

PLANES DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE

GUIA PARA LA ELABORACIÓN



 <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>	<p>MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO</p>	<p>SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE</p>
 <p>CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS</p>		

2025

PLANES DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE

GUIA PARA LA ELABORACIÓN



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

SECRETARÍA DE ESTADO
DE MEDIO AMBIENTE

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD
Y EVALUACIÓN AMBIENTAL



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

ideae^a

La presente Guía ha sido elaborada para

la Subdirección General de Prevención de la Contaminación, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, por:

Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Xavier Querol

Inés González-de Castro

Cristina Reche

Andrés Alastuey

Instituto de Tecnología Cerámica / Universitat Jaume I

Eliseo Monfort

Irina Celades

Salvador Gomar

Generalitat de Catalunya

Eva Pérez-Gabucio

Generalitat Valenciana

José Vicente Miró

Todos los comentarios y observaciones que quieran hacerse a la misma pueden enviararse a la dirección de correo electrónico: bzn-sgpc@miteco.es

Título: Guía para la elaboración de planes de mejora de la calidad del aire

Edición 2025

Autores/Coordinación: D. Xavier Querol Carceller; D. ^a Inés González de Castro; D. ^a Cristina Reche Andújar; D. Andres Alastuey Uros; D. Eliseo Monfort; D. ^a Irina Celades; D. Salvador Gomar; D. ^a Eva Pérez-Gabucio; D. José Vicente Miró

Fotografía de cubierta: Bahía de A Coruña (X. Querol)

NIPO (en línea): 665-25-009-2

ISBN (en línea): 978-84-18778-61-2

Doi: <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/17211>

AVISO LEGAL: Los comentarios, recomendaciones y opiniones expresadas en esta obra no recoge necesariamente el punto de vista del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.



ABREVIATURAS y ACRÓNIMOS

AAI: autorización ambiental integrada

AECOC: Asociación de Fabricantes y Distribuidores

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología

AGE: Administración General del Estado

AMB: Área Metropolitana de Barcelona

APU: Unidad de Potencia Auxiliar, por sus siglas en inglés

ATM: Sistemas de Gestión del Tránsito Aéreo

BAT-AEL: Niveles de emisión asociados a las MTD, por sus siglas en inglés

BAT-AEPL: Niveles de desempeño medioambiental asociados a las MTD, por sus siglas en inglés

BREF: Documentos de referencia sobre las MTD

CAPCA: Catálogo de Actividades Potencialmente Contaminadoras de la Atmósfera

CE: Comisión de la UE

CESFAC: Confederación Española de Fabricantes de Alimentos Compuestos para Animales

CCAA: Comunidades Autónomas

CLRTAP: Convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia

COM-B: Capacidad, Oportunidad, Motivación- Comportamiento, por sus siglas en inglés

CSIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas

CUE: Consejo de la Unión Europea

DEI: Directiva 2010/75/UE sobre Emisiones Industriales

DOUE: Diario Oficial de la Unión Europea

DUM: Distribución Urbana de Mercancías

EASA: *European Union Aviation Safety Agency*

ECA: Zona de Control de Emisiones

EEA: Agencia Europea del Medio Ambiente, por sus siglas en inglés

EEUU: Estados Unidos

EII: Industrias con Uso Intensivo de Energía, por sus siglas en inglés

EMAS: *Eco-Management and Audit Scheme*

EPA: *USA Environmental Protection Agency*

ER: Energía Renovable

ESP: Precipitadores Electrostáticos

ETS: Emissions Trading System

EVs: Vehículos Eléctricos

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GIC: Grandes Instalaciones de Combustión



GPUs: Unidades de Potencia en Tierra

GSE: Vehículos de Apoyo en Tierra, por sus siglas en inglés

HVAC: Sistema de climatización y ventilación, por sus siglas en inglés *Heating, Ventilation and Air Conditioning*

IASI: *Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*

ICA: Índice de Calidad del Aire

IFIF: Federación Internacional de la Industria de Piensos

IMO: Organización Marítima Internacional

INCITE: Centro de Innovación para la Transformación Industrial y las Emisiones

IPPC: Prevención y Control Integrados de la Contaminación,

JIT: *Just-in-time*

MAPA: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

MARPOL: Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques

MIC: Medianas Instalaciones de Combustión

MITECO: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

MoU: Memorando de Entendimiento

MTD: Mejor Técnica Disponible

NECAS: ECAs con restricciones en NOx

nvPM: PM no volátiles

OACI: Organización de Aviación Civil Internacional

OMS: Organización Mundial de la Salud

PAC: Política Agrícola Común

PACP: Plan de Acción a Corto Plazo

PAMCA: Plan de actuación para la mejora de la calidad del aire

PCA: Planes de Calidad del Aire

PE: Parlamento Europeo

PHVA: Planificar, Hacer, Verificar y Actuar

PM: Material Particulado en suspensión

PMACP: Plan Marco de Acción a Corto Plazo

PMCA: Planes de Mejora de la Calidad del Aire

PNCCA: Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica

PNMCA: Planes Nacionales de Mejora de la Calidad del Aire

PST: Partículas en Suspensión Totales

RCS: Sistemas de Reducción Catalítica Selectiva

RD: Real Decreto

RNCS: Sistemas de Reducción No Catalítica Selectiva

RTO: Oxidación Térmica Regenerativa, por sus siglas en inglés

SAF: Combustible de Aviación Sostenible, por sus siglas en inglés
SCR: *Selective Catalytic Reduction*
SECAs: ECAs con restricciones en SOx
SER: Zonas de Estacionamiento Regulado
SGA: Sistemas de Gestión Ambiental
s.n.m.: sobre el nivel del mar
UE: Unión Europea
UFP: *Ultra Fine Particles*
ULCV: Grandes Buques Portacontenedores
UZBE: Zona de Ultra Bajas Emisiones
VAO: Vehículos de Alta Ocupación
VL: Valores límite
VLE: Valores Límite de Emisión
VO: Valores Objetivo
XVPCA: Red de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica de Cataluña
ZBE: Zonas de Bajas Emisiones
ZEZ: Zonas de Emisiones Cero

COMPUESTOS QUÍMICOS Y ELEMENTOS

As: Arsénico
BaP: Benzo[a]pireno
BC: Carbono negro
 C_6H_6 : Benceno
Cd: Cadmio
 CH_4 : Metano
Cl: Cloro
CO: Monóxido de carbono
 CO_2 : Dióxido de carbono
COT: Carbono orgánico total
COVs: Compuestos orgánicos volátiles
COVNM: Compuestos orgánicos volátiles no metálicos
EC: Carbono elemental
HAPs: Hidrocarburos aromáticos policíclicos
Hg: Mercurio
N: Nitrógeno
 NH_3 : Amoníaco
 NH_4^+ : Amonio

Ni: Níquel

NO₂: Dióxido de nitrógeno

NO₃⁻: Nitrato

NO_x: Óxidos de nitrógeno

O₃: Ozono troposférico

OC: Carbono orgánico

Pb: Plomo

SO₂: Dióxido de azufre

SO_x: Óxidos de azufre

SO₄²⁻: Sulfato



ÍNDICE

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	i
1. INTRODUCCIÓN	1
2. LEGISLACIÓN.....	6
2.1 LEGISLACIÓN PREVIA.....	6
2.2 LEGISLACIÓN VIGENTE.....	9
2.3 NUEVA DIRECTIVA EUROPEA DE CALIDAD DEL AIRE: DIRECTIVA (UE) 2024/2881	10
3. PLAN DE CALIDAD DEL AIRE EN EL RD 102/2011	13
4. PLANES DE CALIDAD DEL AIRE DE LA DIRECTIVA (UE) 2024/2881.....	23
4.1. CAMBIOS RELEVANTES EN LA DIRECTIVA (UE) 2024/2881	23
4.2. LOS PLANES DE MEJORA DE CALIDAD DEL AIRE Y HOJAS DE RUTA DE CALIDAD DEL AIRE EN LA DIRECTIVA (UE) 2024/2881.....	27
5. PRÓRROGAS – APLAZAMIENTOS EN LA DIRECTIVA (UE) 2024/2881	32
6. RECOMENDACIONES ADICIONALES SOBRE PLANES DE CALIDAD DEL AIRE.....	35
7. SANCIONAMIENTO Y DEMANDAS.....	37
7.1 RD 102/2011	37
7.2 DIRECTIVA (UE) 2024/2881 (CAPÍTULO VII)	40
8. CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO Y APLICACIÓN DE MEDIDAS CORRECTIVAS	41
8.1. FACTORES A TENER EN CUENTA EN EL DISEÑO Y APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS	42
8.2. SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL	45
8.3. TIPOS DE MEDIDAS.....	47
9. MEDIDAS CORRECTIVAS	49
9.1 TRÁFICO RODADO URBANO Y METROPOLITANO	49
9.1.1 <i>Contaminantes relevantes emitidos por el tráfico rodado</i>	49
9.1.2 <i>Medidas eficientes sobre el tráfico rodado</i>	50
9.1.2.1. Medidas para la mejora del transporte público	51
9.1.2.2. Medidas para reducir el número de los vehículos urbanos en circulación	51
9.1.2.3. Medidas para acelerar el cambio de las flotas de vehículos circulantes: ZBE y transición eléctrica	54
9.1.2.4 Medidas para mejorar la distribución urbana de mercancías (DUM)	62
9.1.2.5 Medidas sobre rediseño urbano enfocado en la movilidad y otros sectores.....	63
9.1.3 <i>Otras medidas eficientes sobre el tráfico y la movilidad</i>	71
9.2 SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN.....	74
9.2.1 <i>Contaminantes relevantes emitidos por el sector de la construcción</i>	74
9.2.2 <i>Medidas eficientes</i>	76
9.2.2.1 Medidas para la reducción de emisiones de PM dentro de la obra	76
Reducir emisiones de actividades de la obra	76
Medidas para el almacenamiento/apilamiento de material.....	77
Otras medidas adicionales en obra	78
9.2.2.2 Medidas para el transporte de material	79
9.3 INDUSTRIA Y GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	85
9.3.1 <i>Contaminantes relevantes emitidos por la industria y la generación eléctrica</i>	85
9.3.2 <i>Marco legislativo en la UE para actividades industriales: proceso de Sevilla</i>	87
9.3.2.1 Marco legislativo básico para actividades industriales	87
9.3.2.2 Directiva de emisiones industriales (DEI 2.0)	88
9.3.3 <i>Medidas eficientes para desarrollar planes de calidad de aire</i>	90
9.3.3.1 Medidas centradas en la gestión del territorio	90
9.3.3.2 Medidas centradas en las instalaciones Industriales	91

9.3.3.3 Aplicaciones de Planes Específicos para áreas industriales con problemas de calidad de aire.....	93
9.3.4 Mejores Técnicas Disponibles para los principales contaminantes industriales	93
9.3.4.1 Medidas primarias	94
9.3.4.2 Medidas secundarias.....	94
9.3.5 Recomendaciones y acciones de mejora para emisiones industriales	103
9.4 AGRICULTURA Y GANADERÍA	109
9.4.1 Contaminantes relevantes emitidos por la agricultura y ganadería	109
9.4.2. Medidas eficientes para NH₃.....	110
9.4.2.1 Medidas sobre la formulación de dietas	114
9.4.2.2 Medidas sobre el diseño de los alojamientos de los animales.....	115
9.4.2.3 Medidas sobre la manipulación y almacenaje de los residuos.....	116
9.4.2.4 Medidas sobre la recuperación de nutrientes	117
9.4.2.5 Medidas sobre la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos.....	117
9.4.2.6 Medidas sobre el uso de la tierra	118
9.4.3. Medidas eficientes para la reducción de las emisiones de PM primario.....	120
9.5 QUEMA DE BIOMASA.....	123
9.5.1 Contaminantes relevantes emitidos por la quema de biomasa	123
9.5.2 Factores que controlan las emisiones de la quema de biomasa	125
9.5.2.1 Quema de biomasa doméstica.....	125
9.5.2.2 Quema de biomasa agrícola y ganadera	130
9.5.2.3 Quema de biomasa industrial	131
9.5.3 Medidas eficientes	134
9.5.3.1 Medidas para la quema de biomasa doméstica.....	134
9.5.3.2 Medidas para la quema de biomasa agrícola	135
9.5.3.3 Medidas para la quema de biomasa y otros combustibles en granjas.....	135
9.5.3.4 Medidas para la quema de biomasa y otros combustibles en industria	136
9.6 ZONAS PORTUARIAS Y AEROPUERTOS	138
9.6.1 Contaminantes relevantes emitidos por puertos y aeropuertos	138
9.6.2 Medidas eficientes	143
9.6.2.1 Medidas eficientes en aeropuertos.....	145
9.6.2.2 Medidas eficientes en puertos	148
10. CONSIDERACIONES FINALES	153
11. REFERENCIAS	156



1. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como objeto analizar la Directiva 2024/CE/2881, de 23 de octubre de 2024, sobre la calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia en Europa, en lo referente a los planes de mejora de la calidad del aire (PMCA) y proponer medidas correctivas concretas para abordar la contaminación procedente de diferentes fuentes. La finalidad es proporcionar una visión integral de la situación actual, los avances logrados y los desafíos que aún persisten para mejorar la calidad del aire.

Gracias a las políticas ambientales implementadas en las últimas décadas a nivel europeo, nacional, regional y local, hemos visto mejoras muy importantes en la calidad del aire. Para varios de los contaminantes clave se han alcanzado reducciones de niveles en aire ambiente que en muchos casos superan el 50%. Sin embargo, la mejora de la calidad del aire debe ser un proceso continuo para tratar de reducir el impacto sobre la población al máximo. Así, la Organización Mundial de la Salud (OMS) revisó los valores guía de calidad del aire en septiembre de 2021 (OMS, 2021) fijando objetivos mucho más estrictos. La nueva directiva representa un paso crucial para el acercamiento de los valores límite y objetivo normativos a los valores guía de la OMS.

