condición de estabilidad atmosférica. Es importante tener presente que σ_y y σ_z no son valores adimensionales. (Ver esquema de la Figura 6.4).

En efecto, cuando se desea conocer la concentración de un cierto contaminante emitido por una chimenea de altura efectiva H , para aplicar el modelo gaussiano se debe asumir que el pie de la chimenea se encuentra ubicado en el origen de coordenadas $(0, 0, 0)$, por lo que la emisión se realizará desde su boca, ubicada en $(0, 0, H)$. Si se elige la dirección del eje Ox en forma colineal con la dirección del viento, entonces la concentración C esperada en un punto de coordenadas (x, y, z) se puede obtener en forma explícita a partir de la emisión expresada como una tasa másica Q . Si Q se expresa en g/s , u en m/s , σ_y , σ_z y H , x , y , z en m , el valor de C quedará expresado en g/m^3 en la expresión:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2} \right)}$$

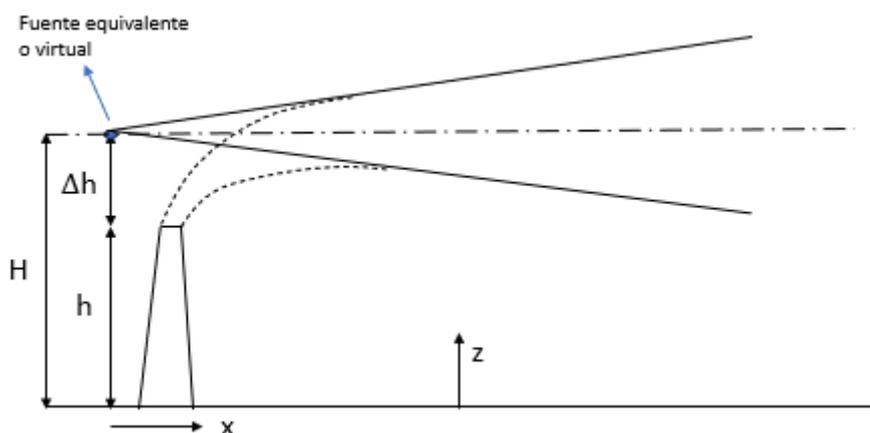


Figura 6.4 Esquema del penacho gaussiano. Redibujado de Wark and Warner (1990)

En el caso en que se considere que ocurre reflexión en $z = 0$ (es decir, se supone que la tierra no se comporta como un sumidero), se puede aplicar el “método de las imágenes”, una fuente virtual situada a altura $z = -H$. En este caso, la ecuación resulta ser:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} \right)} \left(e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right)$$

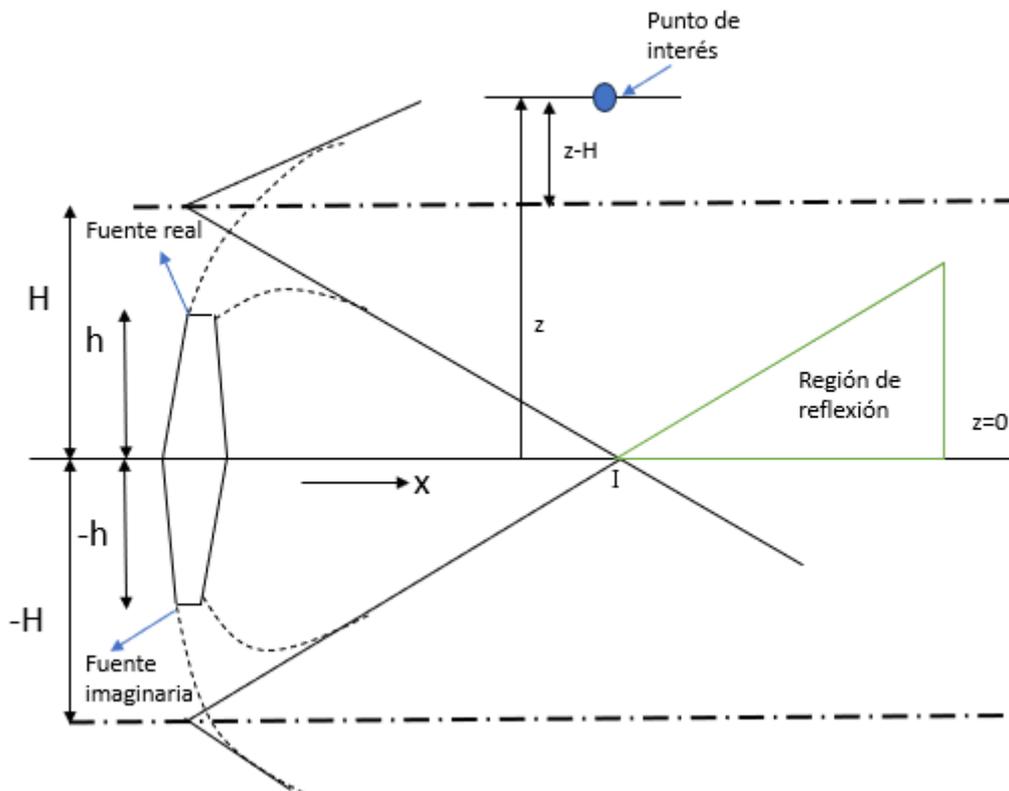


Figura 6.5 Método de las imágenes. Redibujado de Wark and Warner, 1990.

En ambos casos los valores de los coeficientes de dispersión σ_y y σ_z dependen de la distancia a la fuente y de las condiciones de estabilidad de Pasquill-Gifford, que deducen el estado de la atmósfera en función de parámetros meteorológicos de observación directa: la velocidad del viento, la insolación diurna y la nubosidad nocturna (Figura 6.6). Las categorías se designan según se indica en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Estados de la atmósfera según Pasquill y Gifford

Categoría	Descripción
A	Fuerte inestabilidad
B	Moderada inestabilidad
C	Ligera inestabilidad
D	Neutralidad
E	Ligera estabilidad
F	Fuerte estabilidad
G	Inversión

6.4.2 Condiciones de estabilidad atmosférica según Pasquill-Gifford

En la aplicación del modelo gaussiano es de singular importancia la elección adecuada de los coeficientes de dispersión, los que dependen del estado de la atmósfera y de la distancia x desde la fuente emisora. El comportamiento de los coeficientes se muestra en los gráficos de Turner (Figura 6.6). Sus valores pueden leerse desde estos ábacos o calcularse aplicando las ecuaciones de Gifford.

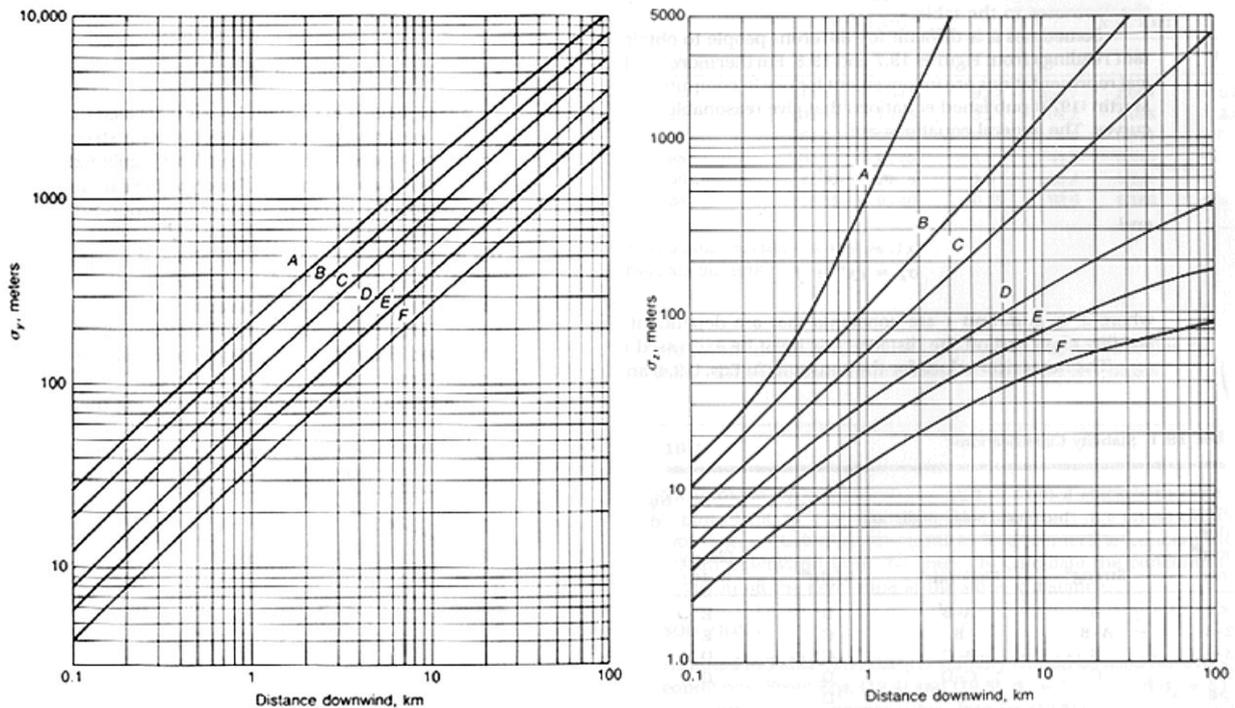


Figura 6.6 Ábacos de Turner. Izquierda: $\sigma_y = \sigma_y(x)$; derecha: $\sigma_z = \sigma_z(x)$. Tomado de: Wark and Warner, 1990.

6.4.3 Ejemplo de cálculo de sobreelevación del penacho

En esta sección se desarrollarán dos métodos de cálculo de sobreelevación del penacho.

Fórmulas de Moses – Carson

Este método propone calcular la sobreelevación del penacho como función de la estabilidad atmosférica. Se deben calcular dos componentes, uno cinético y otro térmico, que son multiplicados por coeficientes que representan la condicionante dada por la estabilidad atmosférica.

- Atmósfera inestable

$$\Delta H = 3,47 \frac{v_s d}{u} + 5,15 \frac{Q_h^{0,5}}{u}$$

- Atmósfera neutra

$$\Delta H = 0,35 \frac{v_s d}{u} + 2,64 \frac{Q_h^{0,5}}{u}$$

- Atmósfera estable

$$\Delta H = -1,04 \frac{v_s d}{u} + 2,24 \frac{Q_h^{0,5}}{u}$$

Donde:

- ΔH es la sobreelevación del penacho (m)

- v_s es la velocidad de salida de la emisión (m/s)
- d es el diámetro de la chimenea (m)
- u es la velocidad media del viento (m/s)
- Q_h es el caudal calórico emitido (KJ/s), con:

$$Q_h = \dot{m}C_p(T_e - T_a)$$

Donde:

- \dot{m} es el flujo másico del gas en la chimenea (kg/s)
- C_p es el calor específico a presión constante del gas de la chimenea (KJ/kg. K)
- T_e es la temperatura absoluta de la emisión (K)
- T_a es la temperatura absoluta del aire ambiente (K)

El flujo másico es:

$$\dot{m} = \frac{\pi d^2 v_s P}{4RT_e}$$

Donde P es la presión barométrica a la salida de la chimenea (kPa)

Fórmula de Briggs – Cabrera

La expresión de este método es la siguiente:

$$\Delta H_{max} = \frac{16F^{1/3}x^{2/3}}{u}$$

Donde F , parámetro de flotabilidad, se puede calcular como:

$$F = gv_s \frac{d^2 (T_e - T_a)}{4 T_a}$$

Donde:

- ΔH_{max} es la sobreelevación del penacho (m)
- x es la distancia horizontal del punto a evaluar medida desde la base de la chimenea (m)
- u es la velocidad media del viento (m/s)
- F es el parámetro de flotabilidad
- v_s es la velocidad de salida de la emisión (m/s)
- g es la aceleración de la gravedad (m/s²)

- d es el diámetro interior de la chimenea (m)
- T_e es la temperatura absoluta de la emisión (K)
- T_a es la temperatura absoluta del aire ambiente (K)

Ejemplo de cálculo de sobreelevación de un penacho

Se supone una chimenea de altura geométrica igual a 50 metros, con un diámetro de boca de 0,4 metros. La velocidad del viento es de 5 m/s, la velocidad de salida de la emisión es de 6 m/s, la temperatura ambiente es de 20°C, y la temperatura de la emisión es de 250°C. Entonces:

Para aplicar la fórmula de Moses – Carson supongamos que se trata de una atmósfera neutra. En ese caso, se debe usar la siguiente expresión:

$$\Delta H = 0,35 \frac{v_s d}{u} + 5,15 \frac{Q_h^{0,5}}{u}$$

Aquí el parámetro que resta calcular es el caudal calórico emitido Q_h , para lo cual es necesario conocer el flujo másico de la emisión \dot{m} y el calor específico del gas emitido a presión constante C_p . El primero de estos es:

$$\dot{m} = \frac{\pi d^2 v_s P}{4RT_e}$$

En esta fórmula se conocen todos los parámetros por letra, salvo la presión barométrica. Por letra, la altura de la chimenea es de 20 metros de altura, por lo que la presión se puede aproximar como la presión al nivel del mar, entonces $P = 1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}$. Entonces, el flujo másico es:

$$\dot{m} = \frac{\pi d^2 v_s P}{4RT_e} = \frac{\pi * (0,4 \text{ m})^2 * \left(6 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) * 101,325 \text{ kPa}}{4 * 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} * \text{K}} * 523 \text{ K}} = 0,0176 \text{ mol/s}$$

Al resultado anterior se lo debe multiplicar por el peso molar del aire 0,02884 kg/mol para obtener el resultado en kg/s. Entonces:

$$\dot{m} = 5,07 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

Luego, para determinar el calor específico del gas emitido, se debe conocer cuál es el calor específico del aire. El valor de este parámetro es $1,012 \frac{\text{J}}{\text{g} * \text{K}} = 1,012 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}$, por lo que el caudal calórico emitido es:

$$Q_h = \dot{m} C_p (T_e - T_a) = 5,07 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 1,012 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * (523 \text{ K} - 293 \text{ K}) = 0,118 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Finalmente, la sobreelevación del penacho para una atmósfera neutra es:

$$\Delta H = 3,47 \frac{v_s d}{u} + 5,15 \frac{Q_h^{0,5}}{u} = 3,47 * \frac{6 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,4 \text{ m}}{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + 5,15 * \frac{\left(0,118 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right)^{0,5}}{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2,02 \text{ m}$$

Por otro lado, si se quiere usar la fórmula de Briggs – Cabrera la cual está dada por:

$$\Delta H_{max} = \frac{16F^{1/3}x^{2/3}}{u}$$

Se debe determinar el punto en el cual se quiere evaluar la sobreelevación del penacho, y como se busca su valor en la descarga, se tomará $x = 1$ m. Además, se debe calcular el parámetro de flotabilidad F , el cual se calcula como:

$$F = gv_s \frac{d^2 (T_e - T_a)}{4 T_a}$$

Se conocen todos los parámetros, por lo tanto:

$$F = gv_s \frac{d^2 (T_e - T_a)}{4 T_a} = 9,81 \frac{m}{s^2} * 6 \frac{m}{s} * \frac{(0,4 m)^2 * (523 K - 293 K)}{4 * 293 K} = 1,85 \frac{m^4}{s^3}$$

Finalmente, la sobreelevación del penacho se puede evaluar a $x = 1$ m:

$$\Delta H_{max} = \frac{16 F^{1/3} x^{2/3}}{u} = \frac{16 \times \left(1,85 \frac{m^4}{s^3}\right)^{1/3} * (1 m)^{2/3}}{5 \frac{m}{s}} = 3,93 m$$

Los valores obtenidos son diferentes, pero de un mismo orden.

7 Normativa

7.1 Aspectos generales

Las normas relativas a contaminación atmosférica se refieren a niveles admisibles para emisiones desde fuentes fijas y desde fuentes móviles, así como a calidad del aire o niveles de inmisión en espacios abiertos. La normativa para espacios cerrados es más frecuente para ambientes laborales, aunque hay *criterios* técnicos desarrollados al respecto también para ambientes domésticos.

Conviene señalar en primer término la diferencia entre **estándares** y **criterios**. Se designan como **estándares** a **valores que tienen fuerza legal**, por lo que su no cumplimiento o violación está sujeto, cuando corresponda, a las puniciones que prevea la ley. En cambio, los **criterios** son o valores numéricos o enunciados descriptivos recomendados para mantener un determinado nivel de calidad del recurso en cuestión, que se asocia con un cierto uso del mismo (por ejemplo, criterios para que sea seguro respirar el aire en un cierto ambiente). Son, entonces, **recomendaciones**; resultan de investigaciones científicas o tecnológicas, estudios estadísticos o epidemiológicos. **No tienen fuerza legal** salvo que les sea conferida explícitamente a través de algún acto jurídico.

Las **normas de emisión** procuran acotar la cantidad de contaminantes que se emiten a la atmósfera desde fuentes fijas o móviles. Esto permite que los emisores sean pasibles de sanciones (multas o incluso la clausura de la fuente, en determinadas condiciones), si sus emisiones exceden los valores reglamentarios. Los valores de las normas de emisión pueden expresarse de diferente manera, según se refieran a concentraciones, como por ejemplo mg/m^3 , mg/Nm^3 (mg por metro cúbico en condiciones normales de presión y temperatura, es decir, a $0^\circ C = 273 K$ y $1 atm$, a nivel del mar); a carga contaminante, como por ejemplo $kg/hora$ o $kg/día$; o a valores específicos, como podría ser el caso de kg/ton producida o kg/kg de materia prima procesada, etc.

Las **normas de inmisión** están fundamentadas en criterios técnicos y epidemiológicos para garantizar la preservación de la salud humana, de otras especies animales y vegetales, y para evitar el daño a bienes materiales. Expresan valores de concentración máxima admisible de diversos contaminantes que no deben ser sobrepasados si se desea respetar los criterios mencionados. Las normas de inmisión permiten evaluar la calidad del aire, pero no asociarla con ninguna causa en particular, porque los valores de inmisión son el resultado de la incidencia conjunta de todas las fuentes de emisión del contaminante en cuestión. También permiten definir criterios para estados de riesgo o de alerta a la población, que en las grandes ciudades están en general asociados con la densidad del tránsito y las condiciones atmosféricas.

7.2 Decreto 135/021

Las bases sobre las que se apoya el Decreto de Calidad de Aire vigente en Uruguay, sancionado el 4 de mayo de 2021, son las guías técnicas propuestas por GESTA Aire en 2012, posteriormente revisadas en 2015 y 2019. Estas han servido como guías para la evaluación y gestión ambiental en lo que refiere al aire, pero no tenían peso legal, algo que se ha vuelto una necesidad prioritaria desde la perspectiva técnica, de la salud y el ambiente, de autorizaciones, del control que la autoridad debe ejercer, e incluso en el marco de acuerdos internacionales suscriptos por nuestro país, entre otros aspectos. Por ello, ha habido consenso la necesidad de un reglamento que contenga estándares de emisiones de fuentes fijas y vehiculares, objetivos de calidad de aire, y mecanismos para la aplicación y control de dicho reglamento.

El Decreto 135/021 sigue la línea de las disposiciones jurídicas vigentes. Entre ellas se pueden mencionar el artículo 47 de la Constitución de la República, que declara de interés general la protección del ambiente, y la Ley General de Protección del Ambiente (Ley N° 17.283, de 28 de noviembre de 2000) que declara de interés general la protección de la calidad del aire. Esta ley prohíbe la liberación de emisiones a la atmósfera de sustancias, materiales o energía, por encima de los límites máximos o de las condiciones establecidas en cada caso que puedan afectar la salud humana, animal o vegetal, deteriorar el ambiente o provocar riesgos, daños o molestias graves a seres vivos o bienes.

Asimismo, sigue recomendaciones de organismos especializados como las Directivas de la Unión Europea, de las Naciones Unidas, la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU (US-EPA) o el Banco Mundial. Promueve la aplicación de las mejores tecnologías disponibles para la minimización de las emisiones al aire y la potenciación de las capacidades nacionales para la protección de la calidad del aire. También considera las necesidades que se deben atender respecto al calentamiento global y la protección de la capa de ozono, para lo cual se prevé tomar medidas tendientes a la reducción de gases de efecto invernadero y contaminantes climáticos de vida corta.

Las principales pautas del Decreto 135/021 se reseñan en esta sección. Su texto completo se ha incluido como Anexo.

7.2.1 Objetivos de calidad de aire

El Decreto 135/021 plantea inicialmente algunos criterios generales y luego, un conjunto de objetivos de calidad de aire que estuvieron vigentes hasta el 31/12/2023 y otros –más estrictos- que entraron en vigencia el 1º de enero de 2024. Es conveniente mencionar previamente a qué se refiere el término “**objetivo**” en este caso.

Los **valores objetivo** u **objetivos de calidad ambiental** se refieren a **metas de mejora** que **se fijan voluntariamente** por parte de los tomadores de decisión, tomando en cuenta las prioridades

nacionales, la asignación de recursos y los plazos para alcanzar tales metas. **Para que un objetivo de calidad ambiental pueda ser considerado como tal** y no como una mera aspiración o declaración de intenciones, debe tener asociados los **correspondientes planes de acción, recursos y plazos**. Se suelen aplicar como instrumentos en la planificación, por lo que resultan ser *escalones o pasos sucesivos en programas de mejora* de la calidad ambiental.

Es importante notar que los niveles de inmisión se plantean como objetivos de calidad ambiental y no como límites que no puedan excederse, a los que se asocie sanciones o puniciones. Los objetivos de calidad de aire vigentes desde el 1º de enero de 2024; se encuentran en la Tabla 7.1. Los cambios realizados tienen que ver mayoritariamente con los valores admisibles para SO₂ y material particulado inhalable y respirable. Se plantea luego la necesidad de establecer guías, protocolos e instructivos para la evaluación de la calidad del aire, en función de cuyos resultados podría resultar necesario diseñar y aplicar planes de acción para mejorar la calidad del aire y satisfacer los valores objetivo previstos en el Decreto.

Tabla 7.1 Objetivos de calidad del aire. Aplicables a partir del 1º de enero de 2024

Contaminante	Período ⁽¹⁾	Concentración ⁽²⁾ (µg/m ³)	Tolerancia ⁽³⁾ No se podrá exceder:
Monóxido de Carbono	1 hora	30000	---
	8 horas móviles	10000	---
Dióxido de Nitrógeno	1 hora	200	260 µg/m ³ en 18 horas al año
	Anual	40	---
Ozono	Máxima diaria ⁽⁴⁾	100	160 µg/m ³ en 25 días en promedios de 3 años
Dióxido de Azufre	1 hora	300	450 µg/m ³ 24 horas en el año
	24 horas	20	95 µg/m ³ en 3 días en el año
	Anual	20	95 µg/m ³ en 3 días en el año
PM2.5	24 horas	25	38 µg/m ³ en 30 días al año
	1 año	15	---
PM10	24 horas	50	75 µg/m ³ en 15 días al año
	1 año	20	---
Plomo	1 año	0,5	---
Azufres Reducidos Totales	30 minutos	10	15 µg/m ³ hasta 40 veces en el año en promedios de 30 minutos
	24 horas	7	11 µg/m ³ hasta 10 días en el año

⁽¹⁾ Por período se entiende la media aritmética de los datos correspondiente al tiempo que en cada caso se indica. El período de medición de 1 hora sólo será de aplicación en los monitoreos continuos.

⁽²⁾ Las mediciones de concentración corresponden a T = 293 K y P = 1013 hPa.

⁽³⁾ El exceso en el nivel de concentración de cada parámetro no podrá superar el valor máximo que se indica, en el tiempo que se señala.

⁽⁴⁾ Máxima diaria es el valor resultante de los promedios móviles octohorarios.

7.2.2 Estándares de emisión desde fuentes fijas

El capítulo III del Decreto comienza por definir, en su artículo 10, los principales conceptos que se aplicarán después⁵:

Artículo 10 (Definición). A los efectos del presente reglamento, los **estándares de emisión de fuentes fijas** corresponden a la **concentración máxima admisible** de gases o partículas generados por un proceso u operación antrópicas o con participación humana, localizable en un lugar geográfico determinado.

Se entiende por **fente fija puntual**, cualquier edificación o instalación donde se realizan operaciones que dan origen a la emisión al aire de compuestos que se evacúan o liberan por una chimenea o lo que oficie como tal.

⁵ Los resultados no están en el Decreto, se han puesto sólo a efectos de facilitar la lectura.

Por **fuentes fijas difusas** se entienden aquellas emisiones que no se encuentran canalizadas a través de un punto de descarga, como las que provienen de la manipulación de sustancias volátiles (como los solventes), emisiones de gases olorosos, fugas de equipos, tanques de mezcla, liberación de polvo por operaciones de transporte, emisiones generadas en unidades de tratamiento de efluentes y residuos o en almacenamientos de materiales sólidos, entre otros.

Luego, en el artículo 11 se establecen cuáles son las fuentes fijas comprendidas en el Decreto y en el artículo 12, las que quedan excluidas. El artículo 13 estipula que los estándares son de obligado cumplimiento en condiciones de régimen.

Artículo 11 (Alcance). Los estándares de emisión serán de aplicación y deberán ser cumplidos por toda fuente fija puntual, ya sea nueva o existente a la fecha de publicación del presente decreto, que tenga algún tipo de emisión al aire, dentro de algunas de las actividades o ramos de actividad siguientes:

- a) combustión para generación de energía,
- b) fabricación de clinker y cal,
- c) coprocesamiento en hornos de clinker,
- d) fabricación de papel y celulosa,
- e) fabricación de ácido sulfúrico y fertilizantes,
- f) refinación de petróleo,
- g) fundición de metales y acería,
- h) incineración de residuos⁶, y,
- i) otras actividades no comprendidas en las anteriores.

Cuando en una misma instalación o emprendimiento se desarrolle más de una de las actividades referidas, se deberá cumplir con los estándares de emisión correspondientes a cada una de ellas, y, cuando corresponda, con los niveles máximos aplicables a los Compuestos Orgánicos Volátiles.

Artículo 12 (Excepciones)⁷. Quedan exceptuados de lo dispuesto en el artículo anterior, los pequeños emisores de fuentes fijas puntuales, entendiéndose por tales:

- a) los emisores comprendidos en el **sector residencial**, cuando se trate de viviendas unitarias o con sistemas de calefacción individual;
- b) los emisores del sector **residencial, servicios y comercio**, que tengan asociados procesos de combustión con **potencia térmica inferior a 0,5 MW** (medio megawatt); y,
- c) los emisores de otras actividades que por su poca significación el Ministerio de Ambiente resuelva que deben integrarse a la categoría de pequeños emisores.

Artículo 14 (Aplicación). Sin perjuicio de los estándares de emisión que se establecen en este reglamento, la Dirección Nacional de Medio Ambiente **podrá agregar nuevos parámetros de emisión o hacer más exigentes los establecidos** por estas normas, siempre que existan razones técnicas justificadas en función de la significancia (carga y tipo de compuestos) de la emisión de la fuente fija, las características del entorno donde se localiza, la evaluación de los impactos acumulativos y los niveles de base de calidad de aire en el área de influencia en relación a los objetivos de calidad.

⁶ El artículo 27 indica que están excluidos los sistemas e incineración de residuos sanitarios, por estar bajo las disposiciones del Decreto 586/009.

⁷ Los resaltados no están en el Decreto, se han puesto sólo a efectos de facilitar la lectura.

*En casos particulares, la Dirección Nacional de Medio Ambiente **podrá disminuir las exigencias** establecidas, siempre que el interesado demuestre que la carga emitida no alterará significativamente la calidad del aire.*

Artículo 16 (Complementariedad). *Los estándares de emisión establecidos en el presente reglamento **no sustituyen aquellos estándares de emisión más estrictos o para otros compuestos**, que se hubieran **establecido mediante autorizaciones ambientales** otorgadas con anterioridad a la publicación del presente.*

Se establecen disposiciones para otros emisores no mencionados en el artículo 11. También se establecen los lineamientos para monitoreo, trasmisión/reporte de datos a la Autoridad Ambiental y los niveles de tolerancia. A estos últimos se refiere el artículo 32:

Artículo 32 (Niveles de tolerancia). *Los niveles de tolerancia en el no cumplimiento de los estándares de emisión seguirán los siguientes criterios:*

a) *Monitoreos continuos: el 90 % de todos los valores medios diarios de un año calendario deben estar por debajo de los estándares de emisión.*

Los valores medios diarios son el resultado del promedio de mediciones con una frecuencia de 10 minutos o menor.

Ningún valor medio diario puede exceder en 130 % (ciento treinta por ciento) del estándar de emisión.

b) *Monitoreos discretos: el valor límite de emisión corresponde al máximo establecido como estándar de emisión en el presente reglamento.*

A esos efectos, al momento de la toma de cada muestra, los emprendimientos deberán estar operando como mínimo al 90 % (noventa por ciento) de la capacidad de operación promedio de los últimos 12 (doce) meses. Dicho porcentaje de operación deberá estar basado en los datos del tipo y consumo de combustible, de la producción o de la carga, según corresponda.

Se crea la **Autorización de Emisión**, que el Ministerio deberá explicitar en todos sus términos en cuanto a contenidos y tramitación en un plazo de no más de seis meses desde la publicación del Decreto, que resulta obligatoria para las actividades mencionadas en el artículo 35. Se trata de una autorización que deberá renovarse cada tres años y que, en el caso de nuevos emisores, deberá tramitarse antes de iniciar la fase de operación. Para emisores existentes, el Ministerio de Ambiente establecerá un calendario por rubro para la adecuación de las emisiones, de modo que en un lapso máximo de cinco años se haya regularizado la totalidad de las fuentes.

Artículo 35 (Autorización de emisión). *Requerirán contar con Autorización de Emisión vigente, las actividades que se detallan a continuación, sean las mismas de titularidad pública o privada:*

a) *La **industria manufacturera** definida según la clasificación Internacional Industrial Uniforme de las Naciones Unidas en su última versión vigente, adaptada para el Uruguay por el Instituto Nacional de Estadística.*

b) *El fraccionamiento o almacenamiento de **sustancias y productos peligrosos**, cuando involucren sustancias **volátiles**.*

c) *Las entidades de **reciclado, tratamiento y o disposición final de residuos sólidos** de cualquier tipo, de las cuales se deriven emisiones a la atmósfera.*

d) *La **generación de energía eléctrica**, cuando de esta actividad se generen emisiones a la atmósfera.*

e) *Otras actividades que involucren **procesos de combustión de potencia térmica superior a 40 MW**.*

f) *Aquellas otras actividades que así lo disponga el Ministerio de Ambiente.*

El Ministerio de Ambiente establecerá las condiciones para la efectiva aplicación del presente reglamento a las actividades comprendidas, así como determinará el alcance de las mismas, teniendo en cuenta la magnitud y dimensión de la actividad, y la significancia de la emisión.

7.2.3 Estándares de emisión desde fuentes móviles

Al igual que en el caso de fuentes fijas, el capítulo del Decreto 135/021 referente a fuentes móviles comienza con las definiciones y alcance (artículos 41 y 42). Se aclara que la normativa no resultará de aplicación para los vehículos que ingresen en forma transitoria al país, aunque deberán tramitar una autorización temporal de circulación. Adicionalmente, se establece que los vehículos en circulación a la fecha de sanción del Decreto serán objeto de estrategias coordinadas entre el Ministerio de Ambiente, el MTOP y el MIEM para reducir sus emisiones de gases y partículas. En lo que sigue, se transcriben los artículos 41 a 44, que hacen alusión a los puntos mencionados en este párrafo.

Artículo 41 (Definición y alcance). *A los efectos del presente reglamento, se entiende por estándares de emisión de fuentes móviles, los valores máximos de gases y partículas que un motor o vehículo puede emitir bajo condiciones normalizadas. No quedan comprendidos en este reglamento, las aeronaves cualquiera sea su tipo, ni los buques y artefactos navales.*

Artículo 42 (Prohibición). *A partir del plazo de 2 (dos) años, contados a partir de la fecha de publicación del presente decreto, prohíbese la importación de vehículos automotores que no cumplan o no se encuentren homologados respecto del cumplimiento de los estándares de emisión de fuentes móviles que se establecen en este reglamento.*

Asimismo, en igual plazo, prohíbese la comercialización de vehículos automotores cero km que no cumplan con las mismas condiciones.

Artículo 43 (Vehículos en circulación). *El Ministerio de Ambiente establecerá, en coordinación con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, el Ministerio de Industria, Energía y Minería y las intendencias, las estrategias para disminuir las emisiones vehiculares tanto de partículas como de gases, provenientes del parque vehicular que se encuentre en circulación a la fecha de publicación de este decreto y, en especial, a la entrada en vigencia de la prohibición prevista en el artículo anterior.*

Artículo 44 (Excepción). *Los estándares de emisión de fuentes fijas no serán de aplicación a aquellos vehículos que ingresen al territorio nacional en forma transitoria, sea para competencias, exhibiciones o con destino a proyectos experimentales para evaluación de tecnologías. El Poder Ejecutivo podrá establecer otras excepciones temporales.*

En todos los casos a los que refiere el inciso anterior, se requerirá la autorización temporal del Ministerio de Ambiente.

El artículo 45 establece una clasificación de vehículos automotores alineada con la que se emplea a nivel internacional. La misma se detalla en la Tabla 8.1. Luego, los niveles de emisión se dan en los artículos siguientes, tomando en consideración la clasificación y el tipo de motor (de encendido por chispa o por compresión). Los estándares que aparecen en el Decreto son compatibles con la norma europea Euro 5 (Reglamento (CE) N° 715/2007).

8 Índices de calidad del aire

8.1 Aplicaciones

Los índices de calidad del aire se crearon para transmitir a la población, en un lenguaje llano y fácil de comprender, cuál es la condición de calidad del aire en cierto momento y en cierto lugar.

Tabla 8.1 Categorías de vehículos automotores consideradas en el Decreto 135/021^(1, 2)

	Tipo	Ruedas	Asientos	Peso ⁽⁴⁾ PBT	Masa de referencia ⁽⁵⁾	
					Livianos	Pesados
M	Para transporte de pasajeros	≥ 4	--	--	≤ 2610 kg	> 2610 kg
M1		--	≤ 8 ⁽³⁾	--		
M2		--	> 8 ⁽³⁾	≤ 5 Ton	--	Todos
M3		--	> 8 ⁽³⁾	> 5 Ton		
N	Para transporte de carga	≥ 4	--	--	≤ 2610 kg	> 2610 kg
N1		--	--	≤ 3,5 Ton		
N2		--	--	> 3,5 Ton ≤ 12 Ton	--	Todos
N3		--	--	> 12 Ton		

⁽¹⁾ Por vehículo automotor se entiende todo vehículo autopropulsado, apto para circular por carretera, que se mueve por sus propios medios, que posee por lo menos cuatro ruedas y un sistema de dirección propia, que sirve directamente para el transporte de personas y/o cargas o para tracción de otros vehículos sin motor.

⁽²⁾ La categorización se basa en la resolución consolidada de las Naciones Unidas sobre la construcción de vehículos (ECE/TRANS/WP.29/78/Rev. 6).

⁽³⁾ Además del asiento del conductor.

⁽⁴⁾ Por peso bruto total o PBT, se entiende el peso máximo del vehículo, constituido por la suma de la tara más su carga útil; siendo la tara el peso propio del vehículo, considerando incluido en él, el peso de los fluidos y del combustible contenido en el depósito (que estará lleno hasta el 90% de su capacidad como mínimo), de las herramientas, accesorios, ruedas de auxilio, extintor de incendio y demás equipamientos necesarios para su funcionamiento, sin conductor, ni pasajeros ni carga; y, la carga útil, la capacidad de carga del vehículo, incluyendo el peso de los usuarios.

⁽⁵⁾ Por masa de referencia se entiende la tara del vehículo, incrementada en un valor uniforme de 100 kg.

Sirven para difundir a la población, información acerca del estado de calidad del aire en función de datos que se obtienen en tiempo real, por ejemplo en la red telemétrica de monitoreo de calidad de aire de una ciudad, de modo de advertir acerca de áreas en las que no es conveniente circular o si debe declararse una situación de emergencia ambiental.

Los índices de calidad del aire no suelen formar parte de la normativa de calidad de aire, a menos que alguna disposición jurídica explícita así lo establezca.

En general, los índices se obtienen a partir de los valores de concentración de algunos de los siguientes seis parámetros (o de todos ellos): CO, partículas, SO₂, O₃, NO₂ y polvo inhalable.

Se suelen construir a partir de funciones lineales segmentadas donde los puntos de inflexión marcan los distintos patrones de calidad. A través de esas funciones que asocian las concentraciones de cada contaminante con un valor del índice, se obtiene un patrón de calidad de aire referido a cada uno de los contaminantes en cuestión.

El valor que se informa a la población suele corresponder, por criterio preventivo y de seguridad, al peor de los patrones de calidad de aire que se obtiene en un momento dado para cada uno de los contaminantes considerados.

8.2 El Índice de Calidad de Aire de Montevideo ICAire

El Índice de calidad de Aire de Montevideo, ICAire, es un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica asociados a una zona determinada de la ciudad, en un cierto tiempo de monitoreo. Se calcula a partir de una función que tiene en cuenta los niveles de calidad recomendados por diferentes organismos internacionales. Considera los valores medidos obtenidos para los

contaminantes que se muestrean en la red de monitoreo de calidad de aire de Montevideo: partículas totales (PTS), PM₁₀, humo negro, SO₂, NO₂, CO y ozono.

El ICAire no es un índice predictivo sino meramente informativo. Su valor se publica semanalmente en el sitio Web de la Intendencia de Montevideo, a través de dos informes: uno donde se incluyen los registros de las cuatro estaciones orientadas a la evaluación de la calidad base de la ciudad (Ciudad Vieja, Tres Cruces, Curva de Maroñas y Colón); y otro orientado a evaluar el impacto generado por las fuentes más significativas de Montevideo, para lo que se emplean los datos de las estaciones ubicadas en el Palacio Legislativo y en La Teja. En cada estación se informa el peor valor (o sea, el más alto) obtenido en la semana anterior. El Índice se calcula para cada contaminante por separado en cada una de las estaciones de muestreo que integran la red de monitoreo de la ciudad. Se asigna un valor de 100 a la concentración en el aire de ese contaminante que la Organización Mundial de la Salud (OMS) considera la máxima deseable en el aire urbano. En consecuencia, un ICAire menor o igual a 100 corresponde a la calificación de buena o aceptable para las actividades que se realizan al aire libre, y un valor superior a 100 indica un empobrecimiento de la calidad del aire.

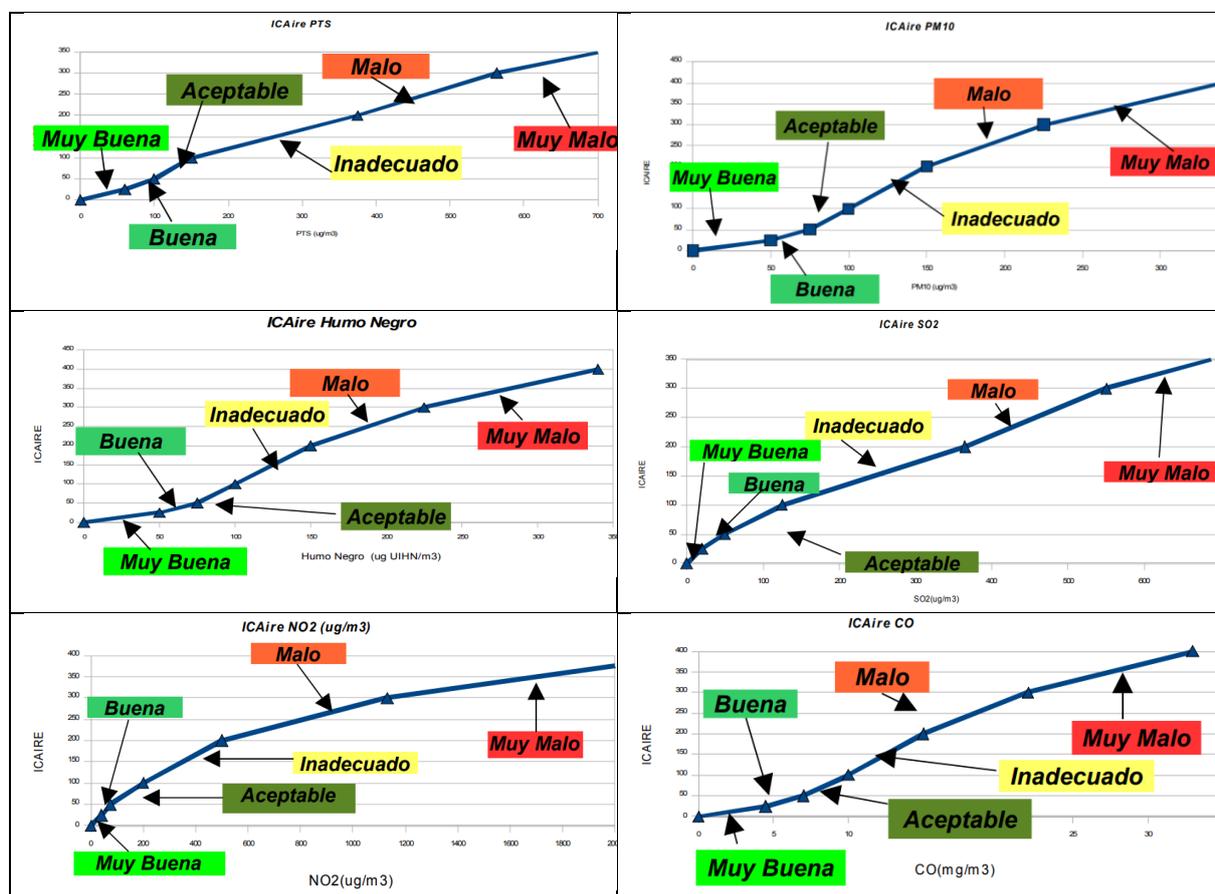


Figura 8.1 Funciones continuas a trazos que definen el ICAire Montevideo (tomado de [icaire2010_0.pdf \(montevideo.gub.uy\)](http://icaire2010_0.pdf(montevideo.gub.uy)))

Los puntos de cambio de nivel y denominación de las categorías según estos niveles para cada uno de los contaminantes considerados actualmente se indican en la Figura 8-2.

Lapso muestreo en horas	PTS	PM10	Humo Negro	SO2	NO2	CO	O3	Indice	Calidad
	ug/m ³								
	24	24	24	24	1	8	8		
Nivel 1	100	75	75	50	75	7	100	50	Buena
Nivel 2	150	100	100	125	200	10	160	100	Aceptable
Nivel 3	375	150	150	365	500	15	240	200	Inadecuada
Nivel 4	563	225	225	550	1130	22	540	300	Mala
Nivel 5	845	340	340	825	2260	33	1080	400	Muy mala

Tabla 1: Valores guía utilizados hasta el 2009 en la publicación del ICAire.

Figura 8-2. Niveles de ICAire considerados actualmente para cada contaminante. Tomado de: https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/icaire2010_0.pdf

9 Contaminación urbana

Los problemas de calidad de aire en la ciudad suelen ser complejos, tanto por la multiplicidad de fuentes y condiciones de emisión que coexisten como por los patrones de circulación de aire obstaculizados irregularmente por los edificios, los gradientes térmicos que derivan no sólo de las dificultades de ventilación sino de las actividades antropogénicas que normalmente entregan al medio un caudal calórico no despreciable y los fenómenos atmosféricos particulares, incluidos los derivados del fenómeno de isla caliente.

9.1 Esmog Ácido y Esmog Fotoquímico

El término **esmog** (castellanización del término inglés “smog”, de “smoke” -humo- y “fog” -niebla) surgió por la necesidad de describir los fenómenos que caracterizaban a la atmósfera londinense a mediados del siglo XX. Se trataba de situaciones en que los atributos principales eran la opacidad y elevada densidad del aire, con significativa reducción de la visibilidad. Esa atmósfera persistentemente opaca, gris, densa, tenía elevadas concentraciones de SO₂ y H₂SO₄, tanto que hacia 1952 – 1953 se registró un gran número de muertes humanas debido a problemas respiratorios. En ese caso, se trataba de episodios de **esmog ácido**, también llamado *esmog gris*, *esmog sulfuroso* o *esmog reductor*, donde la densa niebla gris mantenía un elevado contenido de ácido sulfúrico en suspensión y en condiciones de ser respirado (Figura 9.1).



Figura 9.1 Esmog ácido en Londres hacia 1950 (tomado de <https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/CA/illustrations/London52.html>)

Esta forma de contaminación del aire es también capaz de afectar la supervivencia de los vegetales y la conservación de edificios, estatuas, monumentos y otros materiales, principalmente en zonas

urbanas. Hoy día el esmog ácido no reviste una gran importancia como problema ambiental, ya que su principal causa está mayormente controlada: el contenido de azufre como impureza en los combustibles, que se controla por técnicas de desulfurización.

También pueden ocurrir episodios de esmog (es decir, de atmósfera densa con o sin reducción de la visibilidad) en condiciones muy diferentes a las anteriores. En particular, cuando ocurren en grandes ciudades en condiciones atmosféricas de poca humedad e intensa radiación solar, favorecidas a veces por características geográficas particulares, se habla de **esmog fotoquímico** (Figura 9.2).

Durante los episodios de “*esmog oxidante*” o “*esmog fotoquímico*”, la atmósfera adquiere un aspecto opaco, amarronado-rojizo, y se mantienen niveles elevados de oxidantes que tienen efectos irritantes para las personas. También pueden afectar en forma adversa a los vegetales y a algunos materiales.