Es esencial clarificar que este informe se centra en la inmisión, es decir, la calidad del aire que respiramos. Según la OMS, el aire limpio es un derecho humano básico que se ve vulnerado constantemente por culpa de la contaminación atmosférica, la cual supone una grave amenaza para la **salud**, ya que aumenta significativamente las enfermedades no transmisibles como los infartos de miocardio, los accidentes cerebrovasculares, el asma y la bronquitis, entre otras (OMS, 2021). También es un problema **medioambiental**, ya que los contaminantes pueden dañar los ecosistemas y la biodiversidad (EEA, 2022). Por ejemplo, el transporte atmosférico de contaminantes a través de largas distancias, dependiendo de su composición química, puede provocar incrementos de acidez de lagos y ríos, cambios en el balance nutricional de las aguas costeras y de las grandes cuencas fluviales, reducción de los nutrientes del suelo, daño en los bosques sensibles y cultivos agrícolas, lluvia ácida, entre otros (EEA, 2022). Además, la contaminación también es un problema para el **patrimonio** cultural ya que, por ejemplo, el depósito atmosférico de material particulado en suspensión (PM) sobre materiales de construcción y ornamento reduce su durabilidad (UNECE, 2020).

La OMS define la “contaminación atmosférica” como una mezcla compleja de partículas sólidas, gotas líquidas y gases que pueden proceder de muchas fuentes (domésticas, industriales, tráfico, puertos, aeropuertos, entre otras) que a su vez pueden dar lugar a diferentes mezclas de contaminantes y generar otros secundarios (OMS, 2021). A su vez, el Real Decreto (RD) 102/2011 define “Contaminante” como cualquier sustancia presente en el aire ambiente que pueda tener efectos nocivos sobre la salud humana, el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza.

Los **contaminantes atmosféricos** regulados (con valores límite u objetivo o umbrales) por la legislación europea incluyen PM inferior a 2.5 y 10 µm (PM2.5 y PM10, respectivamente), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), benceno (C₆H₆), metales (As, Cd, Hg, Ni, Pb) y benzo[a]pireno (BaP).



- **PM10 y PM2.5:** Los principales componentes de la materia particulada son sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+), cloro (Cl), carbono elemental (EC), carbono orgánico (OC), elementos mayores (como Na, Al, Ca, Si, Fe, Ti, Mg, Mn, en su gran parte asociados a PM mineral y/o de sal marina), elementos traza y agua de formación, cristalización y humedad (Seinfeld y Pandis, 2016). Las partículas PM2.5, por su tamaño inferior, pueden llegar a los pulmones, y algunas hasta pueden translocarse, y alcanzar el torrente sanguíneo. Sin embargo, en las PM10 también son relevantes alérgenos y metales en la fracción gruesa (Peters et al., 2021). Es importante resaltar que Amato et al. (2016) demuestran que alrededor del 70-80% del PM2.5 en fondo urbano procede de PM secundario inorgánico (sulfato, nitrato, amonio) y orgánico (componentes orgánicos del PM generado por la oxidación atmosférica de compuestos orgánicos volátiles, COVs). Por tanto, es importante tener en cuenta que para reducir estos componentes mayoritarios se han de reducir las emisiones de sus precursores gaseosos (SO_2 , NO_x ($\text{NO}+\text{NO}_2$), amoníaco (NH_3) y COVs), así como de oxidantes como O_3 . Amato et al. (2016) también muestran que alrededor del 30-35% del PM10 en fondo urbano se debe a contribuciones del tráfico rodado (con un 50% de esta contribución viniendo de las emisiones de motores, y el otro 50% de desgaste de frenos, ruedas, firme de rodadura y resuspensión de polvo del tráfico), el 10-20% de emisiones industriales, 5-10% de construcción/demolición, el 3-20% de polvo africano, y 5-10% de sal marina. Además, en ciudades portuarias el puerto puede contribuir al 5-10% en la media de PM10, y en determinadas zonas la quema de biomasa doméstica hasta el 20-30%. PM10 y PM2.5 presentan valores límite (de obligado cumplimiento y con sanciones asociadas si estos se superan y no se toman las medidas oportunas en los plazos previstos) en la legislación vigente.
- **NO₂:** Es un gas que se emite durante procesos de combustión, especialmente el tráfico rodado, la industria, la generación eléctrica, fuentes domésticas, y transporte marítimo y aéreo. Según EEA (2023a), en 2021 el transporte rodado contribuyó con el 41% de las emisiones de NO_x para EU-27, seguido del 17% de la generación eléctrica, del 13% de las emisiones domésticas y otro 13% de la industria (Figura 1.1). Estos porcentajes se refieren a las emisiones. Si nos referimos a la exposición, al estar el tráfico rodado mucho más próximo a los ciudadanos, su contribución a la exposición urbana a NO₂ puede ser del 50-70%. Este contaminante tiene valor límite en la legislación vigente.
- **CO:** Es un gas que se emite por la combustión incompleta de combustibles como madera, derivados petróleo, carbón, gas natural y queroseno. Este contaminante tiene valor límite en la legislación vigente.
- **SO₂:** Es un gas que se emite durante la quema de combustibles fósiles y la fundición de menas que contengan azufre. Este contaminante tiene valores límite en la legislación vigente.
- **C₆H₆:** Es un gas que se emite de diversas fuentes, tanto naturales como antropogénicas. Si bien el aire ambiente contiene niveles bajos de C₆H₆, éste proviene principalmente los vapores de la gasolina, las emisiones gaseosas de vehículos motorizados, las emisiones industriales, la quema de biomasa, del humo secundario del tabaco, de adhesivos, productos de limpieza y disolventes, entre otras fuentes. Este contaminante tiene valor límite en la legislación vigente.

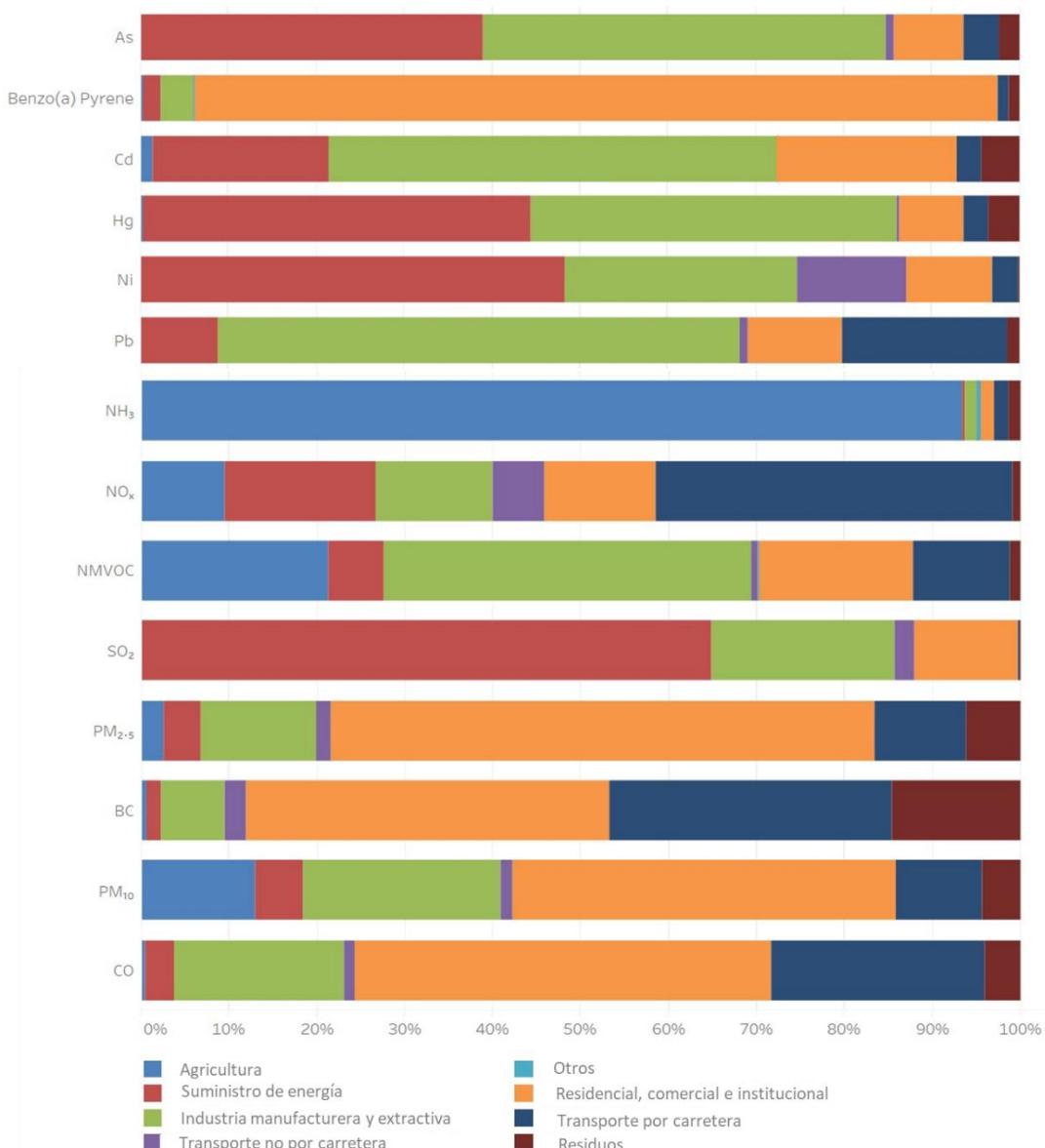


Figura 1.1. Proporciones relativas de contribuciones al inventario europeo (EU-27) por contaminante y sectores para 2021. EEA (2023a).

- **O₃:** El O₃ es un gas, y uno de los principales componentes del smog fotoquímico. Es un contaminante secundario que se genera como resultado de la reacción fotoquímica de NO_x y COVs en presencia de luz solar. El O₃ troposférico afecta negativamente no solo a la salud humana, sino también a la vegetación y los ecosistemas, lo que da lugar a una disminución del rendimiento de los cultivos y del crecimiento de los bosques, así como a la pérdida de biodiversidad (ICP Vegetation, 2017). Este contaminante tiene valores objetivo (que se requiere no superar, pero con superaciones no sancionables si se justifica la imposibilidad del cumplimiento) en la legislación vigente.
- **BaP:** Este compuesto químico pertenece al grupo de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), se origina en combustiones incompletas, por lo que procede de las emisiones de la quema de carbón, biomasa, motores de vehículos, el tabaco, alimentos quemados o asados a la parrilla, y otras fuentes. Este contaminante tiene valor objetivo en la legislación vigente.

- **Pb:** El Pb es un metal con efectos acumulativos que, si bien está presente de forma natural en la corteza terrestre, su uso generalizado ha dado lugar a una importante contaminación ambiental, causando graves problemas de salud pública en muchas partes del mundo. Las principales fuentes de contaminación son las explotaciones mineras, la metalurgia, las actividades de fabricación y reciclaje, entre otros. Aunque la mayor parte de su consumo corresponde a la fabricación de baterías de plomo-ácido para vehículos de motor, también se utiliza en muchos otros productos, como pigmentos, pinturas, soldaduras, vidrieras, vajillas de cristal, municiones, esmaltes cerámicos, entre otros. Cabe destacar que, en la actualidad, gran parte del Pb comercializado mundialmente procede del reciclaje. Este contaminante tiene valor límite en la legislación vigente.
- **As, Ni, Cd, Hg:** Son metales/semimetales tóxicos de efecto bioacumulativo. Su origen es principalmente minero e industrial. El Ni puede proceder también de la quema de aceites pesados o coque de petróleo. Tienen graves efectos para la salud humana. Estos contaminantes tienen valores objetivo en la legislación vigente.

Las modelizaciones de la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) estiman (EEA, 2023b) el impacto de la mortalidad prematura anual en la UE-27 atribuible a superar los niveles guía de la OMS (2021) para PM2.5 en 238.000 muertes en 2021; así mismo, se atribuyen 49.000 al NO₂, y 24.000 al O₃ troposférico.

Hay que resaltar que las políticas ambientales aplicadas (a escalas europea, nacional, regional y local) han tenido un gran impacto en la mejora de la calidad del aire, dado que en 1990 la mortalidad prematura asociada a la exposición a PM2.5 en Europa alcanzaba 1.000.000 de muertes (EEA, 2018, Figura 1.2). Por tanto, entre 1990 y 2021 se ha reducido la mortalidad prematura asociada a la exposición a PM2.5 en el 75%, debido a una reducción marcada de las emisiones de contaminantes que ha tenido lugar con un claro incremento del PIB. A pesar de esta gran reducción del impacto de la calidad del aire en la salud humana en Europa, los niveles de contaminantes en aire ambiente alcanzan aún valores que distan mucho, en algunos casos, de los valores guía de la OMS (2021). Además, la continuación de la reducción de los niveles de contaminación requiere de aproximaciones mucho más complejas que las que se han seguido hasta ahora, dado que algunos contaminantes clave son secundarios (O₃) o presentan una gran proporción de componentes secundarios (PM10 y PM2.5). En estos casos se complica mucho la reducción de los niveles de contaminación, porque esta no depende solo de las emisiones de los gases precursores, sino de las proporciones de dichas reducciones y de factores meteorológicos y topográficos.

La Directiva 2024/2881/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2024, sobre la calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia en Europa, reduce considerablemente los valores límite y objetivo de muchos de los contaminantes citados anteriormente (por un factor de 2 para NO₂ y PM10 y de 2.5 para PM2.5, por ejemplo), y obliga a su cumplimiento en 2030. Es por ello por lo que España (que en algunos pocos casos aún registra incumplimientos de los valores límite y objetivo de las directivas 2008/50/CE y 2004/107/CE, transpuestas por el Real Decreto 102/2011) ha de realizar grandes esfuerzos para alcanzar el cumplimiento de la nueva directiva en 2030. Además, hay que resaltar también que el régimen sancionador de la nueva directiva es mucho más estricto y definido que el incluido en la 2008/50/CE.

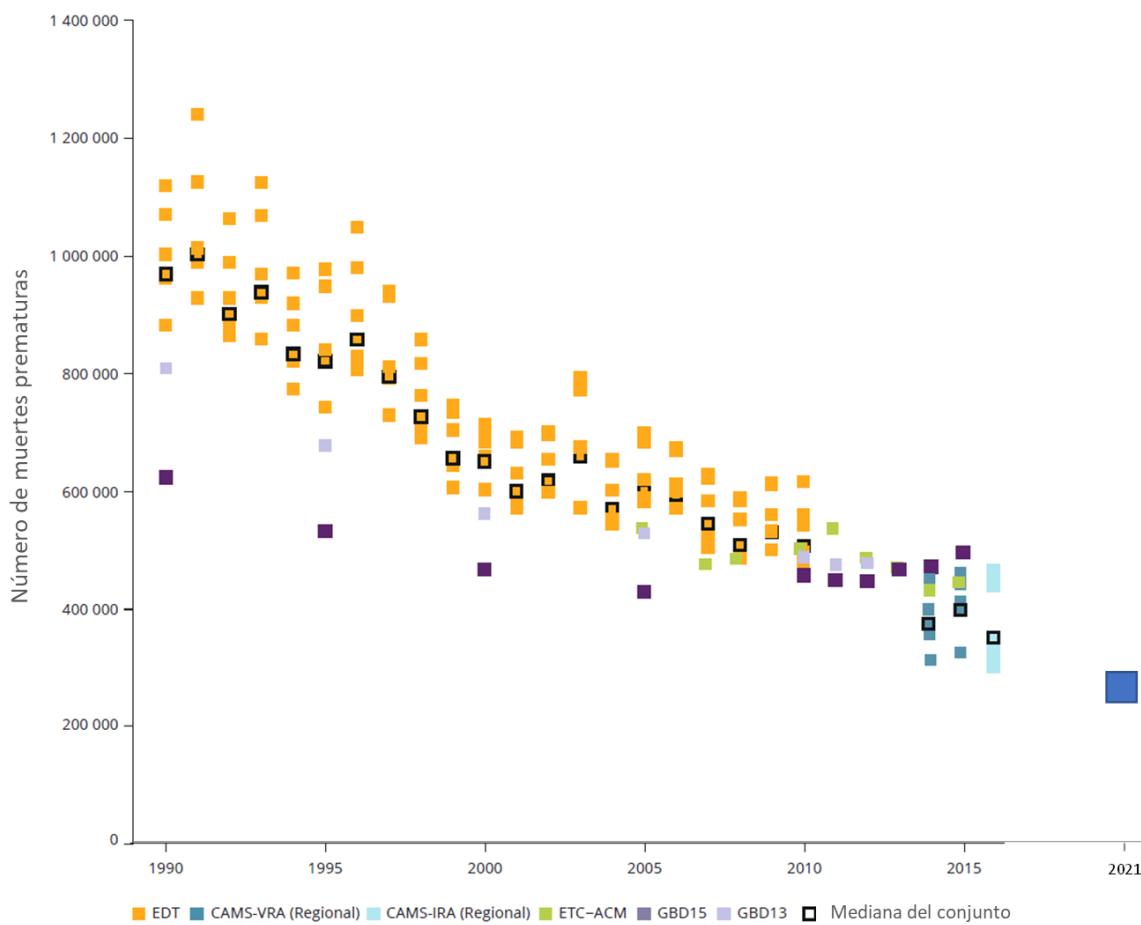


Figura 1.2. Tendencias interanuales 1990-2021 de la mortalidad prematura atribuible a la exposición a PM2.5 en Europa (modificado de EEA, 2018).

En este contexto, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) ha considerado oportuno encargar al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) la elaboración de la presente guía para la elaboración de planes de calidad del aire.

En los siguientes apartados se resume la evolución y estado actual de la legislación en materia de calidad del aire, se describen los cambios que supone la nueva directiva de calidad del aire en cuanto a objetivos y a la aplicación y definición de los planes de calidad del aire, incluyendo la nueva y los regímenes sancionadores. Finalmente, se revisan las actuaciones que han sido más aplicadas en planes de mejora de calidad del aire en Europa, centrándose en tráfico rodado urbano/metropolitano, obras-construcción-demolición, quema de biomasa doméstica y comercial, industria, agricultura y ganadería, y zonas portuarias y aeropuertos.

2. LEGISLACIÓN

2.1 Legislación previa

Dado que el interés por la calidad del aire es un tema de importancia desde hace años, se han ido desarrollando y modificando diferentes leyes y directivas en materia de calidad del aire.

En primer lugar, hay que destacar que, si bien ya la Constitución Española en su artículo 45 defiende el derecho de todos los españoles a “disfrutar de un medio ambiente adecuado para el desarrollo de la persona, así como el deber de conservarlo, de tal forma que los poderes públicos velarán por la utilización racional de todos los recursos naturales, con el fin de proteger y mejorar la calidad de la vida y defender y restaurar el medio ambiente, apoyándose en la indispensable solidaridad colectiva, y además se establecerán sanciones penales o, en su caso, administrativas, así como la obligación de reparar el daño causado”, fue la **Ley 38/1972** sobre Protección del Ambiente Atmosférico “que tiene por objeto prevenir, vigilar y corregir las situaciones de contaminación atmosférica, cualesquiera que sean las causas que la produzcan”, desarrollada en el **Decreto 833/1975** (cuyo Anexo III relaciona los principales contaminantes (Tabla 2.1), la que sirvió de base para incorporar, tras la integración de España en la UE, la **Directiva MARCO 96/62/CE** de Evaluación y Gestión de la Calidad del Aire y sus Directivas de Desarrollo (Figura 2.1), transponiéndose en los **RD 1073/2002** (sobre Evaluación y Gestión de la Calidad del Aire Ambiente en Relación con el Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno, Óxidos de Nitrógeno, Partículas, Plomo, Benceno y Monóxido de Carbono), **RD 1796/2003** (relativo al Ozono en el Aire Ambiente) y **RD 812/2007** (sobre Evaluación y Gestión de la Calidad del Aire Ambiente en Relación con el Arsénico, el Cadmio, el Mercurio, el Níquel y los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos).

De esta forma, el RD 1073/2022 transpuso las Directivas de Desarrollo primera y segunda (**Directiva 1999/30/CE**, relativa a los Valores Límite de Dióxido de Azufre, Dióxido de Nitrógeno y Óxidos de Nitrógeno, Partículas y Plomo en el Aire Ambiente, y **Directiva 2000/69/CE** sobre sobre los Valores Límite para el Benceno y el Monóxido de Carbono en el Aire Ambiente, respectivamente). El RD 1796/2003 transpuso las Directivas de Desarrollo segunda y tercera (**Directiva 2002/3/CE** relativa al Ozono en el Aire Ambiente). El RD 812/2007 transpuso la cuarta Directiva de Desarrollo, **Directiva 2004/107/CE** (relativa al Arsénico, el Cadmio, el Mercurio, el Níquel y los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en el Aire Ambiente). Para complementar estas directivas, desde la UE se promulgaron algunas decisiones, como la Decisión 97/10/CE por la que se establece un intercambio recíproco de información y datos de las redes y estaciones aisladas de medición de la contaminación atmosférica en los Estados Miembros, modificados sus anexos posteriormente por la Decisión 2001/752/CE. La Decisión 2004/224/CE establece las medidas para la presentación de información sobre los planes o programas previstos en la Directiva 96/62/CE del Consejo en relación con los valores límite de determinados contaminantes del aire ambiente, y la Decisión 2004/461/CE propuso el cuestionario que debe utilizarse para presentar información anual sobre la evaluación de la calidad del aire ambiente de conformidad con las Directivas 96/62/CE y 1999/30/CE del Consejo y con las Directivas 2000/69/CE y 2002/3/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

Tabla 2.1. Comparación entre el listado de contaminantes del ANEXO III del Decreto 833/1975 y el ANEXO I de la Directiva MARCO.

ANEXO III- D833/1975 - RELACIÓN DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES DE LA ATMÓSFERA			ANEXO I – DIRECTIVA MARCO - LISTA DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS QUE DEBEN TENERSE EN CUENTA EN LA EVALUACIÓN Y GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE
<i>Contaminantes principales</i>	Bromo.	Compuestos orgánicos del plomo.	I. Contaminantes que deberán ser examinados en la fase inicial, incluidos los contaminantes regulados por Directivas existentes en el ámbito de la calidad del aire ambiente
Anhídrido sulfuroso.	Yodo.		1. Dióxido de azufre
Monóxido de carbono.	Ácido fluorhídrico.	PIridina y metilpiridinas (picolinas).	2. Dióxido de nitrógeno
Óxidos de nitrógeno.	Ácido clorhídrico.		3. Partículas finas, como los hollines (incluido PM 10)
Hidrocarburos.	Ácido bromhídrico.	Partículas sólidas:	4. Partículas en suspensión
Polvos (partículas sedimentables y partículas en suspensión).	Ácido yodhídrico.	Partículas no metálicas conteniendo fósforo, arsénico, antimonio, silicio, selenio, cloro y sus compuestos.	5. Plomo
Humos.	Ácido fluosilícico.		6. Ozono
	Fluoruros.	Partículas de metales pesados conteniendo cinc, cadmio, plomo, cobre, mercurio, aluminio, hierro, manganeso, cromo, molibdeno, wolframio, titanio, vanadio y sus compuestos.	II. Otros contaminantes atmosféricos
<i>Contaminantes especiales</i>	Oxicloruro de carbono o fosgeno.		7. Benceno
<i>Derivados del azufre:</i>			8. Monóxido de carbono
Anhídrido sulfúrico	Otros compuestos inorgánicos:		9. Hidrocarburos policíclicos aromáticos
Nieblas de ácido sulfúrico.	Arsénico y sus derivados.		10. Cadmio
Ácido sulfhídrico.	Compuestos orgánicos:		11. Arsénico
Sulfuro de carbono.	Acetileno.	Partículas de metales ligeros conteniendo sodio, potasio, calcio, magnesio, berilio y sus compuestos.	12. Níquel
Cloruros de azufre.	Aldehído.		13. Mercurio
<i>Derivados del nitrógeno:</i>	Aminas.	Partículas de sustancias minerales (asbestos).	
Amoniacos y sus derivados.	Anhídrido y ácido maleico.	Aerosoles:	
Ácido nítrico.	Anhídrido y ácido acético.	Aerosoles procedentes de las plantas de benceno.	
Cianógeno.	Ácido fumárico.	Aerosoles procedentes de las plantas de alquitrán.	
Ácido cianhídrico.	Anhídrido y ácido ftálico.	Varios:	
Cianuros.	Compuestos orgánicos volátiles del azufre (mercaptanos y otros).	Olores molestos.	
<i>Halógenos y sus derivados</i>	Compuestos orgánicos del cloro.	Partículas radiactivas.	
Flúor.			
Cloro.			

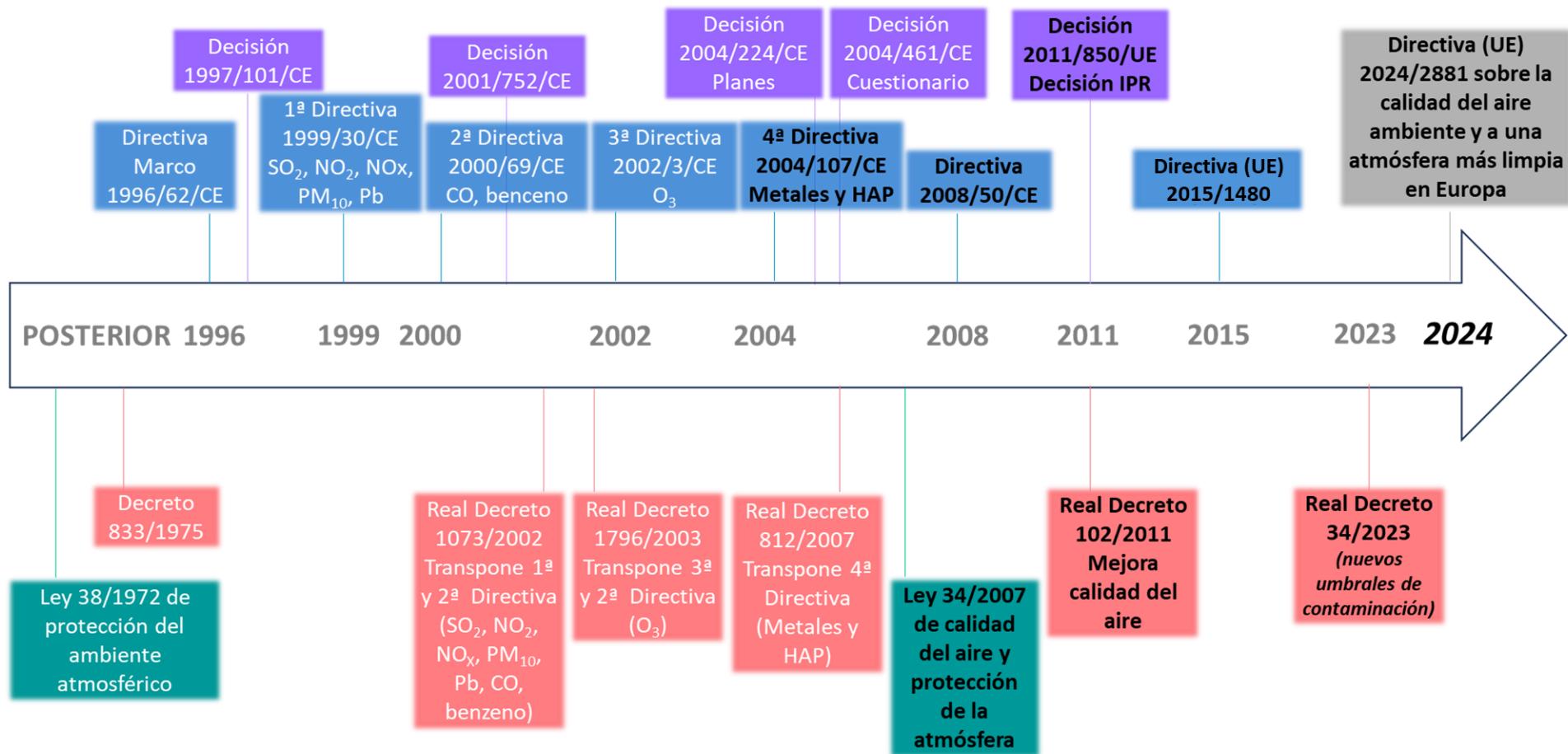


Figura 2.1. Esquema de la evolución de la legislación ambiental relativa a la calidad del aire en España tras su entrada en la UE. En letra blanca la legislación que no está en vigor, en negrita la legislación en vigor a 2024. Figura basada en el cronograma publicado en MITECO (2024a).