Figura 9.2. La ciudad de Medellín a las 7:00 (izquierda) y a las 18:00 (derecha)

Los principales contaminantes primarios o precursores del esmog fotoquímico se asocian con emisiones de fuentes móviles: óxidos de nitrógeno e hidrocarburos. Éstos reaccionan para formar oxidantes fotoquímicos (O₃, PAN, aldehídos), con la energía proveniente de la radiación solar ultravioleta como catalizador. Esos contaminantes secundarios son agentes irritantes fuertes.

En la Tabla 9.1 se presenta un cuadro comparativo de las principales características del esmog ácido y del esmog fotoquímico.

Tabla 9.1 Esmog ácido y esmog fotoquímico: comparación

	Esmog Ácido	Esmog Fotoquímico
Característica	Reductor	Oxidante
Condición atmosférica	Elevada humedad, niebla	Elevada radiación solar
Contaminantes primarios	SO ₂	NO, HC
Principales fuentes emisoras	Fuentes fijas	Transporte terrestre
Contaminantes secundarios	H ₂ SO ₄	O ₃ , NO _x , PAN, aldehídos
Duración usual del episodio	Días (hasta que se disipe la niebla)	Horas de insolación elevada
Intensidad del viento	Calma	Calma

9.2 Reacciones fotoquímicas

Son aquellas que requieren un aporte de energía adicional para su ocurrencia y ésta es proporcionada por la luz solar, en forma de radiación luminosa. En efecto, el solo estado termodinámico de los reactivos no

permitiría la ocurrencia de la reacción, pero al recibir un suplemento energético ésta sí tiene lugar. La energía adicional requerida se puede expresar como un múltiplo de la constante de Planck h y resulta ser de la forma $h \cdot \nu$ ($h = 6,62 \times 10^{-34}$ J.s), siendo ν la frecuencia de la onda, en Hertz. Como las ondas de mayor frecuencia son las comprendidas desde el rango de luz visible hacia las radiaciones ultravioletas (o sea, hacia longitudes de onda menores), muchas veces la ocurrencia de la catálisis fotoquímica está condicionada a la presencia de radiación UV. Esto tiene una estrecha conexión con los problemas ambientales globales actuales, ya que la radiación UV que llega a la Tierra se incrementa progresivamente.

El monóxido de nitrógeno, NO, es el principal **contaminante primario**, más allá de que se emitan también cantidades menores de dióxido de nitrógeno e hidrocarburos no quemados.

Los **contaminantes secundarios** son un conjunto de oxidantes fuertes, entre los que cabe mencionar O_3 , NO_x , PAN, aldehídos. A veces los procesos de smog fotoquímico también se relacionan con procesos de acidificación, dado que puede ocurrir formación neta de NO_x que se conviertan luego en HNO_3 .

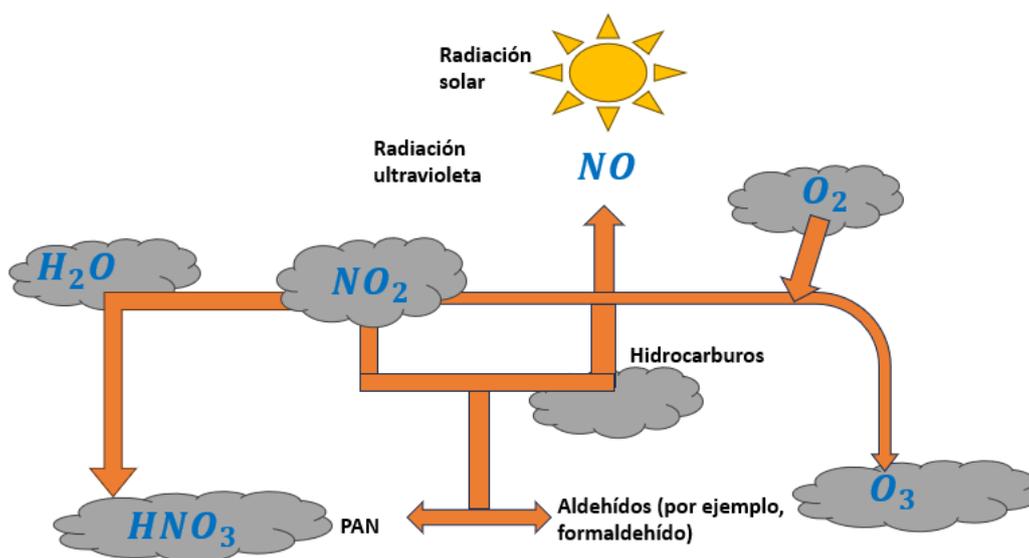


Figura 9.3 Esquema de formación del smog fotoquímico (redibujado de Echeverri, 2012)

Las reacciones fotoquímicas responsables de la producción de oxidantes en los procesos de smog fotoquímico se ven favorecidas por condiciones de fuerte insolación y vientos débiles, que dificultan la dispersión de los contaminantes.

La química de estas reacciones es muy compleja y a nivel cuantitativo se estima que no se conoce en su totalidad. Pese a ello, genéricamente se pueden reconocer cuatro fases:

- Reacciones *de iniciación*, en las que se forman radicales libres.
- Reacciones *de rama*, en las que se incrementa el número de radicales libres disponibles.
- Reacciones *de propagación*, en las que la naturaleza química de los radicales libres se va modificando.
- Reacciones *de terminación*, en las que se forman productos estables como final del proceso.

En la Figura 9-4 se esquematizan los principales ciclos fotoquímicos del smog: el ciclo de los NO_x y el de los hidrocarburos.

de mayor tráfico, siempre y cuando se den las condiciones para que la luz solar actúe como catalizador (Figura 9.5).

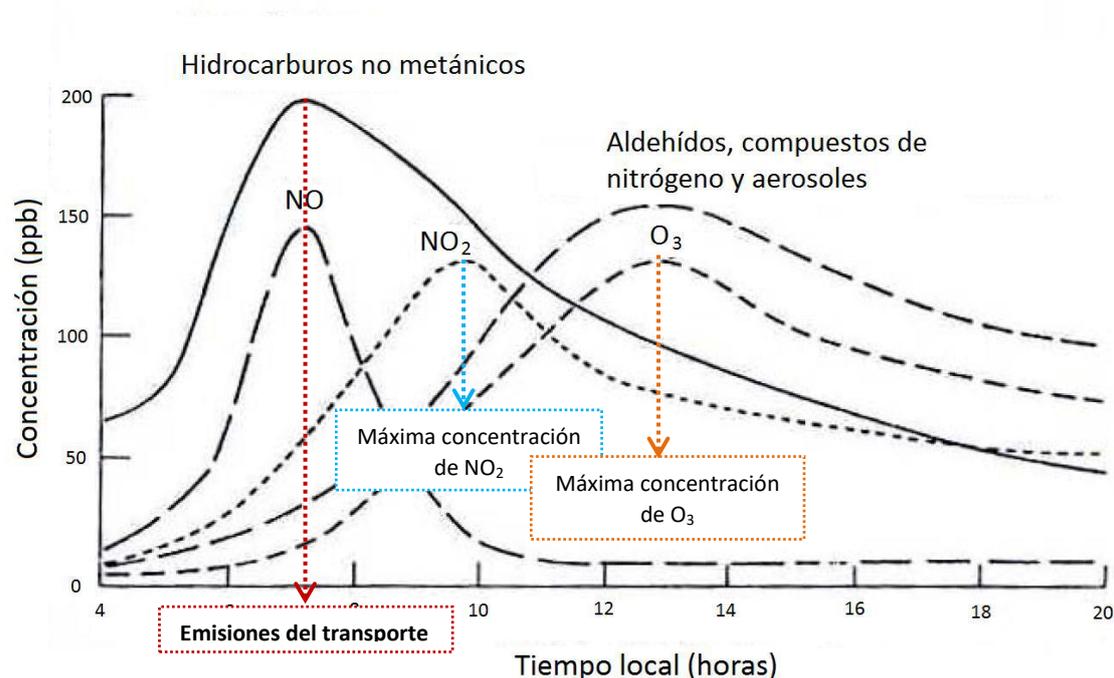


Figura 9.5 Evolución de las concentraciones de contaminantes primarios y secundarios en un episodio de smog fotoquímico (adaptado de Echeverri, 2012)

9.4 Medidas de gestión para atenuar las consecuencias adversas de los procesos de smog fotoquímico

La mayoría de las medidas de gestión pasan por disminuir el tráfico automotriz y abatir sus emisiones. Algunas medidas posibles son:

- Mejorar la eficiencia del transporte vehicular, tendiendo a promover el transporte público en desmedro del vehículo personal.
- Controlar las emisiones de gases de escape de los vehículos e imponer sanciones por incumplimiento.
- Controlar el uso obligatorio de convertidores catalíticos en los vehículos que lo requieren.
- Fomentar el uso de vehículos con fuentes de energía alternativas (por ejemplo, vehículos eléctricos).
- Fomentar el transporte activo cuando sea una opción razonable.
- Planificar las intervenciones urbanísticas, tanto en lo relativo a edificación como a circulación vehicular. En lo relativo a ordenanzas de edificación, es bastante lo que hay por hacer y lo que puede lograrse. En la Figura 9.6 izquierda se muestra la circulación de aire en un cañón urbano, mientras que en la derecha se muestra una aplicación de un modelo desarrollado sobre emisiones de vehículos en ambiente urbano; esta aplicación del modelo muestra el resultado de los niveles de concentración de un contaminante atmosférico en la columna de aire, partiendo desde 1,5 metros (asterisco blanco en la figura). En la Figura , se ve cómo decaen las concentraciones en vertical a medida que se incrementa

la altura en el cañón; a 3,5 m de altura la reducción de la concentración del contaminante considerado es de aproximadamente un 35 % respecto de la concentración inicial a 1,5 m de altura.

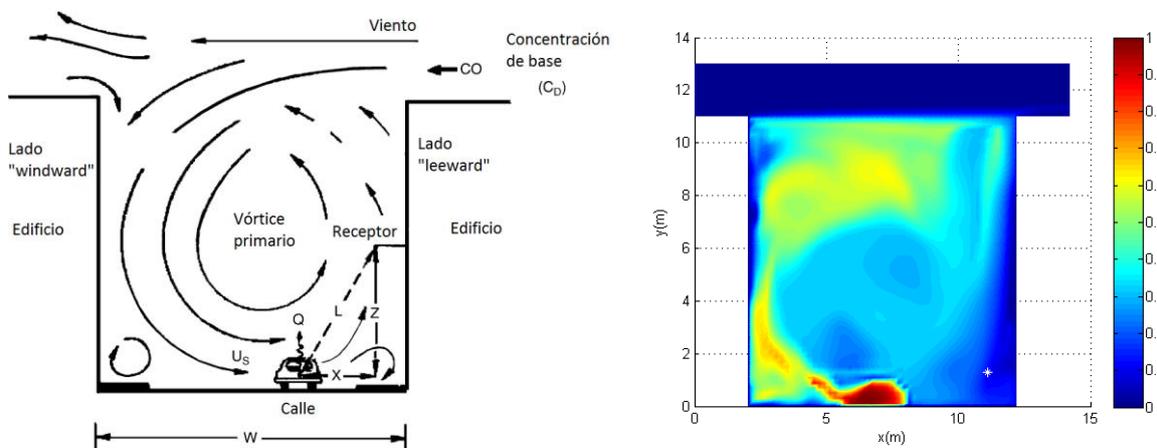


Figura 9.6 Circulación de aire en un cañón urbano. Izq.: bibliografía; der.: modelación en IMFIA (tomado de D'Angelo Taibo, 2016)

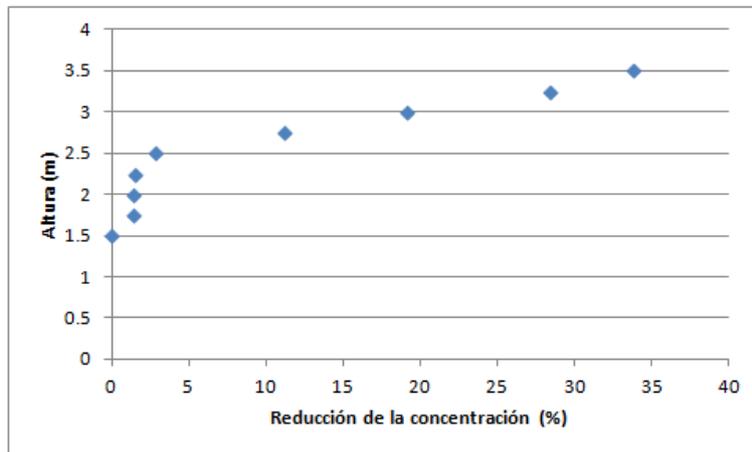


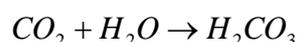
Figura 9.7 Porcentaje de reducción de la concentración de CO con la altura de la edificación en un cañón urbano (altura inicial = 1.5 m) (tomado de D'Angelo Taibo, 2016)

Algunas medidas que se han aplicado en otros países incluyen la restricción de circulación en función de la terminación par o impar de la patente o en función del sistema "pico y placa", por el que un día por semana cierta terminación de patente (placa) no puede circular en horarios pico. No han resultado demasiado exitosas ya que o bien las familias optan por tener más de un vehículo (cuando su posibilidad económica lo permite), o bien las horas con mala calidad del aire a lo largo del día se incrementan.

10 Problemas regionales de contaminación de aire: Lluvia Ácida

10.1 Generalidades

La lluvia tiene naturaleza ácida debido al barrido atmosférico que efectúa al caer, arrastrando gran cantidad de impurezas y ácido carbónico naturalmente presente en la atmósfera. El pH usual de la lluvia es próximo a 5,6 y se debe a la formación natural de ácido carbónico en la atmósfera, a partir de CO₂.

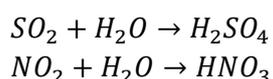


Cuando el pH baja de 5,6, se habla de *lluvia ácida*. Los valores de pH que caracterizan a la lluvia ácida oscilan entre 4,5 y 5,6; en casos excepcionales, se han registrado valores de pH próximos a 3. Los daños a plantas y animales acuáticos (peces) se comienzan a notar recién cuando el pH baja a 4,5 o menos.

La acidificación de la lluvia se debe a la incorporación y formación de compuestos ácidos en la atmósfera a partir de emisiones gaseosas principalmente antropogénicas (industriales, vehiculares, etc.). Los ácidos que participan mayoritariamente en la lluvia ácida son el ácido sulfúrico H_2SO_4 y el ácido nítrico HNO_3 ; ambos son ácidos inorgánicos fuertes.

El proceso de generación de lluvia ácida comienza cuando se liberan a la atmósfera sus contaminantes primarios, SO_2 y NO_x , como productos no deseados de procesos de combustión. El azufre está presente como impureza en los combustibles fósiles y su emisión se asocia principalmente con fuentes fijas, en tanto el nitrógeno proviene mayoritariamente del aire que actúa como comburente y se asocia sobre todo con fuentes móviles. A partir de ese momento, pueden ser transportados a distancias que llegan a ser de cientos de km, aunque también participan en diferentes reacciones químicas.

Las reacciones principales involucradas corresponden a la formación de moléculas de ácido a partir de los óxidos presentes en la atmósfera (se anotan cualitativamente, sin igualar):



En realidad, el proceso es un poco más complejo, ya que cada una de esas reacciones ocurre en varios pasos.

Estos ácidos pueden volver a la superficie terrestre por vía húmeda (lluvia ácida) o como deposición seca (partículas de nitratos y sulfatos). En este segundo caso, por lo general la deposición ocurre a corta distancia de la fuente de emisión.

10.2 Causas antropogénicas de la lluvia ácida

Globalmente, el problema de la lluvia ácida puede asumirse como parcialmente natural y parcialmente antropogénico. Entre las causas naturales se destacan las emisiones sulfúricas asociadas con las erupciones volcánicas y las descargas eléctricas que tienen que ver con la formación de óxidos de nitrógeno. Desde el punto de vista antropogénico, el problema se origina a partir de las alteraciones que el hombre ha impuesto a los ciclos naturales del azufre y el nitrógeno con el objetivo de generar energía para las actividades y confort relacionados con su estilo de vida.

Como el tiempo de residencia en la atmósfera del SO_2 es de 1 a 6 días, y el de los NO_x es de 2 a 20 días, esto los hace susceptibles de moverse en la atmósfera. Pueden ser trasladados por el viento a distancias de hasta cientos de kilómetros, sobre todo cuando son emitidos a la atmósfera desde chimeneas de gran altura efectiva, que disminuyen la contaminación en las cercanías, pero pueden facilitar su transporte advectivo hacia lugares más lejanos. Por ello, a pesar de que la lluvia ácida se origina sobre todo en centros urbanos o industriales, sus efectos pueden ocurrir a grandes distancias. De hecho, el inicio de los estudios sobre acidificación de la lluvia, en la década de los '70, fue consecuencia de la contaminación transfronteriza de gran distancia que generaba precipitaciones de muy bajo pH en los países escandinavos a partir de las emisiones provenientes de Europa continental e Inglaterra.

En la mayoría de los eventos de lluvia ácida, el SO_2 suele ser el contaminante primario principal; éste es emitido por varias fuentes, entre las que se destaca la quema de combustibles fósiles. Los combustibles más pesados contienen mayor tenor de azufre; éste se oxida en la combustión y se emite casi totalmente como SO_2 . Una vez emitido, el SO_2 se oxida a trióxido de azufre (SO_3), que reacciona con agua y forma ácido sulfúrico (H_2SO_4). El SO_2 es más soluble en agua que el CO_2 y el H_2SO_4 es un ácido más fuerte que el H_2CO_3 ; en consecuencia, aún en pequeñas cantidades el SO_2 tiene mayor efecto sobre el pH de la lluvia que el CO_2 atmosférico.

La tendencia mundial a reducir las emisiones de azufre aplicando técnicas de desulfurización de combustibles previo a su empleo es exitosa; nuestro país también ha tomado esta opción. Como en general los combustibles más pesados se emplean en fuentes fijas, también el control se vuelve más viable y realista. (Si bien los vehículos de ciclo diésel emplean combustibles con mayor contenido de azufre que los de ciclo Otto o nafteros, son de todos modos combustibles mucho más limpios que los que se emplean en fuentes fijas).

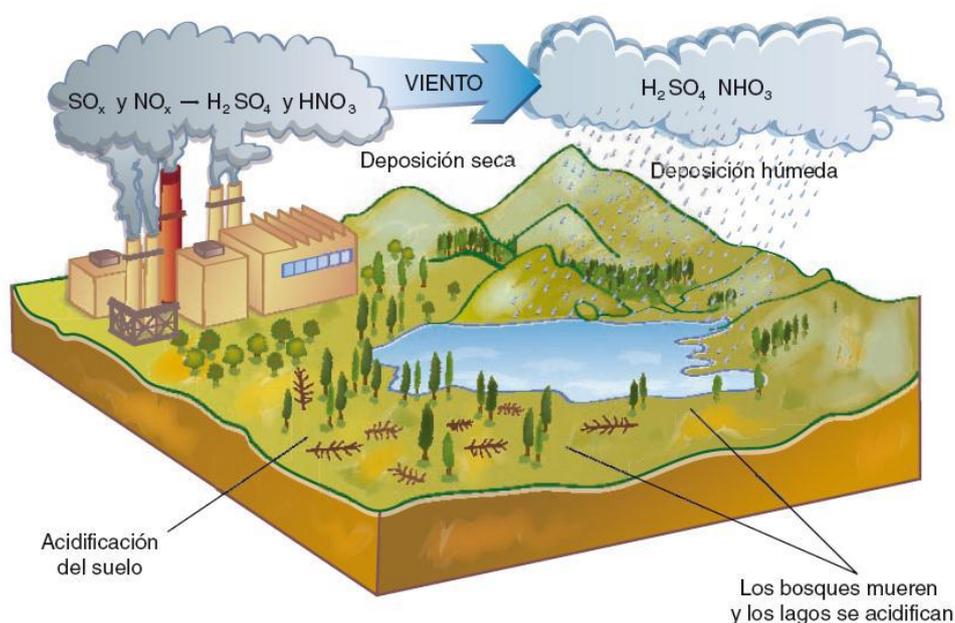


Figura 10.1 Lluvia ácida y fenómenos conexos (tomado de Echeverri, 2012)

Los óxidos de nitrógeno NO_x están vinculados sobre todo a las emisiones del transporte, por lo que su control es mucho más arduo y para su abatimiento debe pensarse en medidas de más lenta y compleja implementación. Año a año la flota automotriz crece, y aunque la tecnología mejore la calidad de las emisiones individuales (por ejemplo, los convertidores catalíticos reducen los óxidos de nitrógeno antes de su emisión, de modo que en vez de NO_x se emite N_2), no es suficiente para contrarrestar el incremento asociado al crecimiento mundial de la flota vehicular; de ahí la necesidad de actualizar la flota vehicular a tecnologías menos contaminantes.

Actualmente, altas proporciones de ácido nítrico en la lluvia ácida indican gran probabilidad de que las fuentes móviles sean las causantes del fenómeno, en tanto altas concentraciones de ácido sulfúrico sugiere que las fuentes principales son estacionarias.

El problema de la *acidificación* no se limita únicamente a la lluvia, sino que engloba también a la *deposición ácida*, cuyos mecanismos y causas son semejantes a los de aquella. Las moléculas de SO_2 y NO_x emitidas

a la atmósfera pueden transformarse en partículas de sulfatos o de nitratos, los que más tarde se pueden combinar con vapor de agua dando ácido sulfúrico o nítrico. En las zonas donde las concentraciones de los precursores de la lluvia ácida son altas –cerca de las fuentes emisoras– la deposición seca es más probable que la húmeda; a gran distancia de las fuentes predomina la deposición húmeda (lluvia).

10.3 Consecuencias de la lluvia y deposición ácidas

Entre las múltiples consecuencias de la lluvia y deposición ácidas se encuentran: la acidificación de cuerpos de agua, efectos sobre suelos, cuerpos de agua, flora, fauna, bienes materiales, etc. Estos efectos se comentan en los acápites siguientes.

10.3.1 Acidificación de suelos

Los fenómenos de acidificación de suelos están vinculados no sólo con el efecto de la lluvia de bajo pH sino con la deposición de partículas ácidas emitidas por diversas fuentes o formadas a partir de sus emisiones.

Los suelos naturalmente ácidos se deterioran mucho más rápidamente, debido a su escasa capacidad de amortiguación. Por ello, pueden perder rápidamente sus posibilidades de sustentar diversas formas de vida y quedar yermos en cortos períodos.

Las áreas de cultivo no son tan vulnerables a los efectos de la lluvia ácida, ya que generalmente son tratadas con fertilizantes que restituyen nutrientes y amortiguan la acidez. Además, los suelos agrícolas son en general de naturaleza alcalina.