2.2 Legislación vigente

La aprobación de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera, que aporta la nueva base legal para los desarrollos relacionados con la evaluación y la gestión de la calidad del aire en España, sustituye la Ley 38/1972 y también parte del Decreto 833/1975. En el artículo 31 de la Ley 34/2007 se establece el régimen de sanciones previstas y en su ANEXO IV establece el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera.

La aprobación de la **Directiva 2008/50/CE** (relativa a la Calidad del Aire Ambiente y a una Atmósfera más Limpia en Europa), modificó el anterior marco regulatorio comunitario, derogando la Directiva Marco (**1996/62/CE**) y las tres primeras Directivas de Desarrollo (**1999/30/CE, 2000/69/CE y 2002/3/CE**). La Directiva 2008/50/CE, aparte de mantener la regulación de los contaminantes de la directiva marco y las directivas hijas, introdujo regulaciones para nuevos contaminantes como el PM2.5 y nuevos requisitos para la evaluación y gestión de la calidad del aire teniendo en cuenta la normas, directrices y los programas correspondientes a la OMS y estableció objetivos de calidad de los datos para la evaluación de la calidad del aire. Esta directiva, junto con la **2004/107/CE**, se incorporó al ordenamiento jurídico estatal mediante la aprobación del **Real Decreto 102/2011** (desarrollado en el punto 3).

Más recientemente, la **Directiva (UE) 2015/1480** modifica varios anexos de las Directivas **2004/107/CE y 2008/50/CE** en los que se establecen las normas relativas a los métodos de referencia, la validación de datos y la ubicación de los puntos de muestreo para la evaluación de la calidad del aire ambiente.

Por otro lado, en 2011 se aprobó la **Decisión 2011/850/UE**, relativa al intercambio recíproco de información y la notificación sobre la calidad del aire ambiente a la Comisión Europea (CE), que sigue en vigor.

Además, en 2023 se aprobó el **RD 34/2023** por el que se modifica el RD 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire, estableciendo nuevos umbrales de información y de alerta de contaminación.

La nueva **Directiva (UE) 2024/2881** se publicó en el DOUE (Diario Oficial de la Unión Europea) el 20 de noviembre de 2024, y entró en vigor 20 días después de la publicación. En relación a la derogación de las anteriores directivas se establece lo siguiente en la Directiva (UE) 2024/2881 (**artículo 31**):

- “Quedan derogadas con efectos a partir del 12 de diciembre de 2026 las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE, en su versión modificada por los actos citados en el anexo XI, parte A, de la presente Directiva, sin perjuicio de las obligaciones de los Estados Miembros relativas a los plazos de transposición al Derecho interno de las Directivas que se indican en el anexo XI, parte B, de la presente Directiva.”
- “Las referencias a las Directivas derogadas se entenderán hechas a la presente Directiva con arreglo a la tabla de correspondencias que figura en el anexo XII de la presente Directiva.”

Así pues, las Directivas 2008/50/CE y 2004/107/CE, y el RD 102/2011 con su modificación posterior RD 34/2023 siguen en vigor hasta el 11 de diciembre de 2026.

2.3 Nueva Directiva Europea de Calidad del Aire: Directiva (UE) 2024/2881

Con fecha de 26 de octubre de 2022, la Dirección General de Medio Ambiente de la CE hizo pública la Propuesta para la revisión de las Directivas de Calidad del Aire Ambiente y sus Anexos (CE, 2022a). Posteriormente, y tras su exposición pública y discusión en el CUE (Consejo de la Unión Europea), el 9 de noviembre de 2023, se elaboró la Orientación General para su discusión con el PE (Parlamento Europeo) (CUE, 2023a). El 8 de marzo de 2024 se publicó una propuesta consensuada por el CUE y el PE (CUE, 2024), para ser aprobada independientemente por ambos estamentos previamente a su publicación. El PE publicó sus enmiendas a la propuesta de la Directiva 16 de abril de 2024 (PE, 2024a) que fueron aprobadas inicialmente por el PE el 24 de abril de 2024 (PE, 2024b). Finalmente, la nueva Directiva de Calidad del Aire Ambiente y una Atmósfera más Limpia en Europa (2024/2881) se publicó en el DOUE el 20 de noviembre de 2024. Esta Directiva establece valores límite y objetivo más estrictos y más en línea con las Guías de la OMS (2021), además de consolidar y simplificar la legislación. La Tabla 2.2 muestra una comparación entre los valores límite y objetivo de la legislación actual, de la nueva Directiva y de los valores guía de la (OMS 2005 y 2021). De hecho, un cambio muy significativo es la reducción del valor límite anual de PM_{2.5} a más de la mitad, y del de NO₂ a la mitad. Para otros contaminantes se mantiene los valores límite u objetivo, pero se reducen los días de superación permitidos en un año.

Tabla 2.2. Comparación entre los valores límite y objetivo de la legislación actual, de la nueva Directiva y de los valores guía de la (OMS 2005 y 2021).

Periodo	Contam.	Unidades	RD102/2011	OMS (2005)	OMS (2021)	Directiva (UE) 2024/2881	
			Valores límite	Val. guía	Val. guía	Valores límite	
Horario	SO ₂	µg/m ³	350 (24h/a)	500	--	350 (3h/a)	2030
Diario	SO ₂	µg/m ³	125 (3d/a)	20	40	50 (18d/a)	2030
Anual	SO ₂	µg/m ³	20 no supera	--	--	20 no supera	2030
Horario	NO ₂	µg/m ³	200 (18h/a)	200	--	200 (3h/a)	2030
Diario	NO ₂	µg/m ³	-- --	--	25	50 (18d/a)	2030
Anual	NO ₂	µg/m ³	40 no supera	40	10	20 no supera	2030
Anual	C ₆ H ₆	µg/m ³	5 no supera	5	--	3.4 no supera	2030
MD8h	CO	mg/m ³	10 no supera	10	--	10 no supera	2030
Diario	CO	mg/m ³	-- --	--	4	4 (18d/a)	2030
Diario	PM10	µg/m ³	50 (35d/a)	50	45	45 (18d/a)	2030
Anual	PM10	µg/m ³	40 no supera	20	15	20 no supera	2030
Diario	PM2.5	µg/m ³	-- --	--	15	25 (18d/a)	2030
Anual	PM2.5	µg/m ³	25 no supera	10	5	10 no supera	2030
Anual	Pb	ng/m ³	500 no supera	500	500	500 no supera	2030
			Valores objetivo	Val. guía	Val. guía	Valores objetivo	
MD8h 3-enal	O ₃	µg/m ³	120 (25d/a)	100	100	120 (18d/a)	2030
MD8h anual	O ₃	µg/m ³	120 no supera	100	100	100 no supera	2050
AOT40 5-	O ₃	µg/m ³ xh	18000 no supera	--	--	18000 no supera	2030
AOT40 anual	O ₃	µg/m ³ xh	18000 no supera	--	--	6000 no supera	2050
MD8h 6mes	O ₃	µg/m ³	-- --	--	60	-- --	2030
			Valores objetivo	Val. guía	Val. guía	Valores límite	
Anual	As	ng/m ³	6 no supera	6	6	6.0 no supera	2030
Anual	Cd	ng/m ³	5 no supera	5	5	5.0 no supera	2030
Anual	Ni	ng/m ³	20 no supera	20	20	20 no supera	2030
Anual	BaP	ng/m ³	1 no supera	0.12	0.12	1.0 no supera	2030

Así, la Directiva (UE) 2024/2881/CE sitúa a la UE en el camino para lograr una **contaminación atmosférica cero para 2050**, refiriéndose a un escenario en el que la contaminación del aire se reduce a **niveles que ya no se consideran perjudiciales para la salud y los ecosistemas naturales**; lo que implica hacer revisiones periódicas de las normas de calidad del aire basadas en las últimas evaluaciones científicas disponibles. Por otro lado, la directiva ofrece mejoras en el marco legal, al ser más clara sobre el acceso a la justicia, reparación de daños, sanciones y acceso público a la información sobre calidad del aire. El nuevo marco también pretende brindar más apoyo a las autoridades competentes al fortalecer y concretar sobre el monitoreo, la modelización y los planes de calidad del aire. Las correspondencias entre los artículos y anexos de la nueva propuesta de directiva y las anteriores se indican en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Correspondencias entre los artículos y anexos de la nueva Directiva (2024/2881/CE) y las anteriores (2008/50/CE y 2004/107/CE). Extraído del Anexo IX de la propuesta para la nueva Directiva (CUE, 2024a).

Directiva (UE) 2024/2881	Directiva 2008/50/CE	Directiva 2004/107/CE
Artículo 1	—	—
Artículo 2	Artículo 1	Artículo 1
Artículo 3	Artículo 32	Artículo 8
Artículo 4	Artículo 2	Artículo 2
Artículo 5	Artículo 3	—
Artículo 6	Artículo 4	Artículo 4, apartado 1
Artículo 7	Artículo 5 y artículo 9, apartado 2	Artículo 4, apartados 2, 3 y 6
Artículo 8	Artículo 6 y artículo 9, apartado 1	Artículo 4, apartados 1 a 5 y apartado 10
Artículo 9	Artículos 7 y 10	Artículo 4, apartados 7, 8 y 11
Artículo 10	—	Artículo 4, apartado 9
Artículo 11	Artículos 8 y 11	Artículo 4, apartados 12 y 13
Artículo 12	Artículo 12, artículo 17, apartados 1 y 3, y artículo	Artículo 3, apartado 2
Artículo 13	Artículos 13 y 15, artículo 16, apartado 2, y artículo	Artículo 3, apartados 1 y 3
Artículo 14	Artículo 14	—
Artículo 15	Artículo 19, párrafo primero	—
Artículo 16	Artículo 20	—
Artículo 17	Artículo 21	—
Artículo 18	Artículo 22	Artículo 3, apartado 3 y artículo 5,
Artículo 19	Artículo 17, apartado 2 y artículo 23	—
Artículo 20	Artículo 24	—
Artículo 21	Artículo 25	—
Artículo 22	Artículo 26	Artículo 7
Artículo 23	Artículo 19, párrafo segundo y artículo 27	Artículo 5, apartados 1 y 4
Artículo 24	Artículo 28	Artículo 4, apartado 15
Artículo 25	—	—
Artículo 26	Artículo 29	Artículo 6
Artículo 27	—	—
Artículo 28	—	—
Artículo 29	Artículo 30	Artículo 9
Artículo 30	Artículo 33	Artículo 10
Artículo 31	Artículo 31	—
Artículo 32	Artículo 33	Artículo 11
Artículo 33	Artículo 34	Artículo 12
Anexo I	Anexos VII, XI, XII, XIII and XIV	Anexo I
Anexo II	Anexo II, sección B	Anexo II, sección I
Anexo III	Anexos V and IX	Anexo III, Sección IV
Anexo IV	Anexos III and VIII	Anexo III, Secciones I a III
Anexo V	Anexo I	Anexo IV
Anexo VI	Anexo VI	Anexo V
Anexo VII	Anexos IV and X	—
Anexo VIII	Anexo XV	—
Anexo IX	—	—
Anexo X	Anexo XVI	—
Anexo XI	—	—
Anexo XII	Anexo XVII	—

3. PLAN DE CALIDAD DEL AIRE EN EL RD 102/2011

Tal y como se ha explicado anteriormente en el punto 2.2 sobre Legislación vigente, el RD 102/2011 transpone a nuestra legislación la Directiva 2008/50/CE, e incorpora además los anteriores RD que surgieron de la Directiva 2000/60/CE (Tabla 3.1), con algunas modificaciones.

EL RD **define los objetivos de calidad del aire** para los contaminantes atmosféricos con más incidencia en la salud de las personas y en el medio ambiente (Anexo I del RD). Además, **regula la evaluación, el mantenimiento y la mejora** de la calidad del aire, con el establecimiento de **métodos y criterios comunes de evaluación**.

En este RD se recogen las actuaciones de las Administraciones públicas, pasando a ser responsabilidad de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental de MITECO, y no de las Comunidades Autónomas (Artículo 3), el realizar ciertas actuaciones como, por ejemplo, determinar la información que debe ser intercambiada entre las administraciones públicas para el cumplimiento del deber de información a la CE, así como la información que debe ser puesta a disposición del público, y define cuáles son las actuaciones que han de llevar a cabo las Administraciones Públicas.

Entre las principales actuaciones que han de llevar a cabo las Administraciones Públicas, destacan la elaboración, implementación y seguimiento de **Planes de Mejora de Calidad del Aire (PMCA)** según estipula el artículo 24 del RD. Este RD 102/2011 define PMCA como, “**aquellos que contienen medidas para mejorar la calidad del aire de forma que los niveles de los contaminantes estén por debajo de los valores límite o de los valores objetivo**”. Según el apartado 5 del artículo 24 de RD 102/2011, la Administración General del Estado (AGE) elaborará **Planes Nacionales de Mejora de la Calidad del Aire (PNMCA)** para aquellos contaminantes en que se observe comportamientos similares en cuanto a fuentes, dispersión y niveles en varias zonas o aglomeraciones. Ello debe hacerlo recopilando información técnica, proponiendo medidas para coordinar actuaciones, elaborando sistema de control y garantía e integrando toda la información, entre otras funciones. Todo ello sin perjuicio de lo establecido en el artículo 24.1 por el que se establece que, cuando en determinadas zonas o aglomeraciones los niveles de contaminantes en el aire ambiente superen cualquier valor límite o valor objetivo, las comunidades autónomas aprobarán planes de calidad del aire para esas zonas y aglomeraciones con el fin de conseguir respetar el valor límite o el valor objetivo correspondiente.

Así mismo, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), como responsable de la gestión de la red EMEP/VAG/CAMP de contaminación atmosférica de fondo, se encarga de implantar un sistema de control y garantía de calidad que asegure la exhaustividad, coherencia, transparencia, comparabilidad y confianza de los resultados obtenidos en dicha red y realizar las mediciones indicativas de partículas PM_{2.5} descritas en el artículo 8, las mediciones indicativas de metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos descritas en el artículo 9 y las mediciones de NH₃ en estaciones rurales de fondo señaladas en el artículo 12. Por su parte, el Centro Nacional de Sanidad Ambiental del Instituto de Salud Carlos III, participa en los ejercicios de intercomparación comunitarios, coordina a escala nacional la correcta utilización de los métodos de referencia, y propone métodos de referencia nacionales cuando no existan dichos métodos en el ámbito de la Unión Europea, entre otras funciones. Respecto a las mediciones, el número de estaciones de medición fijas podrá reducirse hasta en un 50 %, siempre y cuando los métodos suplementarios

aporten información suficiente para la evaluación de la calidad del aire en lo que respecta a los valores límite o los umbrales de alerta, y el número de puntos de muestreo que vaya a instalarse y la resolución espacial de otras técnicas resulten suficientes para determinar la concentración del contaminante de que se trate.

Tabla 3.1. Correspondencias entre los artículos del presente Real Decreto, la Directiva 2008/50/CE que transpone y los Reales Decretos que deroga. Todas las disposiciones referentes al amoniaco son de nueva incorporación. (ANEXO XVII, RD 102/2011).

Presente RD	RD 1073/2002	RD 1796/2003	RD 812/2007	Directiva 2008/50/CE
Artículo 1	Artículo 1	Artículo 1	Artículo 1	Artículo 1
Artículo 2	Artículo 2	Artículo 2	Artículo 2	Artículo 2
Artículo 3	Artículo 3 con modificaciones	–	–	Artículos 3 y 4 y Anexo I.C.1
Artículo 4	–	–	–	–
Artículo 5	–	–	–	Artículo 4
Artículo 6	Artículos 8 y 9.2 con modificaciones	–	Artículos 4.1 a 4.4 y 5.2	Artículos 4, 5 y 6.1 a 6.4
Artículo 7	Artículo 9 con modificaciones	–	Artículo 5.3 a 5.6	Artículos 7 y 8
Artículo 8	–	–	–	Artículo 6.5
Artículo 9	–	–	Artículo 4.5 y 4.6	–
Artículo 10	–	Artículo 9 con modificaciones	–	Artículo 9
Artículo 11	–	Artículo 9	–	Artículos 10 y 11
Artículo 12	–	–	–	–
Artículo 13	Artículos 4 y 5 con modificaciones	Artículos 3.1, 3.2, 4.2 y 5 con modificaciones	Artículo 3.1 con modificaciones	Artículos 13.1, 14.1, 16 y 17.1
Artículo 14	Artículo 6 con modificaciones	–	–	Artículo 23.1
Artículo 15	Artículo 5 con modificaciones	–	–	Artículo 12
Artículo 16	–	Artículos 3.3 y 4.2	–	Artículo 17.2 y 17.3
Artículo 17	–	Artículo 5	–	Artículo 18
Artículo 18	–	–	Artículo 3.2	–
Artículo 19	–	–	Artículo 3.3	–
Artículo 20	Artículo 7	Artículo 6.2 (en parte)	–	Artículos 13.2 y 19
Artículo 21	–	–	–	Artículo 15.1 a 15.3
Artículo 22	Artículo 4.3 con modificaciones	–	–	Artículo 20
Artículo 23	–	–	–	Artículo 22
Artículo 24	Artículo 6 con modificaciones	Artículo 3.3 y 3.4 con modificaciones	–	Artículo 23
Artículo 25	Artículo 5.3	Artículo 7	–	Artículo 24
Artículo 26	Artículo 8, ampliado	–	–	Artículo 25
Artículo 27	Artículo 10	Artículo 10	Artículo 6	Artículo 27 (parte) y Anexo I.C.2
Artículo 28	Artículo 11 y Anexos I.III y II.III con modificaciones	Artículo 6 y anexo II.II con modificaciones	Artículo 7 con modificaciones	Artículo 26 y anexo XVI
Artículo 29	Artículo 12	Artículo 11	Artículo 8	Artículo 30
Disposición adicional única	Disposición adicional única	–	–	Artículo 31.2.a)
Anexo I	Anexos I II y III, con modificaciones, IV, V, VI	Anexos I y II, con modificaciones	Anexo I	Anexos VII, XI, XII, XIII y XIV.D y XIV.E
Anexo II	Anexo VII	–	Anexo II	Anexo II
Anexo III	Anexo VIII, con modificaciones	–	Anexo III.I a III.III	Anexo III
Anexo IV	Anexo IX, con modificaciones	–	Anexo III.IV con modificaciones	Artículo 14.2 y Anexo V.A y V.C
Anexo V	Anexo X	Anexo VIII	–	Anexo I.A, I.B y I.C.1
Anexo VI	–	–	Anexo IV	–
Anexo VII	Anexo XI con modificaciones	Anexo IX con modificaciones	Anexos IV.IV y V	Anexo VI
Anexo VIII	–	–	–	Anexo IV
Anexo IX	–	Anexo V	–	Anexo VIII
Anexo X	–	Anexo VI	–	Anexo IX
Anexo XI	–	Anexo VII	–	Anexo X
Anexo XII	–	–	–	–
Anexo XIII	–	–	–	Artículo 15.4, anexos V.B, XIV.A a XIV.C
Anexo XIV	–	–	–	–
Anexo XV	Anexo XII	Anexo X	–	Anexo XV
Anexo XVI	Anexo XIII	Artículo 10 y anexo III	–	–
Anexo XVII	–	–	–	Anexo XVII

En cuanto al cumplimiento de los valores límite y objetivo, se tendrá en cuenta un enfoque integrado de la protección del medio ambiente, que no afecte a los demás Estados Miembros de la Unión

Europea ni de otros países, y que no contravenga la legislación sobre protección de la salud y seguridad en el lugar de trabajo. Los valores establecidos en el ANEXO I recogen cambios importantes respecto a la legislación anterior, y se establecen unos umbrales de activación y de información, además de los de alerta que ya estaban recogidos en decretos anteriores. Se establecen también límites para nuevos contaminantes, como PM2.5.

El RD 102/2011 permite la prórroga de los plazos de cumplimiento y la exención de la obligación de aplicar ciertos valores límite, si las autoridades competentes lo consideran oportuno y previa aprobación de la CE (artículo 23), **establece en su artículo 24 los PMCA**s, ya que cuando se supere cualquier valor límite, **las Comunidades Autónomas (CCAA)** deberán aprobar planes de calidad del aire para esas zonas con el fin de conseguir respetar los valores especificados en el anexo I de dicho RD. Así mismo, establece que cuando se superen los valores objetivo, las CCAA podrán aprobar PCA para esas zonas con el fin de conseguir respetar dichos valores. Como excepción, el artículo excluye As, Cd, Ni y BaP cuando las superaciones tengan su origen en actividades industriales donde ya se estén aplicando todas las mejores técnicas disponibles. Cabe recordar, que estos contaminantes tienen valor objetivo, que no límite (lo cual cambia en la nueva directiva aprobada, ver Tabla 2.2). En el caso del O₃, el artículo 16 recoge que en las zonas y aglomeraciones donde se supere el valor objetivo, las Administraciones competentes adoptarán los planes necesarios para garantizar que se cumpla dicho valor objetivo en la fecha señalada en el anexo I, **salvo cuando no pueda conseguirse mediante medidas que no conlleven costes desproporcionados**. Estos PMCA priorizarán la reducción del período de superación para valores límite vencidos y la protección de los sectores más vulnerables de la población, como, por ejemplo, los niños. Además, serán integrados para múltiples contaminantes, si así procede. El RD especifica que se elaborarán en colaboración con titulares de actividades industriales afectadas. Otro punto por destacar del artículo 24 es que la responsabilidad de los planes recaerá en entidades locales cuando por motivos de control de tráfico u otras circunstancias, les corresponda de acuerdo con sus competencias.

Por otro lado, las responsabilidades de la AGE en materia de planes de calidad del aire de acuerdo con el RD vigente son:

- Elaborar PNMCA con comportamientos similares en varias zonas/aglomeraciones.
- Coordinar la elaboración de planes conjuntos entre comunidades autónomas.
- Asegurar la coherencia entre planes y maximizar el beneficio medioambiental conjunto.
- Comunicar los planes aprobados a la CE.

Los planes podrán incluir medidas adoptadas de conformidad con el artículo 25, en el cual se establece la regulación de los **Planes de Acción a Corto Plazo (PACP)**, indicando que, cuando en una zona o aglomeración determinada exista el riesgo de que el nivel de contaminantes supere uno o más de los umbrales de alerta especificados en su anexo I, **las CCAA y, en su caso, las entidades locales**, elaborarán PACP que indicarán las medidas que deben adoptarse a corto o medio plazo para reducir el riesgo de superación o la duración de la misma. Las medidas pueden incluir, entre otros:

- Restricciones al tráfico.
- Obras de construcción y demolición.

- Emisiones portuarias.
- Emisiones de instalaciones industriales y generación eléctrica.
- Uso de productos.
- Calefacciones domésticas.

En relación con el O₃ es importante indicar que se hace una mención destacable a la priorización de medidas sobre precursores de contaminantes secundarios cuando exista un riesgo de superación del umbral de alerta del O₃ (NO_x y COVs como precursores)

El RD indica que los resultados de la ejecución de las medidas deben ser cuantificables y comparables en referencia a la situación previa a la entrada en vigor de las medidas. Así, las autoridades competentes deberán establecer indicadores de seguimiento de la calidad del aire para los contaminantes regulados. Aunque el RD incluye el uso de la modelización para la evaluación de la calidad del aire, además de las mediciones (artículos 6- evaluación de la calidad del aire, 7- mediciones en la evaluación de la calidad del aire, 10 y 11- ambos sobre emisiones en la evaluación de O₃ y precursores), no lo sugiere así en la evaluación de la eficacia de los PMCAs. Sin embargo, se considera muy conveniente ejecutar tareas de modelización para evaluar el efecto de las medidas a implementar en el PMCA, y para demostrar que todas ellas aplicadas permiten no sobrepasar los valores límite u objetivo considerados en el plan. Una vez implementado el plan se ha de realizar el seguimiento tanto por métodos de modelización como usando las mediciones de los contaminantes en cuestión. Ello puede permitir evaluar la efectividad, identificar problemas, y tomar medidas correctoras. Así mismo, el empleo de la modelización también es relevante en el propio proceso de elaboración del Plan.

A nivel de responsabilidades, estas están reguladas por el **Plan Marco de Acción a Corto Plazo** (PMACP) para casos de episodios de contaminación, aprobado por la Conferencia Sectorial de 9 de julio de 2021, y que motivó la modificación del RD 102/2011 en 2023. Éste establece unos valores y unas actuaciones mínimas homogéneas para todas las administraciones competentes, del que hará un continuo seguimiento el Ministerio competente. Este PMACP, junto con las directrices de la CE, será del que partirán las medidas de mitigación concretas desarrolladas por CCAA y entidades locales.

Respecto a la información al público (ver Tabla 3.2 y 3.3), cuando se superen o haya previsión de superar los umbrales recogidos en el anexo I, se habrá de difundir información sobre la ubicación de la zona donde se ha producido la superación, el tipo de umbral superado, y la hora de inicio y duración de la superación. También se deberá notificar las previsiones para las horas, día o días siguientes, el tipo de población expuesta y los posibles efectos para la salud y el comportamiento recomendado, así como las medidas preventivas destinadas a reducir la contaminación y/o la exposición a la misma.

En resumen, podemos destacar que los planes se deben caracterizar por ser eficaces, proporcionados y no discriminatorios, por tener en cuenta las condiciones geográficas, meteorológicas y económicas y por fomentar la participación de todos los actores involucrados.

Finalmente, en enero de 2023 se aprobó el RD 34/2023, por el que se modifican el RD 102/2011, junto con otras normas medioambientales (RD 208/2022 y RD 815/2013), para incorporar lo dispuesto en el citado PMACP en caso de episodios de alta contaminación. MODIFICA los artículos:

- 2: Añade más definiciones.
- 3: Respecto a las Actuaciones de las Administraciones públicas, se añade la propuesta de la adopción por parte de la Comisión de Cooperación en Materia de Calidad Ambiental de medidas coordinadas en materia de calidad del aire.
- 20: Además de las medidas aplicables por superación, se incluye también las medidas por previsión de superación de los umbrales de activación, de información o de alerta.
- 25: Se detallan con más profundidad los PACP aumentando la información disponible de los mismos (O_3 y contaminantes secundarios, entre otros).
- 28: Amplía la información disponible al público.
- Anexo I: Se añaden a los umbrales de activación, los de información y de alerta para algunos contaminantes (SO_2 , NO_2 , entre otros).

Tabla 3.2. Información que debe incluirse en los planes locales, regionales o nacionales de mejora de la calidad del aire ambiente (artículo 24), conforme ANEXO XV del RD 102/2011.

Localización de la superación:	Región, ciudad (mapa), estación de medición (mapa, coordenadas geográficas).
Información general:	Tipo de zona (ciudad, área industrial o rural), estimación de la superficie contaminada (km^2) y de la población expuesta a la contaminación, datos climáticos útiles, datos topográficos pertinentes, información suficiente acerca del tipo de organismos receptores de la zona afectada que deben protegerse.
Autoridades responsables:	Nombres y direcciones de las personas responsables de la elaboración y ejecución de los planes de mejora.
Naturaleza y evaluación de la contaminación:	Concentraciones observadas durante los años anteriores (antes de la aplicación de las medidas de mejora), concentraciones medidas desde el comienzo del proyecto, técnicas de evaluación utilizadas.
Origen de la contaminación:	Lista de las principales fuentes de emisión responsables de la contaminación (mapa), cantidad total de emisiones procedentes de esas fuentes ($t/año$), información sobre la contaminación procedente de otras regiones, análisis de asignación de fuentes.
Análisis de la situación:	Detalles de los factores responsables de la superación (transporte, incluidos los transportes transfronterizos, formación de contaminantes secundarios en la atmósfera), detalles de las posibles medidas de mejora de la calidad del aire.
Detalles de las medidas o proyectos de mejora que existían antes de la entrada en vigor de la presente norma:	Medidas locales, regionales, nacionales o internacionales y efectos observados de estas medidas.
Información sobre las medidas o proyectos adoptados para reducir la contaminación tras la entrada en vigor del presente Real Decreto:	Lista y descripción de todas las medidas previstas en el proyecto, calendario de aplicación, estimación de la mejora de la calidad del aire que se espera conseguir, evidencias epidemiológicas y perspectiva de protección de salud pública, y estimación del plazo previsto para alcanzar esos objetivos (aunque no se sugiere en el RD, ello debería de demostrarse con modelización). Este punto clave está ausente en muchos de los PMCA desarrollados en España.
Información:	Sobre las medidas o proyectos a largo plazo previstos o considerados.
Lista:	De las publicaciones, documentos, trabajos, etc., que completen la información solicitada en el presente anexo.
Procedimientos:	Para el seguimiento de su cumplimiento y revisión (no lo indica el RD pero deberían de utilizarse datos de mediciones y herramientas de modelización). Este punto clave está ausente en muchos de los PMCA desarrollados en España.