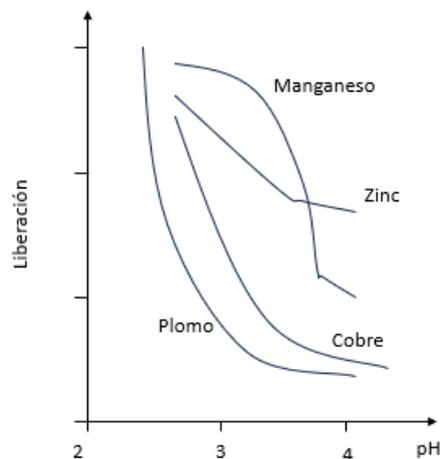


Figura 10.2 Liberación de metales pesados presentes en el suelo en función del pH

Existen mecanismos naturales a través de los cuales los suelos ejercen una acción amortiguadora (buffer) para resistir a los cambios de pH. Sin embargo, cuando la cantidad de contaminantes acidificantes que recibe el suelo supera su capacidad de amortiguación, estos mecanismos dejan de ser efectivos y los efectos adversos de la acidificación del medio se acentúan. Los suelos más resistentes a la acidificación son los de naturaleza alcalina, pero también en éstos ocurren procesos que modifican sustancialmente sus posibilidades de sostener vida. Esto se debe a que el descenso del pH del suelo conduce a la liberación de metales pesados presentes en las moléculas que lo constituyen, que al quedar libres y moverse se constituyen en agentes tóxicos para la biota.

Los cambios que se producen implican a su vez que se modifique la forma en que se encuentran disponibles los nutrientes, lo que puede hacer que algunas especies vegetales dejen de poder absorberlos, con los daños no sólo para esa especie sino para el equilibrio del ecosistema en su conjunto. Otra posibilidad es que ocurra *fijación* y *acumulación* de metales en los tejidos vegetales, lo que puede producir un daño directo sobre el ejemplar. Cuando hay una relación directa entre la concentración de metales en los tejidos de un vegetal y la concentración de metales en el medio, se dice que ese vegetal es una **especie indicadora** (ver Figura 10.3).

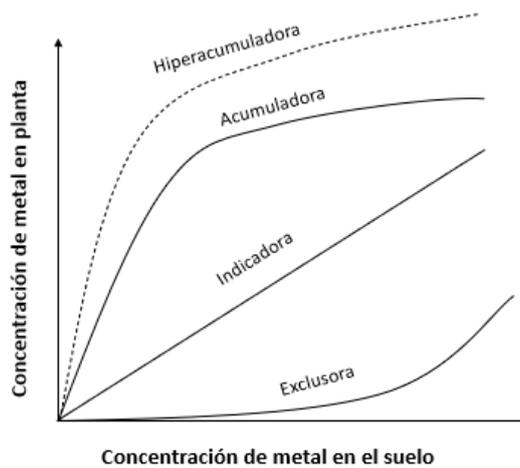


Figura 10.3 Posibles respuestas de los vegetales en función de la concentración de metales pesados presentes en el suelo

10.3.2 Efectos sobre la vegetación

Cualquier variación significativa del pH en el suelo puede alterar el ecosistema y provocar daños o la muerte a la vegetación que depende de él. Entre los efectos sobre la vegetación cabe hacer notar que no sólo aparecen necrosis a nivel de las raíces debido al entorno ácido o a las sustancias que absorben, sino que los fenómenos de deposición que tienen lugar directamente sobre las hojas producen daños en ellas. Muchas veces son lesiones irreversibles, que comienzan a acusarse a través del cambio de color de las hojas y acaban con su muerte y caída (Figura 10.5).



Figura 10.4 Daños directos a los vegetales. Tomado de: https://tendencias.com/eco/consecuencias-de-la-lluvia-acida/?utm_campaign=twitter?utm_campaign=pinterest

El daño a los estomas⁸ desequilibra el balance hídrico de los vegetales a través de la alteración de sus mecanismos de evapotranspiración. Cuando esto, a su vez, se suma al empobrecimiento del suelo en materia de nutrientes (debido a lixiviación), los organismos quedan sometidos simultáneamente a varias condiciones estresantes, lo que dificulta su supervivencia.

La sensibilidad de las diferentes especies frente a los contaminantes atmosféricos varía de acuerdo con la superficie de las hojas y según que éstas sean caducas o perennes. Algunos cultivos como la lechuga, remolacha, cebolla, soja, protos y tabaco, son particularmente sensibles a la lluvia ácida.

El daño sobre los abetos se traduce en un color marrón amarillento de sus hojas y su posterior caída; también ocurre en sus raíces. Los pinos sufren también decoloración con estrechamiento de su extremo cónico superior por pérdida de sus hojas/acículas. Algunos vegetales pueden soportar cambios relativamente rápidos de pH en el medio, pero de todos modos ven afectada su capacidad de reproducción. Como resultado, pasan a proliferar las especies menos sensibles.

La Figura 10.5 sintetiza gráficamente los diferentes efectos de la acidificación del medio sobre los vegetales.

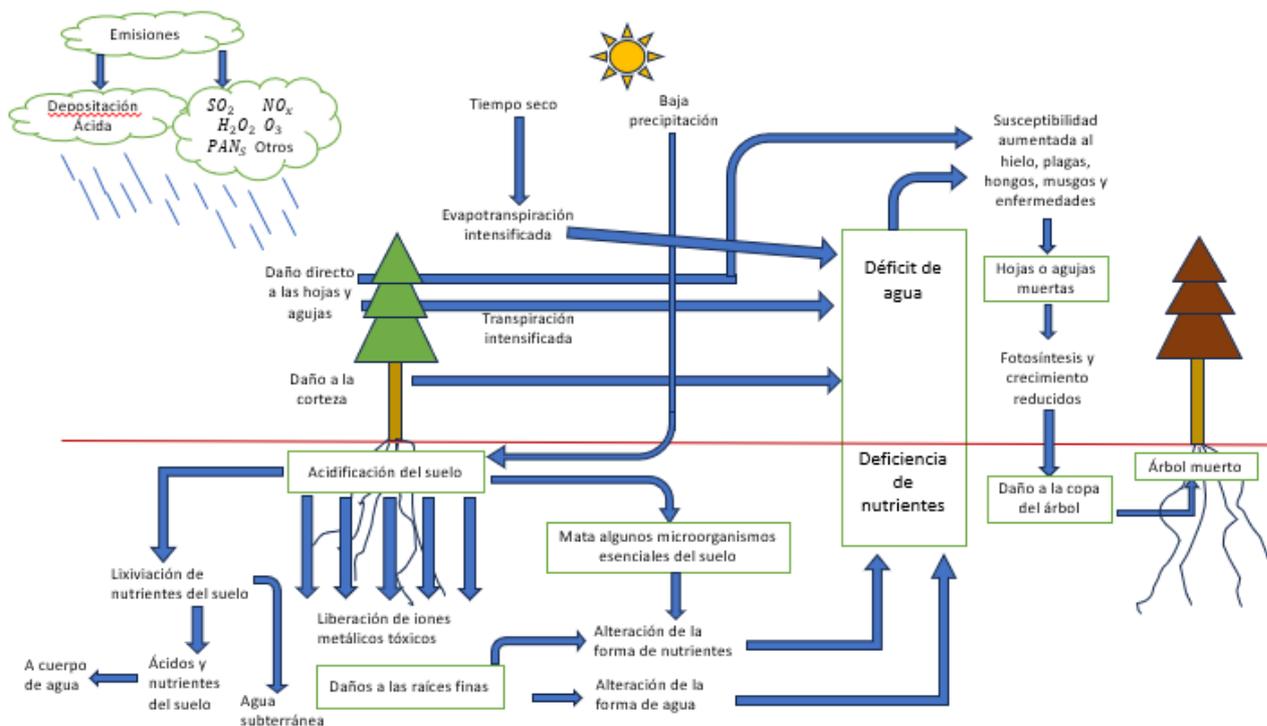


Figura 10.5 Efectos de la acidificación sobre la vegetación

El deterioro de los bosques se mide ejemplar a ejemplar en escala de 1 a 5, graduando de a 20 % el porcentaje de deterioro. Los árboles en clase 5, en general ya carentes totalmente de hojas o de acículas, deben ser eliminados. Además, los bosques son el ambiente natural para varias especies de insectos, pequeños animales, plantas y mamíferos de mayor tamaño.

⁸ Los estomas son aberturas microscópicas en la epidermis que permiten el intercambio de gases y líquidos con el exterior.



Figura 10.6 Bosques afectados por la lluvia ácida (tomado de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/lluvia-acida>)

10.3.3 Acidificación de cuerpos de agua

Las lluvias de bajo pH afectan al cuerpo de agua que actúa como receptor, a través de diversos mecanismos que incluyen la recepción directa de la lluvia ácida caída sobre él, la acidificación de suelos de la cuenca y los aportes por escorrentía recibidos desde ésta. En general las aguas subterráneas son menos vulnerables que las aguas superficiales, puesto que entre la precipitación ácida y la llegada del agua a las napas median procesos de absorción–adsorción en la zona no saturada del suelo, y fenómenos de dilución en aguas de alcalinidad por lo general elevada.

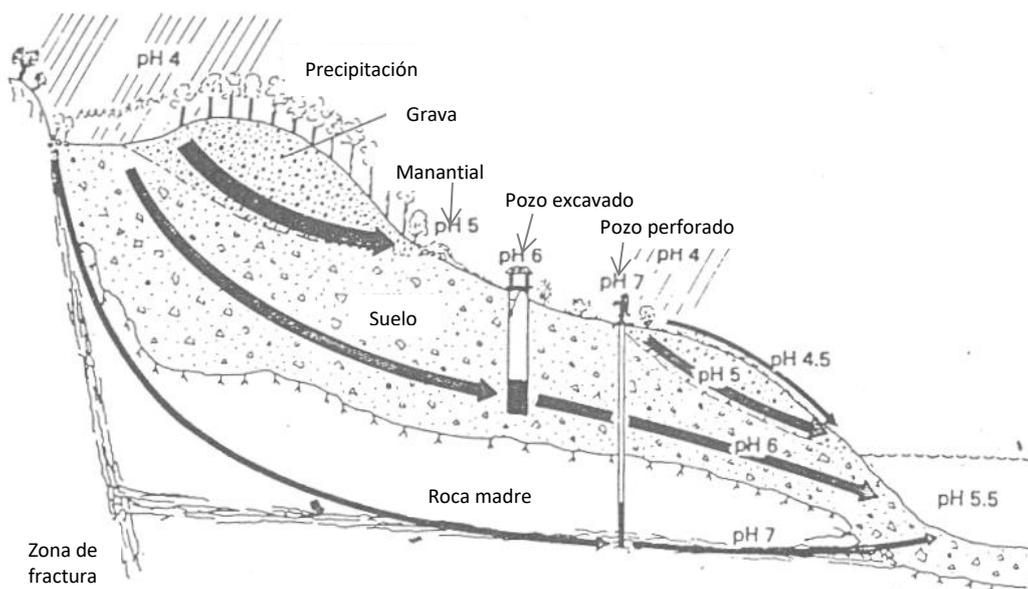


Figura 10.7 Esguerrimieuto y cambios de pH al infiltrar la precipitación ácida

Los efectos en los cuerpos de agua superficiales dependen, entre otros factores, de que se trate de un cuerpo lóatico o léatico. En general las consecuencias tienen que ver no sólo con la acidificación del medio sino también con que, a menor pH, son mayores los procesos de desorción de metales pesados (Fe, Pb, Mn, Zn, Al, Hg).

En los cuerpos lóaticos, como hay un permanente recambio de aguas, no se suelen producir problemas localizados, pero sí pueden constituir un vehículo de transporte del fenómeno hacia aguas abajo.

Por su parte, los cuerpos lénticos -lagos, lagunas- son propensos a sufrir alteraciones en sus ecosistemas cuando el pH de sus aguas baja. El efecto más notable en los sistemas acuáticos superficiales es el descenso de las poblaciones de peces, lo que puede tener diferentes consecuencias económicas, especialmente desde los puntos de vista de la pesca artesanal y deportiva y del turismo. También pueden reducirse las poblaciones de ciertos grupos de zooplancton, algas y plantas acuáticas, lo que puede causar desequilibrios ecológicos al afectar la trama trófica del lago.

En un cuerpo léntico, en una primera etapa la acidificación es compensada por el sistema de amortiguación (sistema buffer) de los bicarbonatos, que evitan que el descenso del pH sea demasiado violento. Cuando se agota la capacidad amortiguadora de los bicarbonatos, se activa el sistema de amortiguación del aluminio -en un entorno de pH 5-, dejando disponibles iones Al^{+3} . Desde el punto de vista del pH, el resultado es análogo al anterior, pero desde el punto de vista de la biota resulta sumamente perjudicial, debido a la elevada toxicidad del Al^{+3} . En los lagos alcalinos o casi neutros, las concentraciones de aluminio son muy bajas. Pero a medida que el pH desciende, el aluminio, antes insoluble, que está presente en concentraciones muy altas en las rocas, los suelos y los sedimentos de ríos y lagos, comienza a disolverse. Una vez en solución, el aluminio es sumamente tóxico para diversas formas de vida acuática aun en bajas concentraciones (de 0,1 mg/L a 1 mg/L).

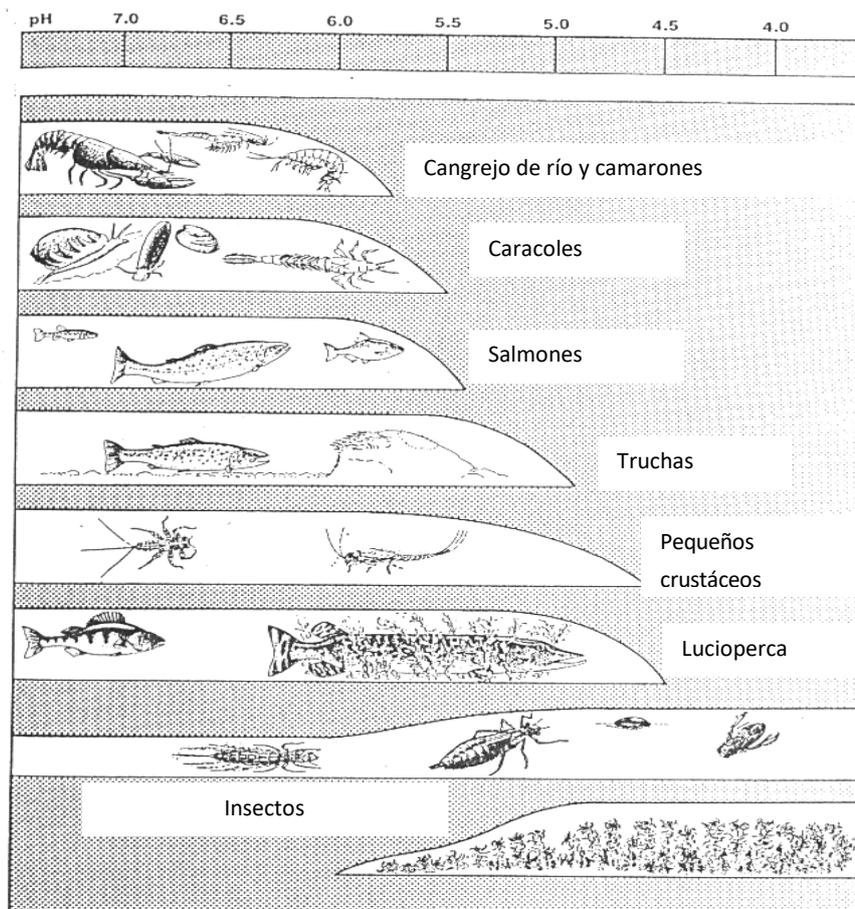


Figura 10.8 pH de supervivencia de distintas formas de vida acuática.
Adaptado de: Acidification and air pollution, 1996.

La máxima toxicidad del aluminio para los peces se da en el entorno de pH 5,0. La máxima concentración de aluminio suele ocurrir a pH más bajos (4,5 a 4,7). Para esos valores de pH desaparecen también

microcrustáceos y otras especies, pero son muy notorios los efectos adversos sobre los peces. El aluminio produce la secreción de una espesa mucosidad viscosa que se deposita sobre las branquias de los peces, obstruyendo el intercambio de gases y generando un desequilibrio iónico importante en el organismo (especialmente en lo referente a Na^+ y K^+). El desequilibrio generado hace que las branquias se aprieten aún más, y el proceso culmina finalmente con la muerte del pez. Así, no sólo el descenso del pH es en sí un factor potencialmente limitante, sino que además el aluminio puede ser un tóxico de gran incidencia en la mortandad de peces en lagos acidificados.

Aunque los peces pueden morir a causa de la acidificación, el efecto más inmediato es que dejen de reproducirse. Después de algunos años de descenso en la tasa de natalidad, la población se torna cada vez más añosa, hasta que la especie termina por desaparecer del lago o corriente. Una vez exterminada una especie es muy difícil reimplantarla, pues ello implica reacondicionar el ecosistema y hacer reaparecer un conjunto de especies que dejaron de estar presentes como consecuencia de la desaparición de aquélla. Los lagos cuyas aguas son más claras en general son los de menor pH y, por ende, los de biota más pobre.

Los moluscos con esqueleto externo (por ejemplo, caracoles, mejillones y ostras), en gran medida dependen del calcio para su esqueleto externo protector. Como el agua ácida disuelve con facilidad el carbonato de calcio e interfiere para que los organismos incorporen el calcio, su supervivencia se ve muy condicionada ante la acidificación del medio. También el zooplancton es muy sensible al aumento en la acidez del agua dulce y, como constituye una fuente de alimento muy importante para los peces, la reducción de sus poblaciones afectará a aquéllos que se alimentan de él, aun si no sufren efectos más directos de la acidificación.

Los pájaros que viven cerca de cuerpos de agua acidificados pueden ver afectada su reproducción. Sus huevos tienen paredes muy delgadas debido al aluminio ingerido a través de los insectos de los cuales se alimentan, porque éstos precisamente se han desarrollado en aguas ácidas.

10.3.4 Efectos sobre bienes materiales

Los materiales de construcción como acero, pintura, plásticos, cemento, mampostería, acero galvanizado, piedra caliza, arenisca y mármol están expuestos a sufrir daños a causa de la lluvia ácida. La frecuencia con la que es necesario aplicar nuevos recubrimientos protectores a las estructuras va en aumento, con los consecuentes incrementos en los costos de mantenimiento.

Las construcciones, esculturas y monumentos de materiales pétreos alcalinos sufren un deterioro acelerado -y, en algunos casos, la destrucción- a causa de su exposición a lluvia de bajo pH. Hay ejemplos concretos en Alemania de esculturas al aire libre en donde el deterioro acaecido en los últimos 60 años ha sido suficientemente cruel como para desfigurar totalmente las imágenes que habían permanecido medianamente inalteradas durante casi 200 años.

Los procesos de corrosión atmosférica están estrechamente relacionados con la humedad relativa ambiente. En la Figura 10.10 se muestra un diagrama en el que se relacionan la calidad del aire, el número de horas mensuales con elevada humedad relativa y la corrosión del hierro.

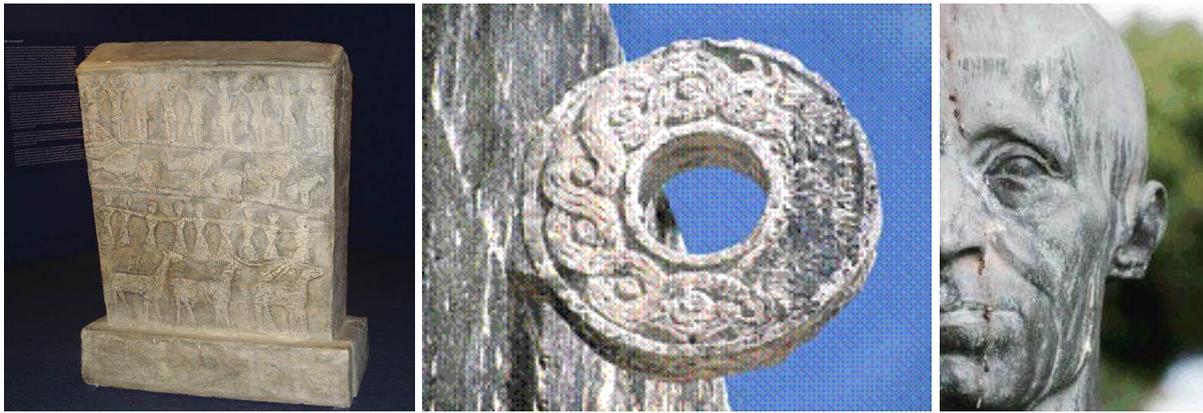


Figura 10.9 Deterioro de esculturas por efecto de la lluvia ácida (tomada de <https://www.nacion.com/el-pais/lluvia-acida-dana-edificios-y-monumentos-capitalinos/YWN4FYJKQ5A2RKZFFYNA4CJR5U/story/>)

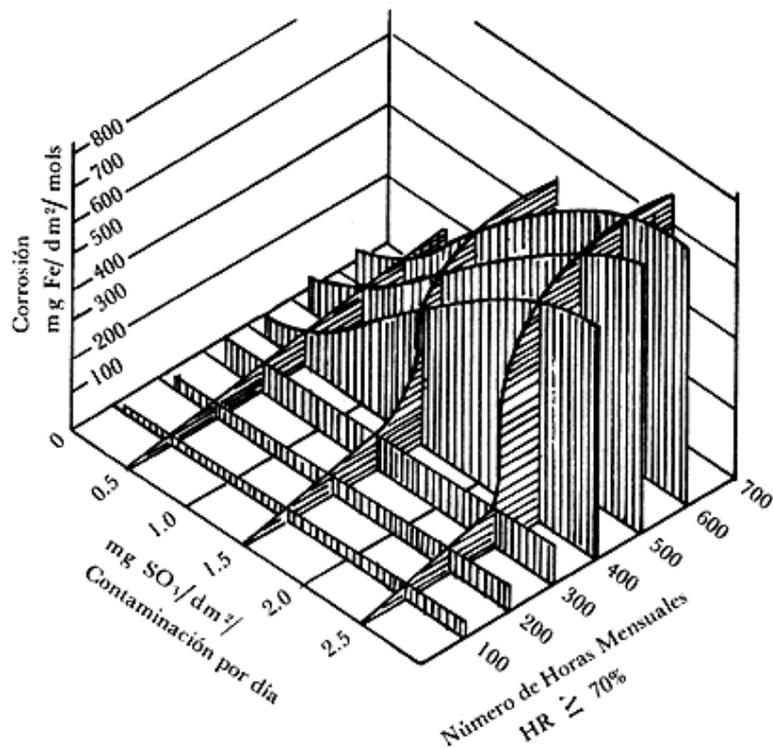


Figura 10.10 Corrosión atmosférica del hierro en función de la concentración de óxidos de azufre y del tiempo de exposición

En cuanto a los procesos corrosivos en elementos enterrados, es indudable el vínculo existente entre el pH del suelo y la agresividad del mismo para elementos metálicos, lo que pone de manifiesto la trascendencia de los procesos de acidificación de suelos desde el punto de vista de la vida útil de diversos materiales. Se ha comprobado que la pérdida de material en cañerías metálicas verificada en suelos de pH 5 es el doble de la correspondiente al mismo material en suelos de pH 6. Si se tiene en cuenta que el uso de cañerías metálicas enterradas hoy día está restringido al transporte de ciertos fluidos o a instalaciones de gran diámetro, puede verse la importancia que reviste tener especialmente en cuenta las características del suelo a la hora de prever la vida útil de la instalación y sus posibilidades de fallo, y seleccionar las protecciones del caso.