Tabla 3.3. Información que debe incluirse en los planes locales, regionales o nacionales de mejora de la calidad del aire ambiente (artículo 23), conforme ANEXO XV del RD 102/2011 (incluye Directivas derogadas).

Información indicada en la sección A del ANEXO XV del RD	Ver Tabla 3.2
Información relativa al estado de aplicación de las Directivas	<p>Directiva 70/220/CEE (medidas contra contaminación por vehículos) derogada por Reglamento 715/2007 (sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (EURO 5 y EURO 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos).</p> <p>Directiva 94/63/CE (control de emisiones de COVs).</p> <p>Directiva 2008/1/CE (prevención y control integrados de la contaminación) derogada por la Directiva 2010/75/UE (sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación)).</p> <p>Directiva 2004/42/CE (limitación de las emisiones de COVs debidas al uso de disolventes orgánicos en determinadas pinturas y barnices y en los productos de renovación del acabado de vehículos).</p> <p>Directiva 97/68/CE (medidas contra emisiones motores combustión) derogada por Reglamento (UE) 2016/1628 (sobre los requisitos relativos a los límites de emisiones de gases y partículas contaminantes y a la homologación de tipo para los motores de combustión interna que se instalen en las máquinas móviles no de carretera, por el que se modifican los Reglamentos (UE) 1024/2012 y (UE) 167/2013, y por el que se modifica y deroga la Directiva 97/68/CE).</p> <p>Directiva 98/70/CE (calidad de gasolina y gasóleo).</p> <p>Directiva 1999/13/CE (limitación de emisiones de COVs) derogada por la Directiva 2010/75/UE.</p> <p>Directiva 2005/33/CE y Directiva 1999/32/CE (reducción azufre en combustibles uso marítimo) derogada por Directiva (UE) 2016/802 (relativa a la reducción del contenido de azufre de determinados combustibles líquidos).</p> <p>Directiva 2000/76/CE (incineración de residuos) derogada por Directiva 2010/75/UE (sobre las emisiones industriales).</p> <p>Directiva 2001/80/CE (limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión) derogada por Directiva 2010/75/UE (sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación)).</p> <p>Directiva 2005/55/CE (aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros sobre las medidas que deben adoptarse contra la emisión de gases y partículas contaminantes procedentes de motores de encendido por compresión destinados a la propulsión de vehículos, y contra la emisión de gases contaminantes procedentes de motores de encendido por chispa alimentados con gas natural o gas licuado del petróleo destinados a la propulsión de vehículos) derogada por REGLAMENTO (CE) 595/2009 (relativo a la homologación de los vehículos de motor y los motores en lo concerniente a las emisiones de los vehículos pesados (Euro VI) y al acceso a la información sobre reparación y mantenimiento de vehículos y por el que se modifica el Reglamento (CE) n o 715/2007 y la Directiva 2007/46/CE y se derogan las Directivas 80/1269/CEE, 2005/55/CE y 2005/78/CE).</p> <p>Directiva 2006/32/CE (eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos).</p> <p>Directiva 2001/81/CE (techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos), derogada por Directiva 2016/2284 (reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, que también modifica la Directiva 2003/35/CE que establece medidas para la participación del público en la elaboración de determinados planes y programas relacionados con el medio ambiente).</p>
Información acerca de todas las medidas de reducción de la contaminación cuya aplicación se haya considerado al nivel local, regional o nacional correspondiente para la consecución de los objetivos de calidad del aire	<p>a. Reducción de las emisiones procedentes de fuentes fijas, disponiendo que las pequeñas y medianas fuentes de combustión fijas contaminantes (incluidas las de biomasa) estén equipadas con sistemas de control de las emisiones o sean sustituidas;</p> <p>b. Reducción de las emisiones de los vehículos mediante su acondicionamiento con equipos de control de las emisiones. Debería considerarse la posibilidad de ofrecer incentivos económicos para acelerar el ritmo de aplicación de esta medida;</p> <p>c. Adjudicación pública conforme a la guía sobre contratación pública ecológica (http://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/buying_green_handbook_es.pdf) de vehículos de carretera, combustibles y equipamientos de combustión, incluida la compra de:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ vehículos nuevos, especialmente de bajas emisiones, ▪ servicios de transporte en vehículos menos contaminantes, ▪ fuentes de combustión fijas de bajas emisiones, ▪ combustibles de bajas emisiones para fuentes fijas y móviles; <p>d. Medidas destinadas a limitar las emisiones procedentes del transporte mediante la planificación y la gestión del tráfico (incluida la tarificación de la congestión, la adopción de tarifas de aparcamiento diferenciadas y otros incentivos económicos; establecimiento de «zonas de bajas emisiones»);</p> <p>e. Medidas destinadas a fomentar un mayor uso de los modos menos contaminantes;</p> <p>f. Medidas destinadas a garantizar el uso de combustibles de bajas emisiones en las fuentes fijas pequeñas, medianas y grandes y en las fuentes móviles;</p> <p>g. Medidas destinadas a reducir la contaminación atmosférica mediante la concesión de permisos con arreglo a la Directiva 2008/1/CE, el establecimiento de planes nacionales conforme a la Directiva 2001/80/CE y el uso de instrumentos económicos como impuestos, cánones o comercio de derechos de emisión;</p> <p>h. En su caso, medidas destinadas a proteger la salud de los niños o de otros grupos vulnerables.</p>

Entre los planes aprobados (MITECO, 2024b) contamos con:

- **Plan Marco de Acción a Corto Plazo (PMACP) en caso de episodios de alta contaminación por PM10, PM2.5, NO₂, O₃ y SO₂.**
- **Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire (PNMCA).**
 - Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013-2016: Plan AIRE, con fecha de 12/04/ 2013 el Consejo de Ministros acordó la aprobación del que cuenta con la colaboración de las comunidades autónomas, entidades locales y departamentos ministeriales implicados, así como de la comunidad científica.
 - Plan Aire 2017-2019 (Plan Aire 2), aprobado con fecha de 15/12/2017, en el marco de la Directiva (UE) 2016/2284 del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de diciembre de 2016 relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, por la que se modifica la Directiva 2003/35/CE y se deroga la Directiva 2001/81/CE.
- **Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica (PNCCA)**
 - I Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica 2019-2023: ha sido aprobado, en el Consejos de Ministros del 27 de septiembre de 2019, dando cumplimiento a las obligaciones de aprobación y actualización de un PNCCA establecidas por la Directiva 2016/2284 (MITECO, 2019).
 - Actualización PNCCA para 2023-2030: ha sido aprobado, en el Consejos de Ministros del 9 de enero de 2024, y profundiza y amplia las medidas del primer PNCCA con la finalidad de conseguir el cumplimiento de los objetivos de reducción de contaminantes de la Directiva 2016/2284. No da continuidad a los planes de aire sino a las medidas establecidas en el mismo, y sirve para ayudar a cumplir con los valores de calidad del aire (MITECO, 2024c).
- **Planes de mejora de la calidad del aire autonómicos o locales.**
 - Andalucía
 - PMCA de Almería
 - PMCA de la Zona Industrial de Carboneras (Almería)
 - PMCA de Cuevas del Almanzora (Almería)
 - PMCA de El Ejido (Almería)
 - PMCA de la Zona Industrial Bahía de Algeciras (Cádiz)
 - PMCA de Bahía de Cádiz
 - PMCA de Jerez de la Frontera
 - PMCA de la Aglomeración de Córdoba
 - PMCA del término municipal de Granada
 - PMCA de la Zona Industrial de Huelva
 - PMCA de Jaén y Torredonjimeno
 - PMCA en el Municipio de Bailén (Jaén)
 - PMCA de Villanueva el Arzobispo (Jaén)
 - Plan municipal de mejora de la calidad del aire en Villanueva del Arzobispo
 - PMCA de la Aglomeración de Málaga y Costa del Sol
 - PMCA de la Aglomeración de Sevilla y Área Metropolitana
 - Aragón

- PMCA en relación a los niveles de inmisión de partículas en suspensión en el municipio de Alcañiz (Teruel)
- Ayuntamiento de Zaragoza
 - Estrategia de Calidad del Aire y Cambio Climático de Zaragoza (ECAZ)
- Asturias
 - PMCA en la zona Avilés (ES0307) (Revisión del PMCA en la zona ES0302 Asturias Central) (aprobado 09/08/2017)
 - PMCA en la aglomeración área de Gijón (ES0309) (Revisión del Plan de mejora de calidad del aire en la aglomeración de Gijón ES 0304) (aprobado 09/08/2017)
 - PACP para la reducción de los niveles de partículas en suspensión en la atmósfera de la zona oeste de Gijón
 - Modificación del PACP para la reducción de los niveles de partículas en suspensión en la atmósfera de la zona oeste de Gijón
 - PACP para la reducción de los niveles de benceno en Trubia (aprobado 09/08/2017)
 - PACP para disminución de los niveles de partículas PM10 en la zona industrial y portuaria de la margen izquierda de la ría de Avilés (2022)
 - Plan Estratégico de Calidad del Aire del Principado de Asturias (PECAPA)
- Islas Baleares
 - PMCA de Palma 2021
 - PMCA de Maó 2021
 - Plan Marco de Mejora de la Calidad del Aire (PMMCA) en Baleares
 - Protocolo de información ante superaciones del umbral de información para el O₃
 - PACP por la superación del umbral de alerta de contaminantes de la atmósfera
- Islas Canarias
 - PMCA de la aglomeración Santa Cruz de Tenerife-San Cristóbal de La Laguna, por dióxido de azufre
 - Anulación parcial del PMCA de la aglomeración de Santa Cruz de Tenerife- San Cristóbal de la Laguna por SO₂
- Cantabria
 - PMCA en el municipio de Los Corrales de Buelna para PM10
 - PMCA para PM10 en el municipio de Torrelavega
 - PMCA para PM10 en el municipio de Camargo
- Castilla la Mancha
 - Programa de reducción de SO₂ en Puertollano
 - Programa de reducción de PM10 en Puertollano
- Castilla y León
 - Estrategia para la Mejora de la Calidad del Aire en Castilla y León 2020-2030
 - Plan de mejora de la calidad del aire por ozono troposférico en Castilla y León
- Cataluña
 - Plan de Calidad del Aire, horizonte 2027
 - PAMCA, horizonte 2020
 - Acuerdo político para la mejora de la calidad del aire en la conurbación de Barcelona
 - Plan supramunicipal de acción para la mejora de la calidad del aire de la comarca del Vallès Occidental

- Plan supramunicipal de acción para la mejora de la calidad del aire de la comarca del Vallès Oriental
- PAMCA del aire de la comarca d'Osona
- PAMCA para 13 municipios de la comarca del Baix Llobregat
- PMCA de Terrassa - horizonte 2025
- PAMCA del municipio del Prat de Llobregat
- PAMCA del municipio de Montcada i Reixac
- PAMCA del municipio de Cerdanyola del Vallès
- PAMCA del municipio de Mollet del Vallès
- Programa de medidas contra la contaminación atmosférica de Barcelona (2016-2020)
- PAMCA de Sta. Coloma de Gramenet
- PAMCA del municipio de L'Hospitalet de Llobregat (2008-2015-2020)
- PAMCA de Sabadell 2017-2022 (mayo 2017)
- Comunidad Valenciana
 - PMCA de la Zona ES1003: Mijares-Penyagolosa (A- Costera) y Aglomeración ES1015: Castelló
 - PMCA de L'Alacantí Occidental
 - PMCA de la aglomeración ES1016: L'Horta (Valencia y entorno metropolitano)
- Extremadura
 - PMCA de la Comunidad Autónoma de Extremadura
- Galicia
 - PMCA de La Coruña
- Comunidad de Madrid
 - Estrategia de calidad del aire y cambio climático de la Comunidad de Madrid 2013-2020. Plan Azul+
 - PMCA en el Corredor del Henares
 - PMCA en la aglomeración "Urbana Sur"
 - PMCA en Torrejón de Ardoz
 - PMCA 2013-2016 - Alcorcón
 - PMCA 2014-2018 del municipio de Getafe
 - PMCA de Alcobendas, 2012-2016
 - PMCA de la Zona Edusi del Municipio de Parla
- Ayuntamiento de Madrid
 - PMCA y Cambio Climático - Plan A
- Murcia
 - PMCA para la Región de Murcia 2016-2018
- País Vasco
 - PAMCA en la Comarca del Alto Deba
 - PAMCA en la Comarca del Duranguesado
 - PAMCA en el Municipio de Lemona
 - PAMCA en el Parque Europa del Bajo Nervión
 - PAMCA en la Comarca de PasaiAldea
 - PAMCA en la Comarca del Goierri
 - PAMCA en la Comarca de Tolosaldea

- PAMCA en la Comarca del Urola Medio
- PAMCA en el Barrio de Betoño de Vitoria-Gasteiz
- PMCA en Bilbao
- La Rioja
- PAMCA del aire de La Rioja 2010-2015



4. PLANES DE CALIDAD DEL AIRE DE LA DIRECTIVA (UE) 2024/2881

4.1. Cambios relevantes en la Directiva (UE) 2024/2881

Las Guías de calidad del aire de la OMS (2021) mostraron nuevas evidencias científicas sobre los efectos en salud que se producen a bajos niveles de exposición, y en base a ello se fijaron valores guía de protección de la salud más estrictos para PM2.5, PM10 y NO₂ con vistas a reducir el impacto sobre la salud humana. En respuesta a estas nuevas Guías, en noviembre de 2024 fue publicada la Directiva (UE) 2024/2881 sobre la calidad del aire y una atmósfera más limpia en Europa cuyas **modificaciones** introducidas tienen por objeto, valores límite y objetivo más estrictos (para PM2.5, PM10, NO₂, C₆H₆, O₃ y CO, ver Tabla 2.2) y cercanos a las guías de la OMS, pero también **consolidar** y **simplificar** la legislación en esta materia. También se especifica que la Comisión debe seguir supervisando la evolución científica en relación con cualesquiera otros contaminantes no cubiertos por la nueva Directiva y evaluar la necesidad de ampliar sus disposiciones a dichos contaminantes. Los datos científicos muestran que el SO₂, NOx, PM, Pb, C₆H₆, CO, As, Cd, Ni, algunos HAP y el O₃ tienen una serie de importantes efectos adversos para la salud humana que pueden provocar muertes prematuras, y que no existe un umbral identificable por debajo del cual estas sustancias no suponen un riesgo para la salud humana. Estas sustancias dañan la mayoría de los sistemas de órganos y están relacionadas con muchas enfermedades debilitantes, como el asma infantil y de inicio adulto, las enfermedades cardiovasculares, las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas, la neumonía, el ictus, la diabetes, el cáncer de pulmón, el deterioro del desarrollo cognitivo y la demencia. El impacto en la salud humana y el medio ambiente se produce a través de las concentraciones en el aire ambiente y el depósito.