10.4 Medidas de gestión

10.4.1 Medidas correctivas en cuerpos de agua

Una medida correctiva que se ha empleado cuando la envergadura de la problemática lo ha ameritado ha sido el vertido de algún alcalinizante (por ejemplo, cal o cenizas de soda) en los lagos para favorecer su recuperación, y a posteriori implementar la siembra de peces. Si bien esto puede restituir condiciones de habitabilidad para flora y fauna en esas aguas, de todos modos, suelen aparecer problemas por la acumulación de metales tóxicos en los lechos de los cursos de agua involucrados.

10.4.2 Monitoreo ambiental

El monitoreo ambiental con el objetivo de determinar el contenido atmosférico de óxidos de azufre puede hacerse a través de muestreos activos o pasivos.

A los efectos de estudiar la incidencia de atmósferas agresivas sobre la corrosión de materiales metálicos y su vida útil, existe una serie de procedimientos normalizados que trabajan con monitores pasivos. Éstos quedan expuestos por determinados períodos de tiempo, y luego se retiran para ser analizados en laboratorio. No permiten obtener respuestas en tiempo real, pero sí evaluar características del aire atmosférico y no sólo con fines de análisis de vida útil de materiales, sino también como indicadores de calidad de aire vinculados a la salud.



Figura 10.11 Monitor pasivo para contaminantes atmosféricos. Der.: tomado de

<https://obsnev.es/dosimetros-pasivos/>

10.4.3 Medidas preventivas

Para actuar sobre las causas antropogénicas de los fenómenos de acidificación, el enfoque adoptado a nivel mundial apunta a la prevención a través del control de las emisiones de las diversas fuentes, con el objetivo de minimizar las cantidades de óxidos de azufre y nitrógeno que se descargan a la atmósfera. Las principales medidas que se consideran son:

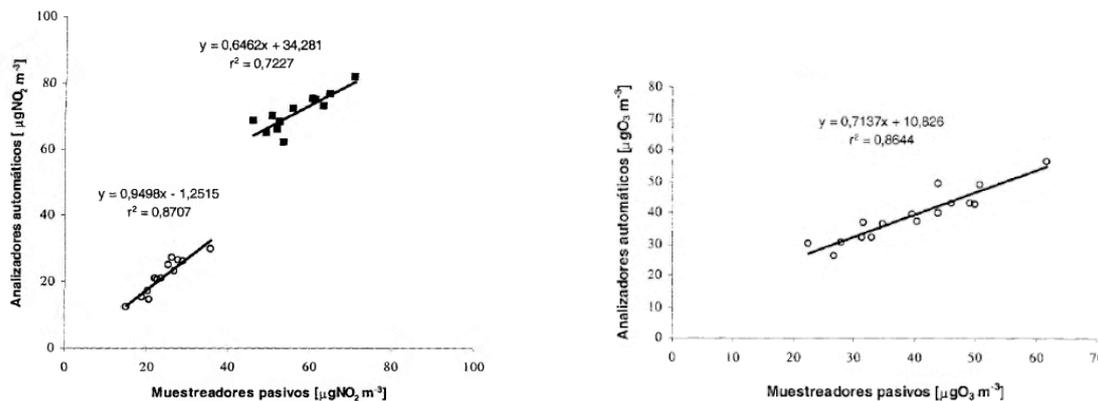


Figura 10.12 Correlación entre concentraciones ambientales detectadas por monitores continuos y pasivos: izq. NO₂; der. O₃. Tomado de http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v2n3/v2n3_a03.pdf

- Empleo de combustibles con bajos tenores de azufre.
- Remoción del azufre previo al uso del combustible.
- Control de las condiciones de combustión en las fuentes emisoras (temperatura, oxígeno, etc.).
- Instalación de tecnologías adecuadas a cada caso para el control de las emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno.
- Aumento en la eficiencia del transporte público.
- Desestímulo al uso del vehículo individual.
- Uso obligatorio de convertidores catalíticos en los escapes de los automotores para reducir las emisiones de NO_x.
- Uso de fuentes energéticas alternativas más limpias.
- Planificación regional de los puntos de implantación de fuentes fijas.
- Gestión de cuencas atmosféricas e hidrográficas para prevenir la acidificación de lagos.

11 Consecuencias de la contaminación del aire

11.1 Aspectos generales

Unos siete millones de personas mueren por año en el mundo como consecuencia de problemas de calidad de aire. La problemática es mayor, como es de esperar, en áreas urbanas y cerca de polos industriales. Las poblaciones más vulnerables son ancianos, niños y personas con problemas de salud preexistentes.

Sin embargo, esas no son las únicas condicionantes para tener un mayor riesgo: estudios realizados en Europa, en línea con el enfoque de determinantes ambientales de la salud que maneja la Organización Mundial de la Salud, muestran que *“las personas de menor nivel socioeconómico tienden a vivir, trabajar e ir a la escuela en lugares con peor calidad de aire y mayores niveles de ruido”*. Infiere además que la

mayor exposición a la contaminación del aire en grupos socioeconómicos de menor nivel “se debe en gran medida a problemas de planificación del uso del suelo y al mercado inmobiliario”.

La Figura 11.1 esquematiza los vínculos entre exposición, vulnerabilidad y riesgos ambientales. En el caso de la contaminación del aire, la mayor exposición de las personas de niveles socioeconómicos poco favorecidos se debe a la ubicación y condiciones de la vivienda, el tipo de combustible que se emplea en ellas para calefaccionarse y cocinar, así como el tipo de trabajo que desempeñan las personas.

La contaminación del aire es el principal riesgo ambiental para la salud en Europa. Entre los contaminantes atmosféricos criterio, la principal amenaza para la salud proviene de las partículas respirables, representada por la fracción PM_{2.5}. Se les atribuye unas 422.000 muertes prematuras en el año 2015, distribuidas en 41 países de Europa. La Figura 11.2 muestra los años de vida sana perdidos en 2020 en ese continente como consecuencia de la calidad del aire.

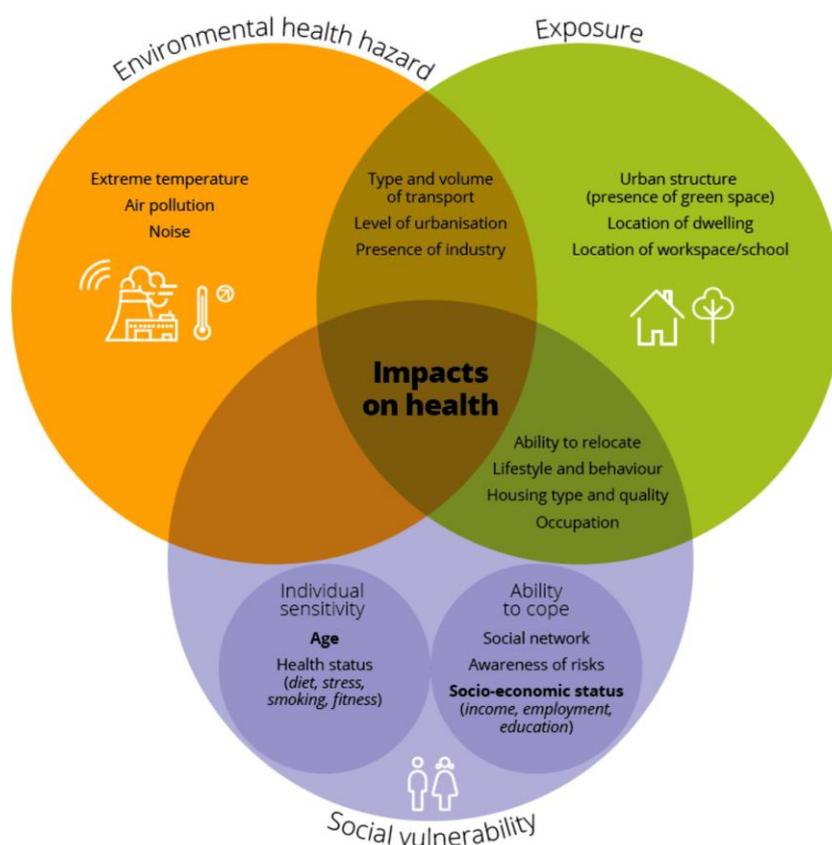


Figura 11.1 Impactos en el bienestar debido a la vulnerabilidad y la exposición a riesgos ambientales. Tomado de EEA Report N° 22/2018.

Los problemas de salud no se manifiestan solamente como enfermedades respiratorias o cardiovasculares, sino también a través de mayor incidencia de cáncer y diabetes tipo 2. Hay evidencias que relacionan la contaminación del aire también con otras enfermedades, como obesidad, mal de Alzheimer y demencia. Entre los resultados que el estudio de referencia evidenció, cabe mencionar (ver Tabla 11.1):

Tabla 11.1 Correlación entre calidad del aire e indicadores de vulnerabilidad social en Europa (tomado de EEA, 2015)

	NO ₂	PM _{2,5}	PM ₁₀	O ₃
PBI per cápita	Negativa, alta	Positiva, moderada	Positiva, moderada	
% de personas sin educación terciaria	Negativa, moderada	Positiva, alta	Positiva, alta	Positiva, alta
Ingreso del hogar	Negativa, alta	Positiva, moderada	Positiva, alta	
Desempleo prolongado	Negativa, moderada	Positiva, moderada	Positiva, alta	Positiva, alta
% de adultos mayores				Positiva, moderada
% de niños pequeños		Negativa, moderada	Negativa, moderada	Negativa, alta

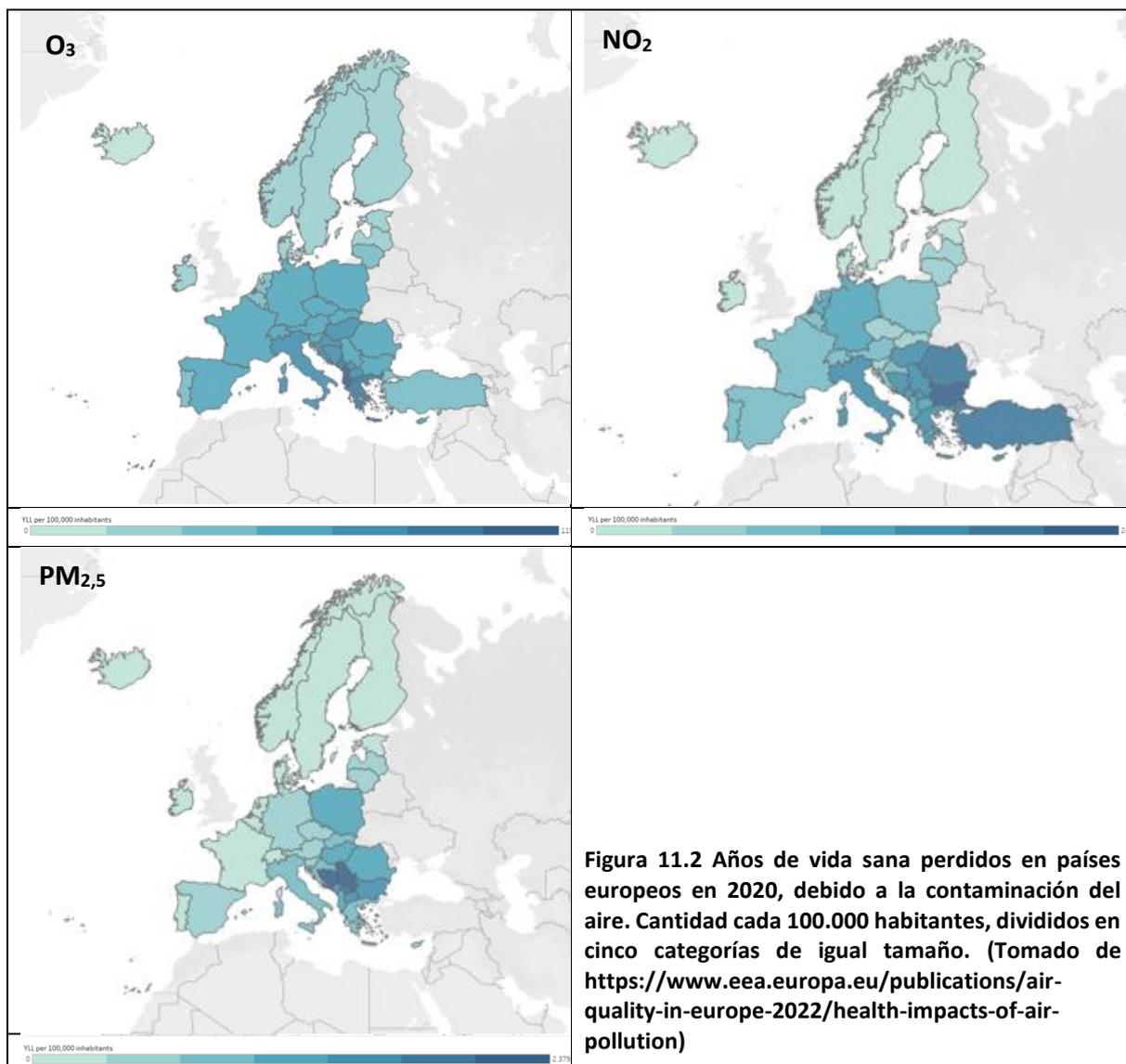


Figura 11.2 Años de vida sana perdidos en países europeos en 2020, debido a la contaminación del aire. Cantidad cada 100.000 habitantes, divididos en cinco categorías de igual tamaño. (Tomado de <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>)

- Distritos censales con estatus socioeconómico más bajo tienden a tener niveles más altos de contaminación por PM_{2,5}, PM₁₀ y O₃. Sin embargo, las regiones con un estatus socioeconómico más alto generalmente experimentan niveles más altos de contaminación por NO₂.
- Las correlaciones más fuertes se encontraron entre nivel socioeconómico bajo y exposición a PM₁₀, con regiones relativamente pobres y contaminadas en el centro, este y sureste de Europa.

- Las regiones con la proporción más baja de personas con educación terciaria se superponen con una alta exposición al O₃. Ambos fenómenos se concentran en el sur de Europa, pero no se ha evidenciado una relación causal.
- En el sur y sureste de Europa tienden a superponerse múltiples peligros ambientales y múltiples causas de vulnerabilidad en la población.

11.2 Situación durante la pandemia de SARS-CoV2

Durante la emergencia sanitaria por COVID, la baja de actividad fuera del hogar durante períodos prolongados generó una reducción en los niveles de varios parámetros de calidad de aire. Los gráficos que se presentan en esta sección fueron tomados de Ocampo y Bárcena (2020).

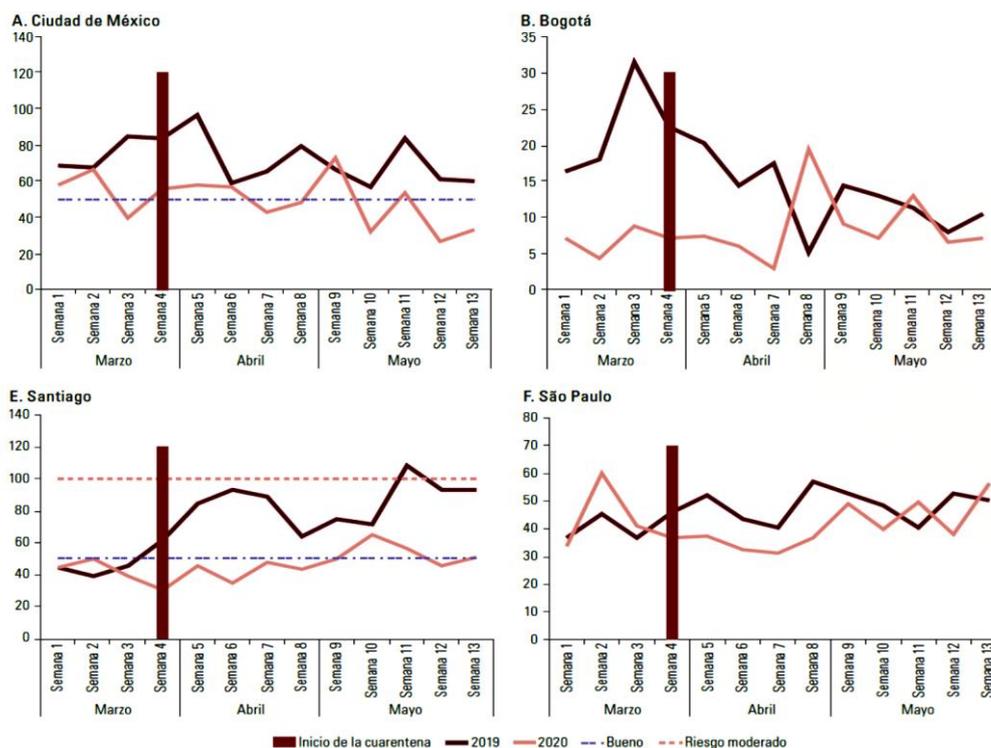
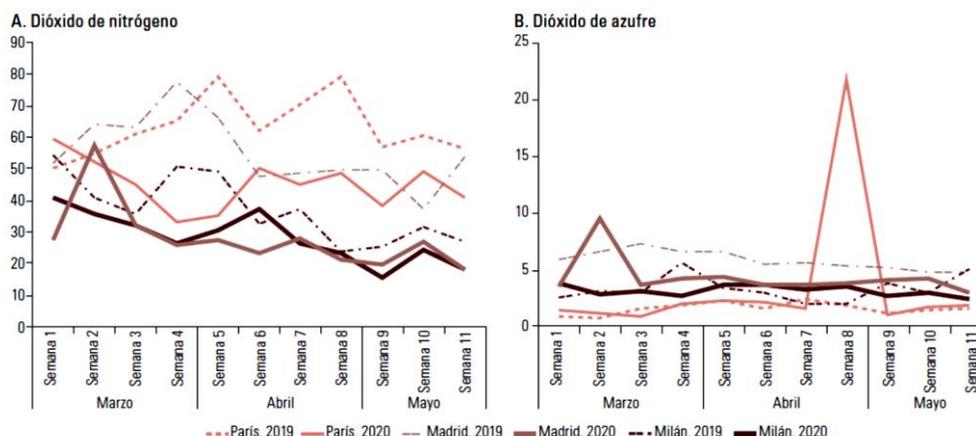


Figura 11.3. Promedio semanal de las concentraciones máximas diarias de SO₂ (arriba) y NO₂ (abajo), en varias ciudades latinoamericanas, marzo a mayo de 2019 y de 2020 (tomado de Ocampo y Bárcena, 2020)



Nota: Las fechas de inicio de la cuarentena son el 17/03/2020 en París, el 10/03/2020 en Milán y el 15/03/2020 en Madrid.
Figura 11.4 Promedio semanal de las concentraciones máximas diarias de NO₂ y SO₂ en París, Madrid y Milán, marzo a mayo de 2019 y de 2020 (tomado de Ocampo y Bárcena, 2020)

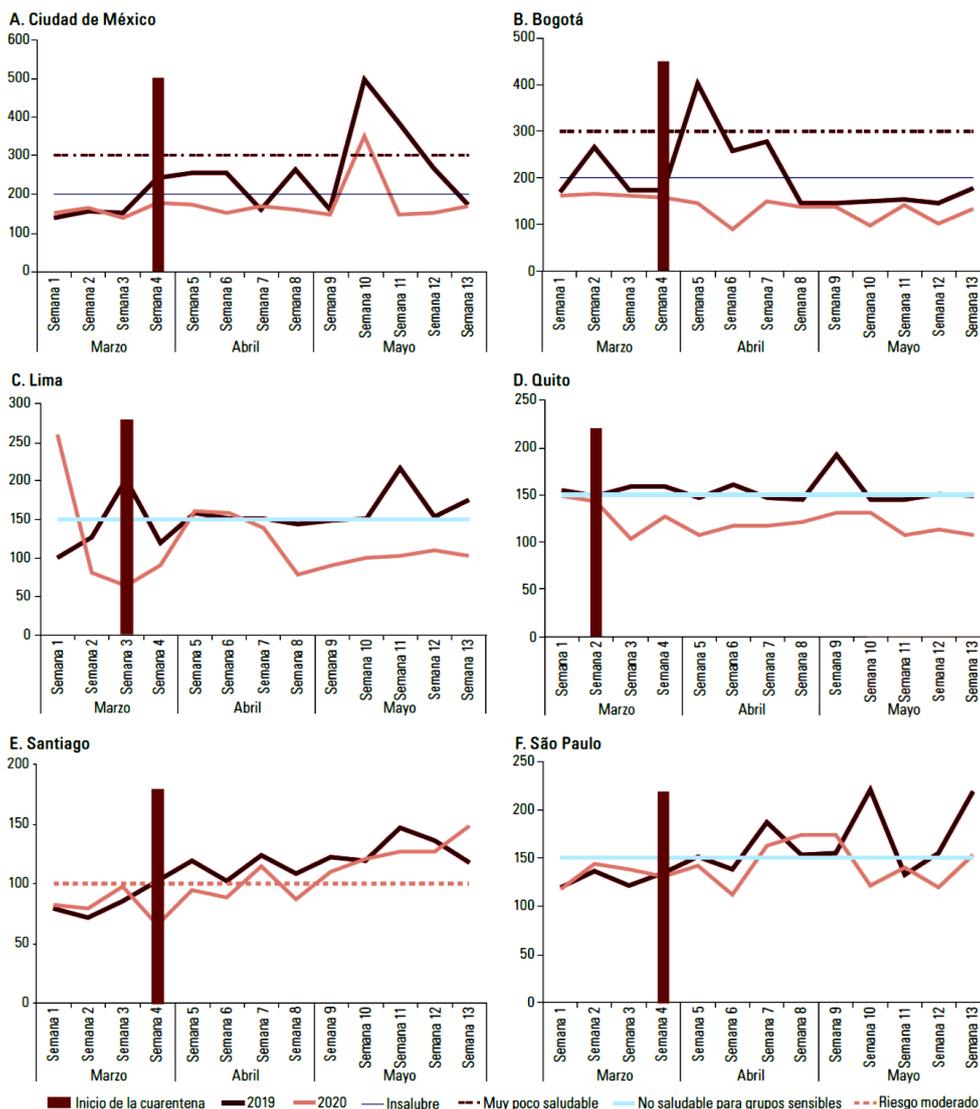


Figura 11.5 Promedio semanal de las concentraciones máximas diarias de material particulado fino (PM2,5) en varias ciudades latinoamericanas, marzo a mayo de 2019 y de 2020 (tomado de Ocampo y Bárcena, 2020)

12 Control de emisiones de contaminantes químicos a la atmósfera

12.1 Recomendaciones generales

Una instalación tipo de control de emisiones a la atmósfera suele estar integrada por un dispositivo de captación, un sistema de conductos, un sistema de depuración o control, un sistema de impulsión de aire (un extractor) y un sistema de evacuación de los gases residuales.