La Directiva (UE) 2024/2881, de 23 de octubre de 2024, sobre la calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia en Europa reconoce, además, los mayores riesgos y las necesidades específicas de la población sensible y los grupos vulnerables en lo que respecta a la contaminación atmosférica. Estos grupos incluyen a aquellos que padecen problemas de salud específicos (por ejemplo, enfermedades respiratorias o cardiovasculares), las mujeres embarazadas, los recién nacidos, los niños, las personas mayores, las personas con discapacidad o con un acceso inadecuado a la atención médica, y los trabajadores que están expuestos a niveles especialmente elevados de contaminación atmosférica en su profesión. Estos grupos parecen presentar un mayor riesgo, como ponen de manifiesto los estudios que vinculan la contaminación atmosférica con un menor rendimiento cognitivo entre las personas mayores y sugieren que la mala calidad del aire es especialmente peligrosa para los niños. La Directiva tiene por objeto informarles y protegerles, así como proteger la salud de las personas de nivel socioeconómico más bajo, que tienden a verse más afectadas por la contaminación atmosférica que la población en general, como consecuencia tanto de su mayor exposición como de su mayor vulnerabilidad (EEA, 2018).

Así, cuando se hayan producido daños para la salud humana como consecuencia de una infracción, cometida intencionadamente o por negligencia de las autoridades competentes, de las normas nacionales de transposición de los apartados 1 a 5 del artículo 19 y de los apartados 1 y 2 del artículo 20 de la nueva Directiva, los Estados Miembros deben garantizar que las personas afectadas por dichas infracciones tengan derecho a reclamar y obtener una indemnización por esos daños (**artículo 28**). Las sanciones previstas en la presente Directiva deben ser efectivas, proporcionadas y



disuasorias (**artículo 29**). Por tanto, no solo fija valores límite y objetivo más estrictos, sino que el régimen sancionador cambia considerablemente, además de establecer derechos de reclamación.

Las nuevas medidas establecidas siguen los principios de cautela, de que «quien contamina paga» y de prevención y corrección de la contaminación en su fuente, así como el respeto del derecho humano a un medio ambiente limpio, saludable y sostenible. Además, señala que la obligación de reducción de la exposición media debe completar y no sustituir a los valores límite, que han demostrado ser las normas cuya aplicación garantiza la mayor eficacia hasta la fecha.

El objetivo de la nueva Directiva es establecer disposiciones en materia de calidad del aire con el fin de alcanzar un **objetivo de “contaminación cero”**, de forma que dentro de la UE la calidad del aire mejore progresivamente hasta niveles que ya no se consideren perjudiciales para la salud humana, los ecosistemas naturales y la biodiversidad (**artículo 1**). Para ello es necesaria una revisión periódica de los datos científicos para comprobar si las normas de calidad del aire vigentes siguen siendo suficientes y si deben regularse otros contaminantes atmosféricos, a más tardar el 31 de diciembre de 2030, y posteriormente cada cinco años, y con mayor frecuencia si nuevas conclusiones científicas sustanciales apuntan a su necesidad, como la publicación de las Directrices de la OMS sobre la calidad del aire más actualizadas (**artículo 3**); también se especifica que tras la primera revisión periódica la Comisión propondrá, cuando proceda, valores límite o niveles críticos para aquellos contaminantes atmosféricos que se miden en los **super-emplazamientos** (definidos por la nueva Directiva como: estaciones de control de la calidad del aire situada en un entorno urbano o rural que combina la medida de diversos contaminantes -regulados y no regulados- para recopilar datos a largo plazo) de control a que se refiere el artículo 10 pero que actualmente no figuran en el anexo I, y que estarán en consonancia con las pruebas científicas más recientes sobre lo que resulta necesario para proteger la salud humana y el medio ambiente.

Como este objetivo de reducción de la contaminación atmosférica no puede ser alcanzado de manera suficiente por los Estados Miembros, por la naturaleza transfronteriza de los contaminantes atmosféricos, esto puede lograrse mejor a escala de la UE, adoptando medidas de acuerdo con el principio de subsidiariedad estipulado en el artículo 5 del Tratado de la UE.

La nueva propuesta **simplifica** las normas relativas a los umbrales de evaluación, sustituyendo los umbrales inferior y superior de las normas anteriores por un único umbral de evaluación por contaminante (**artículo 7**). Cuando se superen los valores límite o los valores objetivo establecidos en la nueva Directiva, la calidad del aire también deberá evaluarse con aplicaciones de modelización que ayudarán a detectar posibles ubicaciones adicionales en las que se puedan dar superaciones, y se podrán instalar mediciones fijas adicionales en un plazo de dos años, o mediciones indicativas adicionales en el plazo de un año, desde que se haya registrado la superación y se emplearán durante al menos un año civil a fin de evaluar el nivel de concentración del contaminante de que se trate.

Además del control exigido en virtud del artículo 10, los Estados miembros realizarán un control de los niveles de partículas ultrafinas (ver Anexo III.D y Anexo VII-Sección 4).

También **se actualiza y aclara** las normas sobre el número y la ubicación de los puntos de muestreo (**artículo 9**), incluyendo normas más estrictas para la reubicación de los puntos de muestreo que serán representativas de la exposición de las comunidades de riesgo y de la exposición de una o más

poblaciones sensibles o grupos vulnerables, siempre que sea posible, y cuya duración mínima será de 2 meses por año civil para mediciones indicativas estando distribuidas de manera uniforme a lo largo del año.

Además, introduce los super-emplazamientos de control (combinando múltiples puntos de muestreo para recopilar datos a largo plazo sobre los contaminantes) y regula su número y ubicación (**artículo 10**).

La nueva Directiva **aclara** los objetivos de calidad de los datos para la medición de la calidad del aire e introduce objetivos de calidad para la modelización (**artículo 11**), y exige que todos los datos se notifiquen y se utilicen a efectos de evaluación del cumplimiento. También reúne los requisitos necesarios para mantener los niveles de contaminantes atmosféricos por debajo de los valores límite e introduce nuevos requisitos para las concentraciones de la exposición media (**artículo 12**).

La adaptación de las normas de calidad del aire de la UE a las recomendaciones de 2021 de la OMS (indicadas en el **artículo 13**), introduce valores límite para todos los contaminantes atmosféricos actualmente sujetos a valores objetivo, excepto en el caso del O₃, que está exento de este cambio debido a las características complejas de su formación en la atmósfera, que complican la tarea de evaluar la viabilidad del cumplimiento de valores límite estrictos. Para situar a la UE en una trayectoria que le permita alcanzar la meta de ausencia de contaminación atmosférica para 2050, se introduce una nueva disposición que exige la reducción de la exposición media del público a PM2.5 y NO₂ a nivel regional, a los niveles recomendados por la OMS. Cuando se supere cualquier umbral de alerta establecido en la sección 4 del anexo I, los Estados miembros adoptarán todas las medidas necesarias para informar al público en el menor tiempo posible, y a poder ser en unas horas, de manera **coherente y fácil de entender**, facilitando información detallada sobre la gravedad de la superación y los efectos sobre la salud asociados, así como sugerencias para proteger a la población, prestando especial atención a la población sensible y los grupos vulnerables (**artículo 15**). **Amplía** las normas sobre la deducción de las contribuciones de fuentes naturales a las superaciones de las normas de calidad del aire, a fin de incluir las superaciones de las obligaciones de reducción de la exposición media (**artículo 16**). Respecto a la deducción del uso de sal o arena en las carreteras durante el invierno, se **amplía** para incluir PM2.5, ya que su uso en las carreteras durante el invierno es importante para la seguridad vial, aunque la resuspensión de partículas de estas medidas también puede contribuir a la contaminación atmosférica con partículas de diferentes tamaños (**artículo 17**).

También se detallan en el **artículo 18** la posibilidad de pedir prórrogas en el cumplimiento de determinador valores límite (PM10, PM2.5, NO₂, C₆H₆, BaP), que será tratada con detalle en apartados posteriores.

La propuesta introduce también un marco reforzado para la elaboración de PMCA y hojas de ruta de calidad del aire en su Capítulo IV (**artículos 19-20**), constituyendo un aspecto fundamental de la misma. La sección 4.2 ofrece un análisis exhaustivo de las modificaciones que la nueva Directiva introduce en relación con los PMCA. Otra mejora a destacar es la de la sensibilización del público sobre la contaminación atmosférica, un ejemplo es que esta Directiva obliga a los Estados Miembros a establecer un **índice de calidad del aire (ICA)** que proporcione actualizaciones horarias de la calidad del aire para los contaminantes atmosféricos más nocivos y que vaya acompañado de

información sobre los riesgos para la salud asociados a cada contaminante, incluida información adaptada a la población sensible y a los grupos vulnerables, y lo pondrán a disposición de manera coherente y fácil de entender a través de una fuente pública que facilite una actualización horaria, garantizando la disponibilidad de datos en tiempo real suficientes en todas las estaciones. Este ICA será comparable en todos los Estados Miembros y seguirá las recomendaciones más actualizadas de la OMS. (**artículo 22**). Para el cumplimiento de esta obligación, puede emplearse el Índice de Calidad del Aire Europeo (ICA).

Finalmente, los anexos establecen **nuevos valores límite** para la protección de la salud humana, **actualiza** los valores objetivo y objetivos a largo plazo para el O₃ y propone **nuevos umbrales** de alerta para PM10 y PM2.5 (**Anexo I**).

Se fija un **umbral de alerta** y un **umbral de información** para el SO₂, NO₂, PM10, PM2.5 y O₃. No se establecen umbrales de alerta e información para los demás contaminantes regulados, ya que las pruebas sobre los efectos para la salud de estos contaminantes a menudo suelen considerar únicamente los efectos de la exposición a largo plazo. En caso de que surjan pruebas científicas sobre sus efectos de exposición a corto plazo, la Comisión debe evaluar la necesidad de introducir umbrales de alerta e información para dichos contaminantes.

Se **simplifican** los criterios para determinar el número mínimo de puntos de muestreo para mediciones fijas y reúne estos criterios para todos los contaminantes atmosféricos sujetos a diferentes normas de calidad del aire (**anexo III**). Se **actualizan y refuerzan** los requisitos de calidad e incertidumbre de los datos para las mediciones fijas e indicativas de la calidad del aire, la modelización y la estimación objetiva (**anexo V**). Se **actualizan** las normas relativas a los métodos que deben utilizarse para evaluar las concentraciones de diferentes contaminantes en el aire ambiente, así como para evaluar el ritmo de entrada de determinados contaminantes en los ecosistemas (**anexo VI**). Se **introduce** el seguimiento de las partículas ultrafinas (UFP) en lugares en los que es probable que se produzcan altas concentraciones de las mismas (aeropuertos, puertos, carreteras, entre otros) y **actualiza** la lista de compuestos orgánicos volátiles cuya medición se recomienda con el objetivo de mejorar la comprensión de la formación y la gestión del O₃ (**anexo VII**). Por último, se **mejora** la información sobre la calidad del aire que debe facilitarse al público, incluidas las actualizaciones horarias obligatorias de las mediciones fijas de los principales contaminantes atmosféricos, así como los resultados actualizados de la modelización, cuando estén disponibles (**anexo X**).

Para los actuales valores objetivo de As, Cd y BaP, la directiva vigente establece valores enteros, pero la nueva Directiva les ha introducido un decimal. Estos valores desde el momento de la entrada en vigor ya estarán vigentes. Por tanto, una superación por ejemplo de BaP de 1.1 (que ahora no sería superación de acuerdo con las reglas del redondeo) sí lo empezará a ser a partir de la entrada en vigor de la nueva Directiva. Aplica sólo a estos 3 contaminantes, porque para el resto no se han introducido decimales adicionales.

La Comisión de la UE (CE) debe evaluar periódicamente cómo contribuye la legislación de la UE por la que se establecen las normas en materia de emisiones para las fuentes de contaminación atmosférica al logro de las normas de calidad del aire establecidas por la nueva Directiva y, en caso necesario, proponer medidas adicionales de la UE.

La nueva Directiva destaca que es fundamental supervisar sistemáticamente la calidad del aire en las proximidades de los puntos críticos de contaminación atmosférica en los que el nivel de contaminación se ve fuertemente influido por las emisiones procedentes de fuentes de contaminación intensas que podrían exponer a las personas y a grupos de población a riesgos elevados de efectos adversos para la salud. A tal fin, los Estados Miembros deben instalar puntos de muestreo en los puntos críticos de contaminación atmosférica, como puertos o aeropuertos, con el fin de mejorar la comprensión del impacto de dichas fuentes en la contaminación atmosférica y adoptar las medidas adecuadas para minimizar su repercusión en la salud humana.