Como criterio general, al momento de diseñar sistemas de captación de contaminantes debe tenderse a ubicar el dispositivo de aspiración lo más próximo posible a la fuente emisora; la zona de aspiración debe comprender la máxima área posible de generación del contaminante. Aunque un criterio para la selección del mejor sistema a emplear en cada caso se refiere al consumo energético involucrado en su funcionamiento, no debe olvidarse que cada sistema es apto para captar ciertas dimensiones de partículas y no otras, lo que constituye el principal criterio técnico a considerar.

12.2 Sistemas de control de emisión de partículas

12.2.1 Separadores gravimétricos

Eliminan las partículas sedimentables bajando la velocidad de la corriente de aire a tratar. Es útil para retener las partículas de mayor tamaño.

El caso típico es el de las cámaras de sedimentación. Su consumo energético para operar es nulo. Su principal desventaja es que, para lograr una eficiencia razonable, requieren mucho espacio.

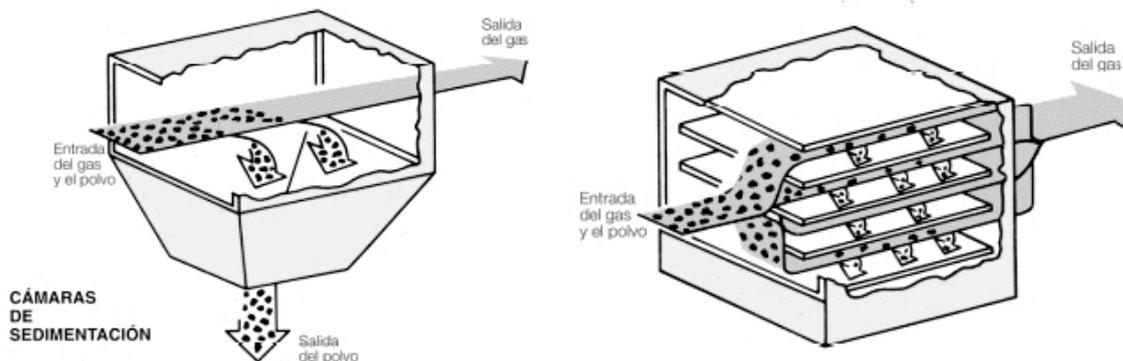


Figura 12.1 Cámaras de sedimentación (tomado de <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-depuracion-del-aire-filtros-ii/>).

12.2.2 Separadores inerciales

La separación de partículas se logra por modificación de las líneas de flujo de la corriente gaseosa.

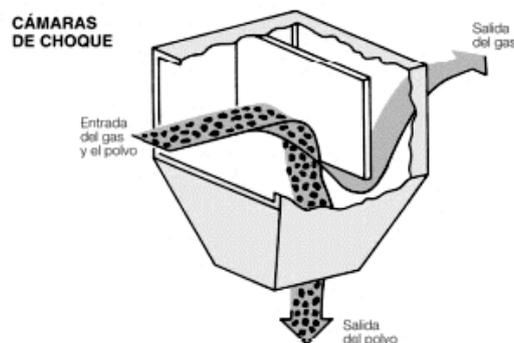


Figura 12.2 Separador inercial (tomado de <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-depuracion-del-aire-filtros-ii/>).

12.2.3 Separadores centrífugos

Constituyen un caso particular de los separadores inerciales, en donde las líneas de flujo se modifican generando un trayecto helicoidal. El caso habitual es el de los separadores ciclónicos.

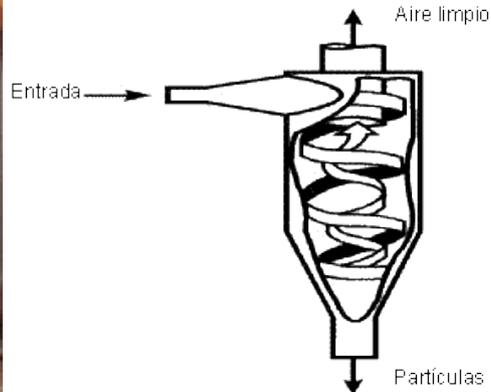


Figura 12.3 Separador ciclónico (esquema tomado de https://www.diquima.upm.es/old_diquima/Investigacion/proyectos/chevic/catalogo/CICLONES/Descr6.htm)

12.2.4 Separadores interceptores

Las partículas son retenidas por un obstáculo con el que entran en colisión. El caso típico es el de los filtros textiles o filtros de mangas, en los que la corriente gaseosa se hace pasar a través de las paredes de tubos (“mangas”) de material textil, que es el que retiene las partículas. Por lo general son sistemas autolimpiantes. Tienen un consumo energético significativo. Se aplican para partículas finas. Se han desarrollado diferentes materiales para las mangas que permiten su uso para retener partículas de materiales agresivos e incluso las que se transportan en corrientes de aire a elevada temperatura.

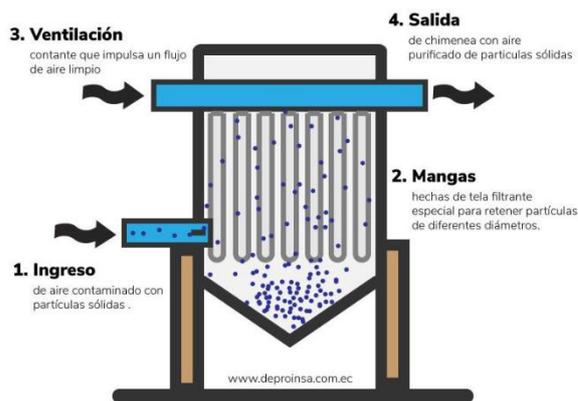


Figura 12.4 Filtro de mangas. Tomado de: <https://deproinsa.com.ec/proyectos-industriales/filtro-de-mangas/> y [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/Filtro de Mangas.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/Filtro_de_Mangas.jpg)

12.2.5 Precipitadores electrostáticos

Es un sistema para retener partículas muy finas, que involucra un importante consumo energético. Las partículas son obligadas a desviarse en un campo eléctrico -de acuerdo con su carga- y a posteriori se las hace precipitar.

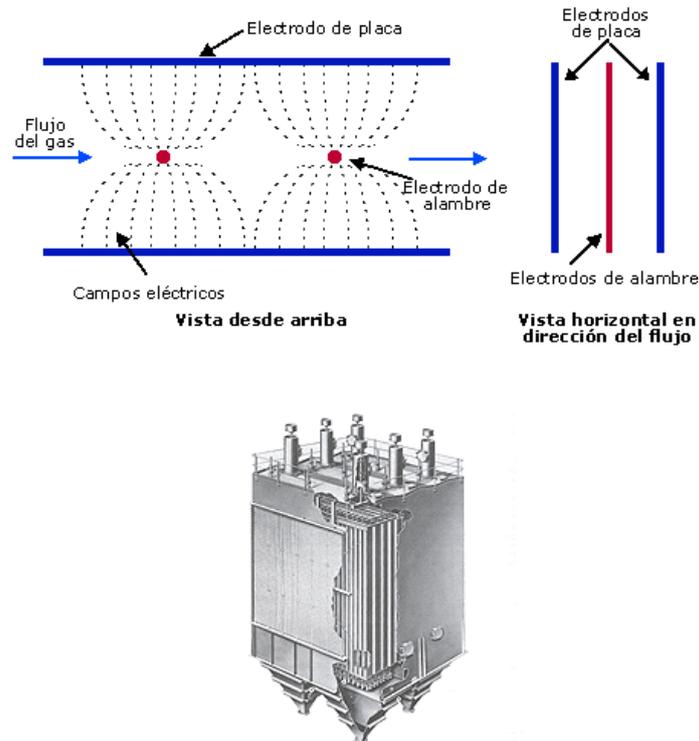


Figura 12.5 Precipitador electrostático (tomado de https://cidta.usal.es/riesgos/CD1/control_contaminacion_aire/www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/orienta2/lecc8/lecc8_3a.html)

12.2.6 Métodos de absorción

Los gases se hacen reaccionar o diluir en un vehículo líquido apropiado. Es el caso de las columnas o torres de lavado de gases. Se hace necesario implementar luego un sistema de tratamiento para el líquido empleado en el sistema de lavado.

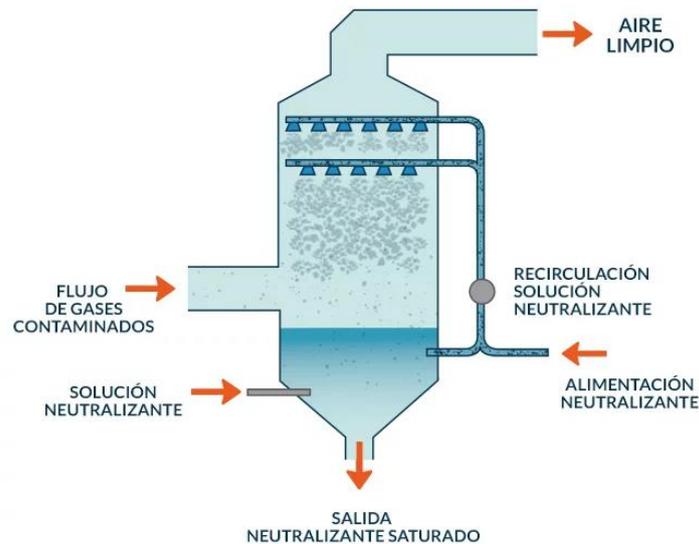


Figura 12.6 Torre de lavado de gases. Tomado de <https://scrubbers.com.mx/lavador-de-gases/>

12.3 Sistemas de control de emisión de gases

12.3.1 Métodos de adsorción

Los gases son retenidos en la superficie de un material sólido con el que, por lo general, no reaccionan. El material más empleado es el carbón activado.



Figura 12.7 Filtro de carbón activado. Tomado de <https://growdepotmexico.com/producto/filtro-de-carbon-activado-de-6-in/>

12.3.2 Métodos de combustión

Se aplican dos procedimientos:

- incineración o combustión ordinaria
- combustión catalítica (eficiente para bajas concentraciones de contaminante)

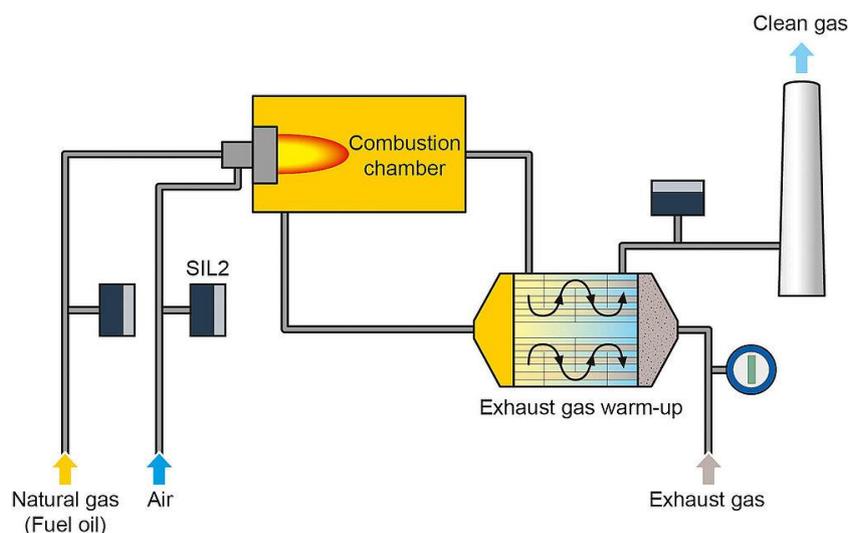


Figura 12.8 Esquema de un sistema de post combustión de gases. Tomado de <https://www.hoentzsch.com/en/applications-industries/thermal-post-combustion-after-chemical-installations/-processes>

12.3.3 Métodos de reducción catalítica

Por analogía con el caso anterior, se aplican a aquellas sustancias susceptibles de sufrir un proceso de reducción. En general trabajan con catalizadores metálicos.

Los **convertidores catalíticos** de los automóviles (catalizadores de tres vías) son dispositivos que incluyen un catalizador de reducción, de platino y rodio, para convertir los NO_x en N_2 y O_2 ; y un catalizador de oxidación, de platino y paladio, para convertir los hidrocarburos no quemados y el CO en CO_2 y vapor de agua.

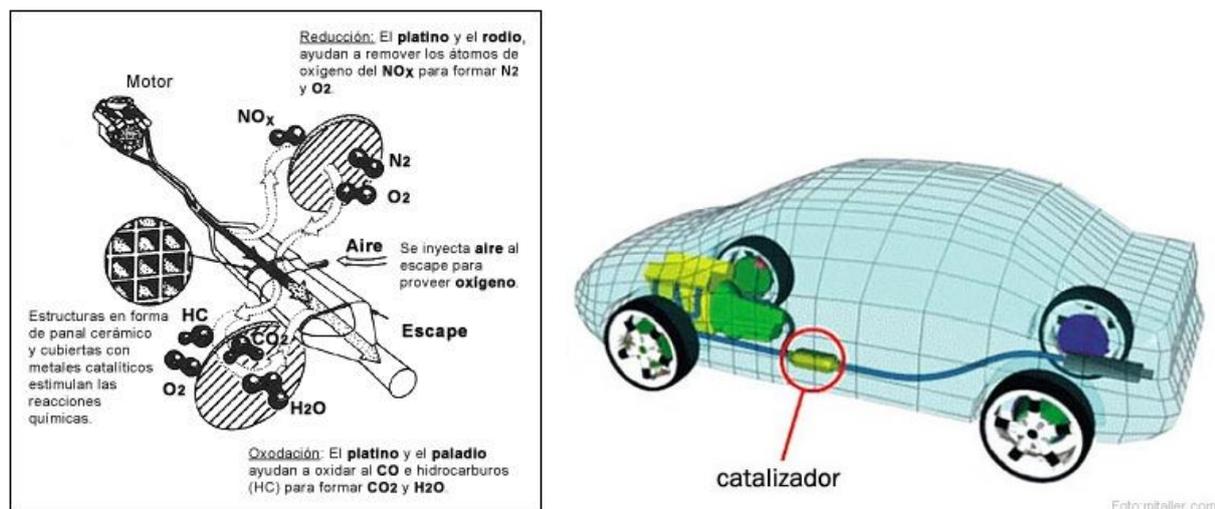


Figura 12.9 Convertidor catalítico de tres vías. Tomado de:

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/159/htm/sec_8.htm y
<https://www.motorydominio.com.mx/tips/como-cuidar-el-convertidor-catalitico-o-catalizador>

Bibliografía básica

Albert, Lilia A. (1997). Introducción a la Toxicología Ambiental. Ed. Lilia Albert, México 1997.

<https://cambioclimaticoglobal.com>

Cataldo, José; Rezzano, Nicolás; D'Angelo, Mauro; Deambrosi, Matteo; Franchi, Ignacio (2019). Informe Final: Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015. 130 pp. Convenio MVOTMA-FING (IMFIA), abril 2019.

Convenio MVOTMA – FING (2000) Programa de Evaluación de la Calidad del Aire aplicado a la República Oriental del Uruguay, 2000.

D'Angelo Taibo, Mauro (2016). Caracterización de las emisiones atmosféricas del transporte en Montevideo. Tesis para la obtención del grado de Magister en Ingeniería Ambiental, FING-UdelaR, agosto 2016.

Echeverri Londoño, Carlos Alberto. Contaminación Atmosférica. Universidad de Medellín, 2012.

EEA (European Environmental Agency). EEA Report N° 22/2018. Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe. Luxemburgo, 2018. ISSN 1977-8449.

<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>

<http://www.epa.gov/acidrain>

Fernández Rivas, Laura (2015). El papel de los óxidos de nitrógeno en el Cambio Climático. Efectos sobre la salud. Trabajo Fin de Grado, 20 pp., Facultad de Farmacia, Universidad Complutense.

Harrison, R.M. (2003). El Medio Ambiente. Introducción a la Química Medioambiental y a la Contaminación, 2003.

<http://www.imm.gub.uy>

<https://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/135-2021>

Iñón, Dora (S/A). Ciclo del Nitrógeno, Fijación Biológica del Nitrógeno. 74 pp.

<https://montevideo.gub.uy/areas-tematicas/ambiente/icaire> Montzka, Stephen A.; Dutton, Geoffrey S.; Portmann, Robert W.; Martyn P. Chipperfield, Sean Davis, Wuhu Feng, Alistair J. Manning, Eric Ray, Matthew Rigby, Bradley D. Hall, Carolina Siso, J. David Nance, Paul B. Krummel, Jens Mühle, Dickon Young, Simon O'Doherty, Peter K. Salameh, Christina M. Harth, Ronald G. Prinn, Ray F. Weiss, James W. Elkins, Helen Walter-Terrinoni & Christina Theodoridi (2021). A decline in global CFC-11 emissions during 2018–2019. Nature Vol. 590, pp.428-446, February 2021. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03260-5>

Ocampo, Rolando; Bárcena, Alicia (2020). Efectos de las cuarentenas y restricciones de actividad relacionadas con el COVID-19 sobre la calidad del aire en las ciudades de América Latina. Serie INFORMES COVID-19. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Naciones Unidas, 2020.

<http://www.presidencia.gub.uy>

Ralph, Turco & Lew (1990). Air pollution: local, regional and global issues. Department of Atmospheric Sciences, UCLA, 1990.

<http://www.sagan-gea.org>

Swedish Environmental Protection Agency. Acidification and air pollution, 1996.

https://tendencias.com/eco/consecuencias-de-la-lluvia-acida/?utm_campaign=twitter?utm_campaign=pinterest

Wark and Warner. Contaminación del aire. Origen y Control. Ed. Limusa, 1990.

Anexo: Decreto N° 135/021: Reglamento de Calidad del Aire

CAPÍTULO I. Disposiciones generales

Artículo 1.- (Objetivo). El presente reglamento tiene por objetivo la protección del ambiente a través de la prevención de la contaminación del aire, mediante el establecimiento de objetivos de calidad de aire para disminuir los riesgos para la salud humana y los ecosistemas, y la fijación de límites máximos de emisión, tanto para fuentes fijas como móviles.

Artículo 2.- (Prohibición). De conformidad con lo establecido en el artículo 17 de la Ley N° 17.283, de 28 de noviembre de 2000, queda prohibido liberar o emitir a la atmósfera, directa o indirectamente, sustancias, materiales o energía, por encima de los límites máximos o en contravención de lo que se establece en este reglamento o de lo que disponga el Ministerio de Ambiente.

Artículo 3.- (Deber). Toda persona física o jurídica, deberá prevenir, evitar, mitigar o minimizar las emisiones a la atmósfera de gases o partículas de las que sea responsable, sea por descarga o liberación, continua o discontinua, procedentes directa o indirectamente de cualquier fuente, con el fin de reducir la contaminación del aire, de conformidad con lo que se establece en este decreto.

Asimismo, se deberán adoptar las previsiones necesarias para minimizar las emisiones de gases que aporten al calentamiento global o que contribuyan al deterioro de la capa de ozono.

CAPÍTULO II. Objetivos de calidad del aire

Artículo 4.- (Establecimiento). Se establecen como objetivos de calidad del aire, los niveles máximos que para ciertos parámetros se pretenden alcanzar y mantener en el aire ambiente, según se presentan en la Tabla 1, aplicables desde la publicación de este reglamento y hasta el 31 de diciembre de 2023, y, en la Tabla 2, aplicables a partir del 1° de enero de 2024.

Los objetivos de calidad del aire pautarán los planes, programas y actos que se desarrollen en torno a la evaluación, regulación, autorización y control de las fuentes de contaminación del aire en todo el territorio nacional.

A los efectos del presente reglamento, se entiende por aire ambiente, al aire exterior que conforma la tropósfera, con exclusión de los lugares de trabajo, aun abiertos, a los que el público no tiene acceso habitualmente y donde se entiende que existen otras medidas que aplicar para la seguridad laboral y la protección de la salud de los trabajadores. No queda comprendido, por tanto, el aire de los espacios interiores, sean éstos accesibles o no al público, fijos o móviles, naturales o artificiales.

Tabla 1. Objetivos de calidad del aire. Aplicables desde la publicación del Reglamento 135/021 hasta el 31 de diciembre de 2023

Contaminante	Período ⁽¹⁾	Concentración ⁽²⁾ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tolerancia ⁽³⁾ No se podrá exceder:
Monóxido de Carbono	1 hora	30000	---
	8 horas móviles	10000	---
Dióxido de Nitrógeno	1 hora	200	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 18 horas al año
	Anual	40	---
Ozono	Máxima diaria ⁽⁴⁾	100	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 25 días en promedios de 3 años
Dióxido de Azufre	1 hora	300	450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 horas en el año
	Anual	50	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 3 días en el año
PM2.5	24 horas	35	54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 30 días al año
	1 año	25	---
PM10	24 horas	75	112 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 15 días al año
	1 año	30	---
Plomo	1 año	0,5	---
Azufres Reducidos Totales	30 minutos	10	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 40 veces en el año en promedios de 30 minutos
	24 horas	7	11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 10 días en el año

⁽¹⁾ Por período se entiende la media aritmética de los datos correspondiente al tiempo que en cada caso se indica. El período de medición de 1 hora sólo será de aplicación en los monitoreos continuos.

⁽²⁾ Las mediciones de concentración corresponden a $T = 293 \text{ K}$ y $P = 1013 \text{ hPa}$.

⁽³⁾ El exceso en el nivel de concentración de cada parámetro no podrá superar el valor máximo que se indica, en el tiempo que se señala.

⁽⁴⁾ Máxima diaria es el valor resultante de los promedios móviles octohorarios.

Tabla 2. Objetivos de calidad del aire. Aplicables a partir del 1º de enero de 2024

Contaminante	Período ⁽¹⁾	Concentración ⁽²⁾ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tolerancia ⁽³⁾ No se podrá exceder:
Monóxido de Carbono	1 hora	30000	---
	8 horas móviles	10000	---
Dióxido de Nitrógeno	1 hora	200	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 18 horas al año
	Anual	40	---
Ozono	Máxima diaria ⁽⁴⁾	100	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 25 días en promedios de 3 años
Dióxido de Azufre	1 hora	300	450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24 horas en el año
	Anual	20	95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 3 días en el año
PM2.5	24 horas	25	38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 30 días al año
	1 año	15	---
PM10	24 horas	50	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 15 días al año
	1 año	20	---
Plomo	1 año	0,5	---
Azufres Reducidos Totales	30 minutos	10	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 40 veces en el año en promedios de 30 minutos
	24 horas	7	11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 10 días en el año

⁽¹⁾ Por período se entiende la media aritmética de los datos correspondiente al tiempo que en cada caso se indica. El período de medición de 1 hora sólo será de aplicación en los monitoreos continuos.

⁽²⁾ Las mediciones de concentración corresponden a $T = 293 \text{ K}$ y $P = 1013 \text{ hPa}$.

⁽³⁾ El exceso en el nivel de concentración de cada parámetro no podrá superar el valor máximo que se indica, en el tiempo que se señala.

⁽⁴⁾ Máxima diaria es el valor resultante de los promedios móviles octohorarios.

Artículo 5.- (Actualización y complementación). El Ministerio de Ambiente, actualizará los objetivos de calidad en la medida que el avance del conocimiento científico o las condiciones ambientales en el país así lo ameriten, pudiendo incluir otros parámetros adicionales a los establecidos en el presente reglamento. Para aquellos compuestos que no se hubieran especificado objetivos de calidad de aire en este reglamento o según lo dispuesto en el inciso anterior, la Dirección Nacional de Medio Ambiente podrá tomar como criterio guía los establecidos por la Organización Mundial de la Salud, la Unión Europea o los derivados de otras normas de referencia reconocidas internacionalmente.

Artículo 6.- (Guías). La Dirección Nacional de Medio Ambiente elaborará guías, protocolos o instructivos para la evaluación de la calidad del aire, incluyendo las metodologías de monitoreo, ubicación e instalación de estaciones, programas de aseguramiento y control de calidad de las mediciones, criterios de evaluación y tratamiento de datos y sistemas de transmisión de datos, entre otros.

Artículo 7.- (Monitoreo). Sin perjuicio del monitoreo que se realice en el ámbito público para la evaluación de la calidad del aire ambiente, cuando la necesidad del monitoreo se relacione o pueda relacionarse con determinadas fuentes fijas, será de cargo del titular o responsable de cada una de esas fuentes, la instalación y seguimiento del monitoreo destinado a conocer la calidad del aire en su entorno, de conformidad con las pautas, metodologías y protocolos que establezca la Dirección Nacional de Medio Ambiente.

En caso que se identifique más de una actividad que puede ser la causante de las emisiones contaminantes al aire en un mismo sitio o zona, la Dirección Nacional de Medio Ambiente podrá autorizar la realización de monitoreos conjuntos entre los involucrados.

Artículo 8.- (Planes de acción). Cuando de las evaluaciones ambientales resulte que, en determinado sitio o zona, no se alcanzan los objetivos de calidad del aire, el Ministerio de Ambiente elaborará y ejecutará los planes de acción para mejorar la calidad del aire.

El carácter de estos planes dependerá del grado y número de excedencias en la superación de los objetivos de calidad preestablecidos e incluirán las medidas para disminuir las emisiones, prevenir la contaminación y mejorar la calidad del aire.

El Ministerio de Ambiente establecerá los umbrales a partir de los cuales se generarán las diferentes acciones, así como los criterios a seguir para la elaboración e implementación de los referidos planes.

Artículo 9.- (Información). La Dirección Nacional de Medio Ambiente mantendrá actualizada la información sobre la calidad del aire ambiente a través del Observatorio Ambiental Nacional, incorporando tanto la información generada por sí misma, como la derivada por otros actores. En este último caso se definirán los protocolos que correspondan para su compatibilidad y difusión.

CAPÍTULO III. Estándares de emisión de fuentes fijas: aspectos generales

Artículo 10.- (Definición). A los efectos del presente reglamento, los estándares de emisión de fuentes fijas corresponden a la concentración máxima admisible de gases o partículas generados por un proceso u operación antrópicas o con participación humana, localizable en un lugar geográfico determinado.

Se entiende por fuente fija puntual, cualquier edificación o instalación donde se realizan operaciones que dan origen a la emisión al aire de compuestos que se evacúan o liberan por una chimenea o lo que oficie como tal.

Por fuentes fijas difusas se entienden aquellas emisiones que no se encuentran canalizadas a través de un punto de descarga, como las que provienen de la manipulación de sustancias volátiles (como los solventes), emisiones de gases olorosos, fugas de equipos, tanques de mezcla, liberación de polvo por operaciones de transporte,

emisiones generadas en unidades de tratamiento de efluentes y residuos o en almacenamientos de materiales sólidos, entre otros.

Artículo 11.- (Alcance). Los estándares de emisión serán de aplicación y deberán ser cumplidos por toda fuente fija puntual, ya sea nueva o existente a la fecha de publicación del presente decreto, que tenga algún tipo de emisión al aire, dentro de algunas de las actividades o ramos de actividad siguientes:

- a) combustión para generación de energía,
- b) fabricación de clinker y cal,
- c) co-procesamiento en hornos de clinker,
- d) fabricación de papel y celulosa,
- e) fabricación de ácido sulfúrico y fertilizantes,
- f) refinación de petróleo,
- g) fundición de metales y acería,
- h) incineración de residuos, y,
- i) otras actividades no comprendidas en las anteriores.

Cuando en una misma instalación o emprendimiento se desarrolle más de una de las actividades referidas, se deberá cumplir con los estándares de emisión correspondientes a cada una de ellas, y, cuando corresponda, con los niveles máximos aplicables a los Compuestos Orgánicos Volátiles.

Artículo 12.- (Excepciones). Quedan exceptuados de lo dispuesto en el artículo anterior, los pequeños emisores de fuentes fijas puntuales, entendiéndose por tales:

- a) los emisores comprendidos en el sector residencial, cuando se trate de viviendas unitarias o con sistemas de calefacción individual;
- b) los emisores del sector residencial, servicios y comercio, que tengan asociados procesos de combustión con potencia térmica inferior a 0.5 MW (medio megawatt); y,
- c) los emisores de otras actividades que por su poca significación el Ministerio de Ambiente resuelva que deben integrarse a la categoría de pequeños emisores.

Artículo 13.- (Cumplimiento). Los estándares de emisión serán de cumplimiento obligatorio en condiciones de operación en régimen. La tolerancia de salida de régimen será determinada en cada caso por la Dirección Nacional de Medio Ambiente. Para el caso de procesos discontinuos (batch) los estándares de emisión serán de aplicación durante todo el periodo en que se encuentren en funcionamiento.

Artículo 14.- (Aplicación). Sin perjuicio de los estándares de emisión que se establecen en este reglamento, la Dirección Nacional de Medio Ambiente podrá agregar nuevos parámetros de emisión o hacer más exigentes los establecidos por estas normas, siempre que existan razones técnicas justificadas en función de la significancia (carga y tipo de compuestos) de la emisión de la fuente fija, las características del entorno donde se localiza, la evaluación de los impactos acumulativos y los niveles de base de calidad de aire en el área de influencia en relación a los objetivos de calidad.

En casos particulares, la Dirección Nacional de Medio Ambiente podrá disminuir las exigencias establecidas, siempre que el interesado demuestre que la carga emitida no alterará significativamente la calidad del aire.

Artículo 15.- (Adicionalidad). Cuando la Dirección Nacional de Medio Ambiente constate que debido a una actividad específica no se cumplen los objetivos de calidad de aire, podrá exigir las medidas adicionales necesarias a tomar, sin perjuicio del cumplimiento de los estándares de emisión.

Artículo 16.- (Complementariedad). Los estándares de emisión establecidos en el presente reglamento no sustituyen aquellos estándares de emisión más estrictos o para otros compuestos, que se hubieran establecido mediante autorizaciones ambientales otorgadas con anterioridad a la publicación del presente.

Artículo 17.- (Expresión). Los valores de los estándares de emisión a los que refiere este reglamento, están expresados en condiciones normales de presión y temperatura, en base seca, que corresponden a:

- a) Presión de 1.013 mbar (mil trece milibares de presión) o 101,3 kPa (ciento un kilo pascales con tres décimas); y,
- b) Temperatura de 0°C (cero grados Celsius) o 273,15 K (doscientos setenta y tres grados Kelvin con quince).

CAPÍTULO IV. Estándares de emisión de fuentes fijas: determinación

Artículo 18.- (Unidades de combustión). Los estándares de emisión de las unidades de combustión serán los que se establecen en la Tabla 3.

Tabla 3. Estándares de emisión para unidades de combustión

Unidad de combustión (Potencia térmica) ⁽¹⁾	Combustible ⁽²⁾	SO ₂ (mg/Nm ³)	NOx como NO ₂ (mg/Nm ³)	MP (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	Oxígeno seco (%)
> 40 MW	Gas	--	400	--	--	3
	Líquido	1700	600	50	--	3
	Sólido	1400	900	50	--	6
≥ 12 MW y < 40 MW	Gas	--	400	--	--	3
	Líquido	5100	600	250	--	3
	Sólido	4250	900	250	1500	6
≥ 5 MW y < 12 MW	Gas	--	400	--	--	3
	Líquido	5100	600	350	--	3
	Sólido	4250	900	350	2000	6
< 5 MW con combustibles alternativos	Líquido	5100	600	350	--	3
	Sólido	4250	900	350	2000	6
TURBINAS	Gas natural	--	100	--	--	15
	Líquido	80	150	50		15
MOTORES	Gas natural	--	200 ⁽³⁾	--	--	15
			400 ⁽⁴⁾			
	Líquido	600	1850 ⁽⁵⁾	50	--	15
			2000			

⁽¹⁾ La potencia térmica de un emprendimiento, corresponde a la suma aritmética de todas las potencias nominales de las unidades que producen o generan en el emprendimiento. No incluye las unidades de respaldo, si estas se utilizan transitoriamente y únicamente en sustitución de las unidades principales.

⁽²⁾ Para el cálculo de los estándares de emisión cuando se mezclan combustibles se utilizará la siguiente fórmula:

$$\text{Donde: } Lp = \frac{(Lc \times C \times PCI)_1 + (Lc \times C \times PCI)_2}{(C \times PCI)_1 + (C \times PCI)_2}$$

Lp= Límite ponderado

Lc= Límite de emisión del combustible utilizado

C= Consumo de cada combustible

PCI= Poder calorífico inferior de cada combustible utilizado. Los subíndices 1 y 2 corresponden a los combustibles.

⁽³⁾ Encendido a chispa.

⁽⁴⁾ Combustible dual.

⁽⁵⁾ Encendido de compresión.

Artículo 19.- (Otras disposiciones aplicables a unidades de combustión). Además de los estándares de emisión contenidos en el artículo anterior, serán aplicables a las unidades de combustión las disposiciones siguientes:

- a) Las unidades de combustión con capacidad térmica nominal inferior a 5 MW y que no utilicen combustible alternativo, no deberán superar el valor de opacidad de 1 en la escala de Ringelmann o 2 en la escala de Bacharach.

- b) En todos los casos se deberá asegurar el cumplimiento de las prácticas de mantenimiento de los equipos de combustión y de los sistemas de tratamiento de emisiones al aire, si correspondiere, de acuerdo con los programas establecidos por el operador de la fuente y aquellos recomendados por el fabricante del equipo de combustión, debiéndose mantener registro de los mismos.
- c) Las nuevas unidades de combustión deberán contar con certificados del fabricante del equipo de combustión, en lo referente a los niveles de emisiones esperados, basándose en las características del combustible.
- d) Para el cálculo de la potencia térmica nominal de las instalaciones de combustión, se utilizará el Poder Calorífico Inferior del combustible utilizado.

Artículo 20.- (Fabricación de clinker y cal). Los estándares de emisión para actividades asociadas a la fabricación de clinker y cal serán los que se establecen en la Tabla 4.

Tabla 4. Estándares de emisión para fabricación de clinker y cal ⁽³⁾

Parámetro	Unidad	
	Hornos de producción de Clinker y cal	Otras fuentes (molinos, enfriador de Clinker, envasado, entre otras)
MP (mg/Nm ³)	75	50
SO ₂ (mg/Nm ³)	500	--
NO _x como NO ₂ (mg/Nm ³)	850 ⁽¹⁾	--
	1400 ⁽²⁾	
Cd+Tl y sus compuestos (expresados como Cd+Tl) (mg/Nm ³)	0,07	--
Hg y sus compuestos (expresado en Hg) (mg/Nm ³)	0,07	--
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V y sus compuestos (expresados en Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V) (mg/Nm ³)	0,7	--

⁽¹⁾ Para plantas nuevas. ⁽²⁾ Tolerancia para plantas existentes. ⁽³⁾ Los estándares de emisión corresponden al 7 % de oxígeno.

Artículo 21.- (Coprocesamiento en hornos de clinker). En los casos en los que en el horno de clinker se procesen residuos, además de los estándares de emisión previstos en la Tabla 4, también serán de aplicación los que se establecen en la Tabla 5.

Tabla 5. Estándares de emisión adicionales para el coprocesamiento de residuos en hornos de clinker ⁽¹⁾

Parámetro	Estándar
MP (mg/Nm ³)	40
HCl (mg/Nm ³)	14
HF (mg/Nm ³)	1,4
Dioxinas y furanos (ng EQT/Nm ³)	0,14

⁽¹⁾ Los estándares de emisión corresponden al 7 % de oxígeno.

Artículo 22.- (Fabricación de pasta de celulosa y papel). Los estándares de emisión para actividades asociadas a la fabricación de pasta de celulosa y papel son los que se establecen en la Tabla 6, con los adicionales de la Tabla 7.

Tabla 6. Estándares de emisión para fabricación de pasta de celulosa y papel ⁽⁷⁾

Parámetro	MP (mg/Nm ³)		SO ₂ (mg/Nm ³)		NO _x como NO ₂ (mg/Nm ³)		TRS ⁽¹⁾ (mg H ₂ S/Nm ³)	
	∨ 150.000 TSA/año	^ 150.000 TSA/año	∨ 150.000 TSA/año	^ 150.000 TSA/año	∨ 150.000 TSA/año	^ 150.000 TSA/año	∨ 150.000 TSA/año	>150.000 0 TSA/año
Producción ⁽²⁾								
Caldera de recuperación	100	70	100	40	500	280	9	6
Horno de Cal	100	50	100	50 ⁽⁴⁾	500	280 ⁽⁴⁾	19	19
				110 ⁽⁵⁾		500 ⁽⁵⁾		
Tanque de disolución	0,1 kg/kgSS ⁽³⁾	0,1 kg/kgSS ⁽³⁾					0,016 kg/kgSS ⁽⁶⁾	0,016 kg/kgSS ⁽⁶⁾

- (1) TRS: azufres reducidos totales
- (2) TSA: toneladas secas al aire
- (3) SS: sólidos secos de licor negro
- (4) Quema de combustible líquido, sin quema de gases olorosos y/o metanol
- (5) Quema de combustible líquido, con quema de gases olorosos y/o metanol
- (6) SS: sólidos secos de licor negro como H₂S
- (7) Los estándares de emisión corresponden al 7 % de oxígeno.

Artículo 23.- (Estándares adicionales para caldera de recuperación y horno de cal). Además de los estándares de emisión previstos en los artículos anteriores, para la caldera de recuperación en los procesos de fabricación de pasta de celulosa y papel y para el horno de cal en los procesos de fabricación de clinker y cal, también serán de aplicación los que se establecen en la Tabla 7.

Tabla 7. Estándares de emisión adicionales para caldera de recuperación y hornos de cal

Parámetro	Estándar
Dioxinas y furanos (ng EQT/Nm ³)	0,14
Cd+Tl y sus compuestos (expresados como Cd+Tl) (mg/Nm ³)	0,07
Hg y sus compuestos (expresado en Hg) (mg/Nm ³)	0,07
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V y sus compuestos (expresados en Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V) (mg/Nm ³)	0,7

Artículo 24.- (Producción de ácido sulfúrico y fertilizantes). Los estándares de emisión para actividades asociadas a la producción de ácido sulfúrico y a la fabricación y granulado de fertilizantes, serán los que se establecen en las Tablas 8 y 9, respectivamente.

Tabla 8. Estándares de emisión para fabricación de ácido sulfúrico

Parámetro	Producción ≥ 300 ton/d	Producción < 300 ton/día
SO ₂ ⁽¹⁾	4 kg/ton H ₂ SO ₄ al 100 % 1700 mg/Nm ³	13 kg/ton H ₂ SO ₄ al 100 % 5000 mg/Nm ³
Niebla ácida	100 mg H ₂ SO ₄ /Nm ³	
Opacidad	10 %	

⁽¹⁾ Todo emprendimiento deberá cumplir con al menos uno de los estándares para cierta producción

Tabla 9. Estándares de emisión para fabricación y granulado de fertilizantes

Proceso	Parámetro	Concentración	
Fertilizantes nitrogenados	NH ₃	50 mg/Nm ³	
	NO _x como NO ₂	500 mg/Nm ³	
	MP	75 mg/Nm ³	
Fertilizantes fosfóricos	Compuestos de Flúor (expresados como HF) ⁽¹⁾	Si carga ≥ 20 g/ton P ₂ O ₅	Hasta 5 mg/Nm ³
		Si carga < 20 g/ton P ₂ O ₅	Hasta 10 mg/Nm ³
	MP	75 mg/Nm ³	
		150 mg/Nm ³	

⁽¹⁾ HF: ácido fluorhídrico; ⁽²⁾ Plantas nuevas; ⁽³⁾ Tolerancia para plantas existentes a la fecha de publicación de este reglamento

Artículo 25.- (Refinación de petróleo). Los estándares de emisión para actividades asociadas a la refinación de petróleo, serán los que se establecen en la Tabla 10.

Tabla 10. Estándares de emisión para refinación de petróleo

Parámetro	Tipo de Combustible	Hornos y calderas		Unidades de cracking catalítico de lecho fluido (fccu)		Planta de recuperación de azufre (sru)	
		Fuente existente	Fuente nueva	Fuente existente	Fuente nueva	Fuente existente	Fuente nueva
NO _x como NO ₂ (mg/Nm ³)	Gas de refinería	150	100	400	100	--	--
	Combustible líquido	300	--				
SO ₂ (mg/Nm ³)	Gas de refinería	500	35	1200	300	6000	1200

Parámetro	Tipo de Combustible	Hornos y calderas		Unidades de cracking catalítico de lecho fluido (fccu)		Planta de recuperación de azufre (sru)	
		Fuente existente	Fuente nueva	Fuente existente	Fuente nueva	Fuente existente	Fuente nueva
	Combustible líquido	1700	600			--	--
CO (mg/Nm ³)	Gas de refinería	200	100	200	100	--	--
	Combustible líquido						
MP (mg/Nm ³)	Gas de refinería	50	25	50	25	--	--
	Combustible líquido						
H ₂ S (mg/Nm ³)	Gas de refinería	10	5	10	5	10	5
Ni (mg/Nm ³)	--	1		1		--	
V (mg/Nm ³)	--	5		5		--	

⁽¹⁾ Estándares corregidos al 3 % de oxígeno

Artículo 26.- (Producción primaria y secundaria de metales y acería). Los estándares de emisión para actividades asociadas a la producción primaria y secundaria de metales y acería, serán los que se establecen en la Tabla 11; salvo para los hornos de recalentamiento y tratamientos térmicos, cuyo único estándar de emisión será en opacidad, la cual no deberá superar 1,5 en la escala de Ringelmann o su equivalente en Bacharach.

Tabla 11. Estándares de emisión para producción primaria y secundaria de metales y acería ⁽¹⁾

Parámetro	Estándar (mg/Nm ³)
MP	50
CO	300
Pb, Cd y sus compuestos	2
Cr, Ni y sus compuestos	5
Cu y sus compuestos (fundición no ferrosa)	5
	(20) para fundición de Cu y sus aleaciones
HCl (fundentes de cloruro y acería)	10
HF (fundentes de cloruro y acería)	10
SO ₂	500
NO _x como NO ₂	700

⁽¹⁾ Los estándares de emisión corresponden al 3 % de oxígeno para combustibles líquidos y gaseosos, y, al 6 % de oxígeno para combustibles sólidos.

Artículo 27.- (Incineración de residuos). Los estándares de emisión para plantas de incineración de residuos, incluyendo las operaciones de valorización energética, son los que se establecen en la Tabla 12. Estos estándares no serán de aplicación para incineradores de residuos sanitarios, para los cuales seguirán siendo de aplicación los estándares específicos vigentes (Decreto 586/009, de 21 de diciembre de 2009).

Tabla 12. Estándares de emisión para incineración de residuos ⁽¹⁾

Parámetro	Estándar
MP (mg/Nm ³)	20
COT (carbono Orgánico Total) (mg/Nm ³)	14
HCl (mg/Nm ³)	14
HF (mg/Nm ³)	1,4
SO ₂ (mg/Nm ³)	70
NO _x como NO ₂ (mg/Nm ³)	560
CO (mg/Nm ³)	70
Cd+Tl y sus compuestos (expresados como Cd+Tl) (mg/Nm ³)	0,07
Hg y sus compuestos (expresado en Hg) (mg/Nm ³)	0,07
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V y sus compuestos (expresados en Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V) (mg/Nm ³)	0,7
Dioxinas y furanos (ng EQT/Nm ³)	0,14

⁽¹⁾ Los estándares de emisión corresponden al 7 % de oxígeno.

Artículo 28.- (Otras actividades no comprendidas en las anteriores). Los estándares de emisión aplicables a fuentes fijas puntuales en actividades no comprendidas en las indicadas para los estándares de emisión establecidos en este reglamento, serán los que se indican en la Tabla 13.

Tabla 13. Estándares de emisión para otras actividades no comprendidas en las anteriores⁽³⁾

Parámetro	Estándar
Opacidad (escala Ringelmann)	1
MP (mg/Nm ³)	200
	50 ⁽¹⁾
NO _x como NO ₂ (mg/Nm ³)	350
	1500 ⁽²⁾
SO ₂ (mg/Nm ³)	1000
CN como HCN (mg/Nm ³)	5
Compuestos de Flúor como HF (mg/Nm ³)	50
H ₂ S (mg/Nm ³)	5
Compuestos inorgánicos de cloro como HCl (mg/Nm ³)	100
Niebla ácida (mg/Nm ³)	100
Cr total (mg/Nm ³)	5
Cr VI (mg/Nm ³)	1
As y sus compuestos (mg/Nm ³)	1
Cd y sus compuestos (mg/Nm ³)	1
Pb y sus compuestos (mg/Nm ³)	1
Hg y sus compuestos (mg/Nm ³)	0,2
Cu y sus compuestos (mg/Nm ³)	8
Dioxinas y furanos (ngEQT/Nm ³)	0,14

⁽¹⁾ Estándar a aplicar para procesos de los que se puedan derivar sustancias tóxicas que puedan estar presentes en el material particulado (metales pesados, agroquímicos y medicamentos, entre otros).

⁽²⁾ Estándar para producción de vidrio.

⁽³⁾ Los estándares de emisión corresponden al 7% de oxígeno.

Artículo 29.- (Compuestos orgánicos volátiles). En el caso de instalaciones de cualquier actividad con emisiones al aire provenientes de fuentes fijas puntuales, el estándar de emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles totales (COVt) se establece en 100 mg/Nm³, excepto en los casos que se utilicen sustancias o mezclas de compuestos orgánicos volátiles clasificados como carcinógenos, mutagénicos o tóxicos para la reproducción. Los criterios de clasificación de sustancias serán los que se establecieron en el artículo 8° del Decreto 182/013, de 20 de junio de 2013.

En este último caso, el estándar de emisión será de 2 mg/Nm³, referido a la suma de las masas de los distintos compuestos de esas características.

Para el control de las emisiones difusas, el Ministerio de Ambiente determinará los sistemas que deberán adoptarse para el almacenamiento de sustancias tóxicas volátiles, así como podrá establecer límites máximos de emisión difusa para compuestos orgánicos volátiles.

CAPITULO V. Estándares de emisión de fuentes fijas: otras disposiciones

Artículo 30.- (Monitoreo de emisiones). Todo titular de una fuente fija puntual, alcanzada por los estándares de emisión del presente reglamento, deberá monitorear sus emisiones, de modo continuo o discreto dependiendo del rubro o porte del emprendimiento.

La Dirección Nacional de Medio Ambiente elaborará y publicará los criterios y guías para el monitoreo de emisiones de fuentes fijas, incluyendo las condiciones que deben cumplir los ductos de emisión para asegurar la representatividad, así como la frecuencia y los compuestos mínimos a monitorear para cada rubro. Se incluirá además, la información mínima y los formatos para la presentación de los resultados de los monitoreos ante la Dirección Nacional de Medio Ambiente.

La Dirección Nacional de Medio Ambiente establecerá los métodos de referencia estandarizados para el monitoreo de emisiones. Hasta tanto dichos métodos de referencia no sean aprobados se utilizará alguno de los reconocidos a nivel internacional.

Artículo 31.- (Condiciones de monitoreo). Aquellos emprendimientos que tengan emisiones por chimenea, deberán asegurar que los ductos de emisión cuenten con instalaciones o infraestructura mínima que permita la realización de monitoreo en condiciones adecuadas, que aseguren la representatividad del mismo y la seguridad durante el proceso de medición.

En los procesos en los que se incorpora oxígeno puro, en los que las emisiones difusas se derivan a la chimenea que evacua las emisiones puntuales o en los que se utiliza aire ambiente para disminuir la temperatura de las emisiones, la Dirección Nacional de Medio Ambiente establecerá en cada caso la forma en que se realizarán los monitoreos de emisiones, y la referencia al contenido de oxígeno a utilizar para evaluar el cumplimiento de los estándares de emisión.

Artículo 32.- (Niveles de tolerancia). Los niveles de tolerancia en el no cumplimiento de los estándares de emisión seguirán los siguientes criterios:

- a) Monitoreos continuos: él 90% de todos los valores medios diarios de un año calendario deben estar por debajo de los estándares de emisión.

Los valores medios diarios son el resultado del promedio de mediciones con una frecuencia de 10 minutos o menor.

Ningún valor medio diario puede exceder en 130 % (ciento treinta por ciento) del estándar de emisión.

- b) Monitoreos discretos: el valor límite de emisión corresponde al máximo establecido como estándar de emisión en el presente reglamento.

A esos efectos, al momento de la toma de cada muestra, los emprendimientos deberán estar operando como mínimo al 90 % (noventa por ciento) de la capacidad de operación promedio de los últimos 12 (doce) meses. Dicho porcentaje de operación deberá estar basado en los datos del tipo y consumo de combustible, de la producción o de la carga, según corresponda.

Artículo 33.- (Otras obligaciones). Todo titular de una fuente fija alcanzada por los estándares de emisión del presente reglamento, deberá:

- a) Contar, mantener y operar los mecanismos necesarios para minimizar sus emisiones contaminantes a la atmósfera, tanto las puntuales como las difusas.
- b) Implementar medidas de mitigación para evitar la generación de olores desagradables en el área de influencia.
- c) Adoptar en caso de disponer de emisiones puntuales, los procesos de dispersión más adecuados para minimizar el impacto en la calidad del aire en su zona de influencia. A esos efectos, la Dirección Nacional de Medio Ambiente podrá establecer criterios específicos.
- d) Contar con la autorización ambiental que corresponda de acuerdo a lo establecido en el presente reglamento.
- e) Asegurar el adecuado funcionamiento de los elementos necesarios para el tratamiento de emisiones, el control y dispersión de las mismas.
- f) Realizar monitoreos de sus emisiones y, cuando corresponda, de la calidad del aire, en la forma y periodicidad prevista en la autorización respectiva y siguiendo las pautas o instrucciones técnicas que se establezcan.
- g) Presentar informes periódicos que den cuenta de los datos operativos de la actividad y el control de emisiones de acuerdo a las pautas y demás instrucciones técnicas que establezca la Dirección Nacional de

Medio Ambiente, en las que se promoverá la integración con las obligaciones de información que surjan de otras normas ambientales.

- h) Presentar informes periódicos de calidad del aire en los casos que se establezca en las correspondientes autorizaciones ambientales.
- i) Mantener, conservar y tener disponible para la Dirección Nacional de Medio Ambiente toda la información relativa al monitoreo de emisiones.
- j) Los titulares de las actividades alcanzadas por este reglamento, deberán brindar la asistencia necesaria a la Dirección Nacional de Medio Ambiente, para llevar adelante actividades inspectivas, incluyendo el monitoreo de la actividad.

Artículo 34.- (Nuevas fuentes). Toda nueva instalación o la ampliación de las existentes, que tengan emisiones al aire de una fuente fija alcanzada por los estándares de emisión del presente reglamento, deberán utilizar las mejores prácticas y la mejor tecnología disponible de acuerdo a la escala del emprendimiento, de forma de minimizar sus emisiones al aire.

CAPÍTULO VI. Régimen de autorización de emisiones y plazos de adecuación

Artículo 35.- (Autorización de emisión). Requerirán contar con Autorización de Emisión vigente, las actividades que se detallan a continuación, sean las mismas de titularidad pública o privada:

- a) La industria manufacturera definida según la clasificación Internacional Industrial Uniforme de las Naciones Unidas en su última versión vigente, adaptada para el Uruguay por el Instituto Nacional de Estadística.
- b) El fraccionamiento o almacenamiento de sustancias y productos peligrosos, cuando involucren sustancias volátiles.
- c) Las entidades de reciclado, tratamiento y o disposición final de residuos sólidos de cualquier tipo, de las cuales se deriven emisiones a la atmósfera.
- d) La generación de energía eléctrica, cuando de esta actividad se generen emisiones a la atmósfera.
- e) Otras actividades que involucren procesos de combustión de potencia térmica superior a 40 MW.
- f) Aquellas otras actividades que así lo disponga el Ministerio de Ambiente.

El Ministerio de Ambiente establecerá las condiciones para la efectiva aplicación del presente reglamento a las actividades comprendidas, así como determinará el alcance de las mismas, teniendo en cuenta la magnitud y dimensión de la actividad, y la significancia de la emisión.

Artículo 36.- (Pautas). El Ministerio de Ambiente, en el plazo de 6 (seis) meses contados a partir de la fecha de publicación del presente reglamento, establecerá las pautas para la presentación de la solicitud de Autorización de Emisión, atendiendo a la integración de la misma con otras autorizaciones ambientales.

Artículo 37.- (Otorgamiento y vigencia). La Autorización de Emisión será otorgada por el Ministerio de Ambiente y tendrá una vigencia máxima de 3 (tres) años.

Artículo 38.- (Fuentes nuevas). Para fuentes nuevas sujetas a Autorización de Emisión, dicha autorización será condición previa para el inicio de la operación.

Cuando se trate de una actividad sujeta a Autorización Ambiental Previa o Autorización Ambiental Especial, de conformidad con lo dispuesto por la Ley N° 16.466, del 19 de enero de 1994 y su reglamentación, la Autorización de Emisión se tramitará y otorgará como parte de la Autorización Ambiental Previa, Autorización Ambiental de Operación o Autorización Ambiental Especial, según corresponda.

Artículo 39.- (Fuentes existentes). Para las fuentes sujetas a Autorización de Emisión existentes a la fecha de publicación de este reglamento, que no hubieran requerido contar con Autorización Ambiental Previa o Autorización Ambiental Especial, de conformidad con lo dispuesto por la Ley N° 16.466, del 19 de enero de 1994

y su reglamentación, la Dirección Nacional de Medio Ambiente establecerá un cronograma por rubro de actividad, para que en un término no mayor a 3 (tres) años, presenten la solicitud de Autorización de Emisión y los planes de adecuación en los casos que corresponda.

Las fuentes sujetas a Autorización de Emisión, existentes a la fecha de publicación de este reglamento, que contaran con Autorización Ambiental de Operación o Autorización Ambiental Especial vigente, deberán presentar en los casos que corresponda, un plan de adecuación a los estándares de emisión al solicitar la renovación de la autorización ambiental respectiva.

Para las fuentes ya existentes a la fecha de publicación de este reglamento, el plazo máximo de adecuación a los estándares de emisión establecidos será de 5 (cinco) años. El Ministerio de Ambiente, por motivos fundados podrá imponer un plazo de adecuación más breve, si entiende que hay un riesgo ambiental asociado o extender el mismo, si las tecnologías no permiten la adecuación y no existe un riesgo ambiental asociado.

Artículo 40.- (Responsabilidad por daños). Sin perjuicio de las autorizaciones que puedan otorgarse y del cumplimiento de este reglamento, el titular de la fuente generadora de la emisión será siempre responsable de los perjuicios que ésta pueda causar.

CAPÍTULO VII. Estándares de emisión de fuentes móviles

Artículo 41.- (Definición y alcance). A los efectos del presente reglamento, se entiende por estándares de emisión de fuentes móviles, los valores máximos de gases y partículas que un motor o vehículo puede emitir bajo condiciones normalizadas. No quedan comprendidos en este reglamento, las aeronaves cualquiera sea su tipo, ni los buques y artefactos navales.

Artículo 42.- (Prohibición). A partir del plazo de 2 (dos) años, contados a partir de la fecha de publicación del presente decreto, prohíbase la importación de vehículos automotores que no cumplan o no se encuentren homologados respecto del cumplimiento de los estándares de emisión de fuentes móviles que se establecen en este reglamento.

Asimismo, en igual plazo, prohíbase la comercialización de vehículos automotores cero km que no cumplan con las mismas condiciones.

Artículo 43.- (Vehículos en circulación). El Ministerio de Ambiente establecerá, en coordinación con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, el Ministerio de Industria, Energía y Minería y las intendencias, las estrategias para disminuir las emisiones vehiculares tanto de partículas como de gases, provenientes del parque vehicular que se encuentre en circulación a la fecha de publicación de este decreto y, en especial, a la entrada en vigencia de la prohibición prevista en el artículo anterior.

Artículo 44.- (Excepción). Los estándares de emisión de fuentes fijas no serán de aplicación a aquellos vehículos que ingresen al territorio nacional en forma transitoria, sea para competencias, exhibiciones o con destino a proyectos experimentales para evaluación de tecnologías. El Poder Ejecutivo podrá establecer otras excepciones temporales.

En todos los casos a los que refiere el inciso anterior, se requerirá la autorización temporal del Ministerio de Ambiente.

Artículo 45.- (Categorización de vehículos automotores). A los efectos de la aplicación de los estándares de emisión de fuentes móviles, los vehículos alcanzados por este reglamento se categorizan según se establece en la Tabla 14.

Tabla 14. Categorías de vehículos automotores ^{(1) (2)}

Categoría	Tipo	Ruedas	Asientos	Peso ⁽⁴⁾ PBT	Masa de referencia ⁽⁵⁾	
					Livianos	Pesados
M	Para transporte de pasajeros	≥ 4	--	--	≤ 2610 kg	> 2610 kg
M1		--	≤ 8 ⁽³⁾	--		
M2		--	> 8 ⁽³⁾	≤ 5 toneladas		

Categoría	Tipo	Ruedas	Asientos	Peso ⁽⁴⁾ PBT	Masa de referencia ⁽⁵⁾	
					Livianos	Pesados
M3		--	> 8 ⁽³⁾	> 5 toneladas	--	Todos
N	Para transporte de carga	≥ 4	--	--	≤ 2610 kg	> 2610 kg
N1		--	--	≤ 3,5 toneladas		
N2		--	--	> 3,5 toneladas ≤ 12 toneladas		
N3		--	--	> 12 toneladas	--	Todos

⁽¹⁾ Por vehículo automotor se entiende todo vehículo autopropulsado, apto para circular por carretera, que se mueve por sus propios medios, que posee por lo menos cuatro ruedas y un sistema de dirección propia, que sirve directamente para el transporte de personas y/o cargas o para tracción de otros vehículos sin motor.

⁽²⁾ La categorización se basa en la resolución consolidada de las Naciones Unidas sobre la construcción de vehículos (ECE/TRANS/WP.29/78/Rev. 6).

⁽³⁾ Además del asiento del conductor.

⁽⁴⁾ Por peso bruto total o PBT, se entiende el peso máximo del vehículo, constituido por la suma de la tara más su carga útil; siendo la tara el peso propio del vehículo, considerando incluido en él, el peso de los fluidos y del combustible contenido en el depósito (que estará lleno hasta el 90% de su capacidad como mínimo), de las herramientas, accesorios, ruedas de auxilio, extintor de incendio y demás equipamientos necesarios para su funcionamiento, sin conductor, ni pasajeros ni carga; y, la carga útil, la capacidad de carga del vehículo, incluyendo el peso de los usuarios.

⁽⁵⁾ Por masa de referencia se entiende la tara del vehículo, incrementada en un valor uniforme de 100 kg.

Artículo 46.- (Vehículos con motor de encendido por chispa). Los vehículos automotores cero km con motor de encendido por chispa, deberán ser mecánicamente aptos para cumplir con los estándares de emisión que se establecen en la Tabla 15.

Tabla 15. Estándares de emisión para vehículos con motor de encendido por chispa ⁽¹⁾

Categoría	Masa de referencia (kg)	Emisiones de escape (mg/km)				
		CO	HCT	NOx	NMHC	MP ⁽²⁾ ⁽³⁾
M	Todas	1000	100	60	68	5
N1	≤ 1305	1000	100	60	68	5
N1	> 1305 y ≤ 1760	1810	130	75	90	5
N1	> 1760	2270	160	82	108	5
N2		2270	160	82	108	5

⁽¹⁾ Corresponden a los estándares del Reglamento (CE) N° 715/2007 (Euro 5).

⁽²⁾ Aplicable sólo a vehículos con motores de inyección directa.

⁽³⁾ 4,5 mg/km utilizando el procedimiento de medición de partículas desarrollado por UN/ECE.

Artículo 47.- (Vehículos livianos con motor de encendido por compresión). Los vehículos automotores cero km con motor de encendido por compresión, con una masa de referencia liviana (menor o igual a 2610 kg), deberán ser mecánicamente aptos para cumplir con los estándares de emisión que se establecen en la Tabla 16.

Tabla 16. Estándares de emisión para vehículos livianos con motor de encendido por compresión ⁽¹⁾

Categoría	Masa de referencia (kg)	Emisiones de escape (mg/km)			
		CO	HC + NOx	NOx	MP
M	Todas	500	230	180	5
N1	≤ 1305	500	230	180	5
N1	> 1305 y ≤ 1760	630	295	235	5
N1	> 1760	740	350	280	5
N2	≤ 2610	740	350	280	5

⁽¹⁾ Corresponden a los estándares del Reglamento (CE) N° 715/2007 (Euro 5).

Artículo 48.- (Vehículos pesados con motor de encendido por compresión). Los vehículos automotores cero km con motor de encendido por compresión, con una masa de referencia pesada (superior a 2610 kg), deberán ser mecánicamente aptos para cumplir con los estándares de emisión que se establecen en la Tabla 17.

Tabla 17. Estándares de emisión para vehículos pesados con motor de encendido por compresión ⁽¹⁾

Test	Emisiones de escape					
	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NMHC (g/kWh)	NOx (g/kWh)	MP (g/kWh)	HUMOS (m ⁻¹)
ESC (2)	1,5	0,46	--	2,0	0,02	0,5
ETC (3)	4,0	--	0,55	2,0	0,03	--

⁽¹⁾ Corresponden a los estándares de la Directiva N° 2005/55/CE (Euro V).

⁽²⁾ Corresponde a Ciclo Estacionario Europeo, de acuerdo a la Directiva N° 2005/55/CE.

⁽³⁾ Corresponde a Ciclo Transitorio Europeo, de acuerdo a la Directiva N° 2005/55/CE.

Artículo 49.- (Homologación, contralor y etiquetado). El Ministerio de Ambiente, en coordinación con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas y el Ministerio de Industria, Energía y Minería, establecerá los criterios para la homologación de los vehículos y los procedimientos administrativos necesarios para el control de la documentación a efectos de verificar el cumplimiento de los estándares establecidos. Asimismo, realizará directamente o acordará con otros organismos, la realización de los contralores necesarios para garantizar que los vehículos automotores cumplen los estándares de emisión.

El Ministerio de Ambiente, en coordinación con el Ministerio de Industria, Energía y Minería, podrá establecer un sistema de etiquetado vehicular para facilitar la información al consumidor.

Artículo 50.- (Calidad de combustible). El Ministerio de Ambiente, en coordinación con el Ministerio de Industria, Energía y Minería y ANCAP, evaluará la calidad del combustible y otras condiciones que permitan la incorporación de estándares más exigentes.

Artículo 51.- (Dispositivos). Será obligación del importador, fabricante o armador, y en general, de todo tenedor de un vehículo automotor a cualquier título, mantener y no alterar los dispositivos, tanto materiales como electrónicos, que faciliten el cumplimiento de los estándares o que puedan modificar los resultados de los ensayos durante las mediciones.

Artículo 52.- (Otras fuentes móviles). De conformidad con lo previsto en el artículo 17 de la Ley N° 17.283, de 28 de noviembre de 2000, el Ministerio de Ambiente podrá establecer estándares para controlar y disminuir las emisiones tanto de partículas como de gases, provenientes de otras fuentes móviles diferentes de las comprendidas en las disposiciones de este decreto.

CAPÍTULO VIII. Otras disposiciones

Artículo 53.- (Sector residencial). Con el fin de reducir y minimizar las emisiones del sector residencial, tanto provenientes de equipos destinados a la calefacción como a la cocción, la Dirección Nacional de Medio Ambiente elaborará y aplicará planes de sensibilización y concientización de la población.

Artículo 54.- (Gobiernos departamentales). Exhórtese a los gobiernos departamentales a cooperar en la aplicación del presente reglamento, especialmente mediante la adopción de medidas dentro del ámbito de sus competencias, que coadyuven a la reducción de emisiones del sector residencial y del transporte.

Artículo 55.- (Incumplimiento y sanciones). Las infracciones a las disposiciones del presente reglamento, serán sancionadas por el Ministerio de Ambiente, según lo establecido en el artículo 6° de la Ley N° 16.112, de 30 de mayo de 1990, artículo 15 de la Ley N° 17.283, de 28 de noviembre de 2000 y literal C del artículo 294 y artículo 295 de la Ley N° 19.889, de 9 de julio de 2020.

A los efectos de la aplicación de sanciones, se considerarán infracciones graves las que se detallan a continuación:

- a) Realizar una inadecuada gestión de las emisiones al aire, provocando daños graves al ambiente o la salud humana.
- b) Incumplir con el monitoreo de calidad del aire correspondientes, cuando se constate que se estaban produciendo daños graves al ambiente o a la salud humana.

- c) Operar realizando emisiones al aire sin contar con Autorización de Emisión vigente, sin haberla solicitado o sin haber solicitado su renovación, según correspondiere.
- d) No realizar el mantenimiento u operar en forma inadecuada los sistemas de tratamiento o dispersión de las emisiones al aire, afectando o poniendo en riesgo el ambiente, incluyendo la salud humana.
- e) Omitir información ambiental o presentar información o documentación falsa o incorrecta, en la solicitud de autorización, en los procedimientos de homologación de vehículos o en los informes de contralor y seguimiento de la calidad o de emisiones al aire.
- f) Alterar o manipular los sistemas de transmisión de datos en conexión con la Dirección Nacional de Medio Ambiente.
- g) Importar o comercializar vehículos que no cumplan los estándares de emisión de fuentes móviles en contravención de lo que establece este reglamento.
- h) Incumplir las medidas de mitigación de olores desagradables, afectando el área de influencia.
- i) Obstaculizar la labor de contralor de la Dirección Nacional de Medio Ambiente.
- j) Alterar o modificar los dispositivos materiales o electrónicos que aseguran el buen funcionamiento de los vehículos y el cumplimiento de los estándares.

Las demás infracciones a este reglamento serán consideradas leves a los efectos de la sanción del infractor. La reiteración o reincidencia de infracciones consideradas leves se reputará como grave.

Artículo 56.- (Multas). Las multas que corresponda imponer por el Ministerio de Ambiente, como consecuencias de infracciones al presente reglamento, serán aplicadas según los siguientes criterios:

- a) Infracciones consideradas leves y que impliquen únicamente incumplimientos administrativos, entre 10 (diez) y 1.000 (un mil) UR (unidades reajustables).
- b) Infracciones consideradas leves pero cuyas consecuencias van más allá de un mero incumplimiento administrativo, entre 100 (cien) y 5.000 (cinco mil) UR (unidades reajustables).
- c) Por la primera infracción considerada grave, entre 200 (doscientas) y 10.000 (diez mil) UR (unidades reajustables).
- d) Por la segunda y subsiguientes infracciones consideradas graves, entre 500 (quinientas) y 100.000 (cien mil) UR (unidades reajustables).

El monto de la multa será establecido en cada caso en particular, en función de la magnitud de la infracción y el grado de apartamiento de las obligaciones establecidas en el presente reglamento, los antecedentes del infractor y las consecuencias ambientales del incumplimiento.

Artículo 57.- (Otras medidas). Lo dispuesto en los artículos anteriores, es sin perjuicio de la adopción de las medidas complementarias previstas en el artículo 14 de la Ley N° 17.283, de 28 de noviembre de 2000, así como de las facultades conferidas por el artículo 453 de la Ley N° 16.170, de 28 de diciembre de 1990 y artículo 4° de la Ley N° 16.466, de 19 de enero de 1994.

Artículo 58.- Comuníquese, publíquese, etc.