En previsión del plazo de 2030 para los nuevos valores límite establecidos en el anexo I, sección 1, cuadro 1, los Estados Miembros y las autoridades competentes deben elaborar un tipo específico de plan de calidad del aire, la denominada **hoja de ruta** de calidad del aire, para las zonas en las que las concentraciones de contaminantes en el aire ambiente superen los valores límite u objetivo de calidad del aire pertinentes establecidos para 2030 antes de dicho año. En la hoja de ruta de calidad del aire deben establecerse políticas y medidas a corto y largo plazo para cumplir dichos valores límite a más tardar en 2030. En aras de la claridad jurídica, y sin perjuicio de la terminología específica utilizada, una hoja de ruta de calidad del aire debe considerarse un plan de calidad del aire tal como se define en el artículo 4, punto 36.

4.2. Los Planes de Mejora de Calidad del Aire y Hojas de Ruta de Calidad del Aire en la Directiva (UE) 2024/2881

Un aspecto fundamental de la Directiva 2024/2881/CE es el establecimiento de un **marco más sólido para la elaboración de PMCA**. Así, en su **Capítulo IV (artículos 19-21)**, incluye mejoras en los regímenes de control, modelización y evaluación de la calidad del aire, proporcionando información adicional comparable y objetiva que permita supervisar y evaluar periódicamente la evolución de la calidad del aire en la UE. Estas mejoras, junto con requisitos más precisos de información que debe incluirse en los planes de calidad del aire, permitiría la revisión constante de la eficacia de las medidas específicas (a menudo locales) relativas a la calidad del aire. El acceso del público a los resultados del seguimiento y la evaluación de los datos y las medidas políticas conexas se verá facilitado y agilizado gracias a unos requisitos específicos más claros en materia de información a los ciudadanos. Todo ello servirá de base para futuras evaluaciones de una Directiva revisada sobre la calidad del aire ambiente. Las características clave de esta Directiva en cuanto a la elaboración de planes y hojas de ruta (artículo 19) incluyen:

- **Plazos más estrictos:**
 - 2 años: Plazo máximo para elaborar planes y hojas de ruta tras superar un valor límite u objetivo.
 - 3 años: Se deben actualizar los planes y hojas de ruta de calidad del aire si las superaciones persisten 3 años después de la fecha límite para su elaboración y estos se elaborarán a más tardar 5 años después de la fecha límite para el establecimiento del plan de calidad del aire u hoja de ruta.
 - 4 años: Plazo máximo para alcanzar el valor límite o valor objetivo (no especificado para O₃).
 - 5 años: Evaluación de la exención de la elaboración de planes de O₃ cada 5 años.
- **Consideración de los grupos vulnerables:** Los Estados Miembros deben considerar medidas para proteger a las poblaciones vulnerables como, por ejemplo, los niños.

- Coherencia garantizada con otros planes medioambientales:** Los planes de calidad del aire deben estar alineados con los planes de clima, energía, transporte y agricultura.
- Evaluación del riesgo de superación de los niveles de alerta para los PACPs:** Las diferencias en la elaboración de PACP entre la nueva y la Directiva vigente se resumen en la Tabla 4.1.
- Planes integrados:** Los planes pueden abordar múltiples contaminantes y estándares de calidad del aire.

En comparación con la Directiva 2008/50/CE, la Directiva (UE) 2024/2881 cubre una gama más amplia de escenarios bajo los que se requeriría la elaboración de planes u hojas de ruta, incluyendo:

- Superaciones de los valores objetivo de O₃ en zonas específicas.
- Incumplimiento de los objetivos de reducción media de la exposición en zonas específicas (solo planes).
- Superaciones de límites o valores objetivo que deben alcanzarse antes de 2030.

Tabla 4.1. Tabla de correspondencias entre Directiva 2008 y la nueva de 2024.

Aspecto	Directiva 2008/50/CE	Directiva (UE) 2024/2881
Alcance de los PACP	Zonas con superación de PM10, PM2.5 y NO ₂	Todas las zonas con superación de cualquier contaminante regulado con umbral de alerta
Ambición y eficacia de los PACP	No hay requisitos específicos	Medidas más ambiciosas y efectivas, con orientaciones de la CE
Transparencia y participación	No hay requisitos específicos	Publicación de PACP y participación activa del público
Protección de grupos vulnerables	No hay requisitos específicos	Medidas específicas para proteger a grupos vulnerables
Seguimiento y evaluación	Seguimiento por parte de los Estados Miembros	Seguimiento por parte de los Estados Miembros y evaluación periódica por parte de la CE
Mecanismos de cumplimiento	Limitados	Nuevos poderes de cumplimiento para la CE, incluyendo sanciones financieras

No se requerirá un plan o hoja de ruta si no hay un potencial significativo de reducción de la superación de O₃, debido a condiciones geográficas, meteorológicas o costes desproporcionados. De la misma forma, se puede no establecer una hoja de ruta si la superación se debe a actividades temporales y si se prevé alcanzar el valor límite o valor objetivo con las medidas ya en vigor. Siempre se debe justificar la decisión a la CE y al público.

Cuando no se establezca un plan o una hoja de ruta de calidad del aire, los Estados Miembros facilitarán al público y a la Comisión una justificación detallada de las razones por las que no existe una posibilidad significativa de reducción de la superación, lo que ha llevado a la decisión de no establecer un plan de calidad del aire o una hoja de ruta de calidad del aire.

Como se ha apuntado con anterioridad, la transparencia es clave en esta Directiva, incluyéndose la consulta pública durante la elaboración y actualización de los planes y hojas de ruta, y la comunicación de los planes y hojas definitivos a la CE en un plazo de 2 meses después de su adopción.

La nueva Directiva introduce también **requisitos más estrictos y completos para los PACP (artículo 20)**, con el objetivo de mejorar su eficacia en la protección de la salud pública frente a episodios de contaminación atmosférica. Estos se activarán cuando haya riesgo de superar los umbrales de alerta

establecidos (excepto O₃ en casos excepcionales). Para PM10 y PM2.5, si las opciones de reducir el riesgo son limitadas, el plan puede centrarse en la protección de grupos vulnerables y en información para reducir la exposición.

Se especifica que los planes de acción deben incluir medidas de emergencia para reducir la contaminación, medidas específicas para proteger a grupos vulnerables (niños, ancianos, enfermos) e información sobre la aplicación del plan. Deben considerarse medidas para transporte, obras de construcción, instalaciones industriales, agricultura y uso de productos y calefacción doméstica. En el anexo IX de la directiva se listan medidas que se deben tener en consideración en la elaboración de los planes.

De nuevo se destaca como fundamental garantizar la transparencia y participación pública, debiéndose también someter a consulta pública este tipo de planes y comunicarlos a la CE en el plazo de un año, una vez adoptados. La información también debe estar disponible para organizaciones relevantes. Se utilizarán la modelización y previsiones para determinar el riesgo de que los niveles de contaminantes superen uno o varios de los umbrales de alerta y se velará por que, poco después de que se prevea un riesgo de superación, entren en vigor medidas de emergencia para evitar dicha superación.

Para garantizar el aprendizaje y una mejora continua en la protección frente a picos de contaminación, los Estados pueden solicitar a la CE que organice un intercambio de mejores prácticas para beneficiarse de la experiencia de otros Estados Miembros.

Esta Directiva también establece un **marco para la cooperación entre Estados Miembros para abordar la contaminación atmosférica transfronteriza (artículo 21)** y proteger la salud pública. De nuevo, la identificación oportuna de las superaciones, la investigación exhaustiva de las fuentes con la consiguiente elaboración de planes de acción coordinados tanto a corto como a largo plazo, con transparencia y participación pública, son elementos clave para el éxito de este enfoque. La cooperación con terceros países también se presenta como importante para abordar este problema de manera efectiva a nivel regional e internacional.

Como se ha mencionado anteriormente, los **requisitos de información que se deben incluir en los diferentes planes y hojas de ruta de calidad del aire** quedan más concretados en la nueva Directiva, dentro del **Anexo VIII**. El objetivo es que estos planes sean completos, transparentes y se basen en pruebas sólidas para alcanzar los objetivos de calidad del aire de manera efectiva. La **información** que se debe incluir se puede resumir en los siguientes puntos (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Información que se debe incluir en los planes y hojas de ruta de calidad del aire para la mejora de la calidad del aire ambiente, en virtud del apartado 5 del artículo 19 según el ANEXO VIII de la Directiva (UE) 2024/2881.

1. Localización precisa del problema:	Se debe identificar la región, las ciudades afectadas y los puntos de muestreo específicos donde se ha detectado el exceso de contaminación.
2. Información general del área afectada:	Se debe indicar el tipo de zona (urbana, industrial o rural) y estimar la superficie contaminada. También es necesario estimar la población expuesta a la contaminación atmosférica en la zona. Se deben incluir las concentraciones medias del contaminante durante al menos 5 años antes de la superación de los límites establecidos. Es importante comparar estas concentraciones con los valores límite y objetivos de calidad del aire para comprender la gravedad del problema.

3. Autoridades responsables:	Se deben identificar las autoridades competentes para la elaboración y aplicación de los planes de calidad del aire. Es necesario incluir los nombres y direcciones de estas entidades para facilitar el contacto y la colaboración.
4. Origen de la contaminación:	Se debe realizar una lista de las principales fuentes de emisión que causan la contaminación en la zona. Para cada fuente de emisión, se debe indicar la cantidad total de emisiones generadas. Es importante evaluar el nivel de las emisiones (local, regional o nacional) para comprender el alcance del problema. Se debe distribuir las fuentes de emisión por sectores según el programa nacional de control de la contaminación atmosférica.
5. Escenario sin medidas de reducción:	Se debe presentar un escenario hipotético en el que no se toman medidas para reducir la contaminación. En este escenario, se debe estimar la evolución prevista de las emisiones y concentraciones de contaminantes en el tiempo.
6. Identificación y detalles de las medidas de reducción:	Se debe realizar una lista exhaustiva de todas las medidas consideradas para reducir la contaminación atmosférica. Para cada medida, se debe incluir una descripción detallada de su funcionamiento. Es importante indicar la autoridad responsable de la implementación de cada medida. Se debe cuantificar la reducción de emisiones y, cuando sea posible, la reducción de las concentraciones que se espera lograr con cada medida.
7. Medidas seleccionadas y su impacto previsto:	Se debe presentar una lista de las medidas seleccionadas para ser implementadas (incluida una lista de información, como los resultados de la modelización y la evaluación de las medidas). Para cada medida seleccionada, se debe incluir un calendario de aplicación detallado. Es necesario identificar los agentes responsables de la implementación de cada medida. Se debe cuantificar la reducción total de emisiones que se espera lograr con la implementación de todas las medidas. Se debe estimar la reducción de las concentraciones de contaminantes en cada punto de muestreo. Se debe presentar una trayectoria hacia el cumplimiento de los objetivos de calidad del aire, incluyendo el año estimado de cumplimiento. Es importante explicar cómo los planes minimizan el período de superación de los límites establecidos.
8. Información de soporte:	<ul style="list-style-type: none"> • Se deben incluir datos climáticos de la zona, como la temperatura, precipitación y humedad. También se deben incluir datos topográficos, como la altitud y el relieve del terreno. • Es importante incluir información sobre el tipo de objetivos que se requieren proteger en la zona, como la salud humana, los ecosistemas o los monumentos históricos. • Se debe presentar un listado y descripción de todas las medidas adicionales que se podrían implementar a largo plazo. • Es necesario incluir información socioeconómica de la zona para promover la equidad ambiental y proteger a los grupos vulnerables. • Se debe realizar una descripción del método, supuestos y datos utilizados para las proyecciones de calidad del aire. • Es importante incluir el margen de incertidumbre de las proyecciones y escenarios de sensibilidad para considerar diferentes hipótesis.
9. Resumen de las medidas de información y consulta pública.	
10. Evaluación de las medidas (en caso de actualización):	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación del calendario de medidas del plan anterior. • Estimación del impacto de las medidas anteriores.

Este anexo también incluye una **lista indicativa de las medidas de reducción de la contaminación atmosférica**, recogidas en los siguientes puntos (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Medidas de reducción de la contaminación atmosférica (ANEXO VIII – B de la Directiva (UE) 2024/2881).

1. Aplicación de las Directivas de la UE:	Asegurar el cumplimiento de las Directivas de la UE pertinentes sobre calidad del aire.
2. Reducción de emisiones de fuentes estacionarias:	<ul style="list-style-type: none"> • Controlar y reducir las emisiones de fuentes fijas de combustión contaminantes (incluidas las de biomasa). • Mejorar la eficiencia energética de edificios.
3. Reducción de emisiones del transporte:	<p>a) Vehículos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Implementar la sustitución de vehículos contaminantes por modelos con cadenas cinemáticas de cero emisiones o la adaptación posterior equipándolos con sistemas de control de emisiones avanzados. • Utilizar incentivos económicos para vehículos de bajas emisiones. • Reducción de emisiones mediante el uso de vehículos de transporte público y colectivo sin emisiones o de bajas emisiones, y vehículos con soluciones digitales modernas que disminuyan las emisiones.

	<ul style="list-style-type: none"> • Adquirir vehículos de bajas emisiones para las administraciones públicas. <p>b) Planificación urbana y gestión del tráfico:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tarificación: Implementar peajes urbanos, tasas por kilometraje y tarifas de aparcamiento diferenciadas para vehículos contaminantes y de bajas emisiones. • Restricciones de acceso: Establecer zonas de bajas emisiones, zonas de cero emisiones, barrios/calles sin coches y supermanzanas. • Fomento de la movilidad alternativa: Incentivar el uso compartido del coche, la bicicleta, los desplazamientos a pie y el transporte público. Crear centros intermodales que conecten diferentes soluciones de transporte sostenible y aparcamientos. • Planificación urbana compacta: Diseñar ciudades compactas y priorizar el transporte público en la planificación urbana. • Otras medidas: Utilizar materiales de carretera sostenibles. Implementar acuerdos de reparto de último kilómetro sin emisiones. Implantar sistemas de transporte inteligentes.
4. Cambio modal hacia la movilidad activa y formas de transporte menos contaminantes:	<ul style="list-style-type: none"> • Electrificar y reforzar el transporte público y simplificar el acceso y uso. • Garantizar la intermodalidad entre diferentes modos de transporte para los desplazamientos entre zonas rurales y urbanas, por ejemplo, entre los automóviles y el transporte público (sistemas de aparcamientos estratégicos). • Reorientar los incentivos hacia la movilidad activa y compartida. • Implementar planes de desguace para vehículos contaminantes.
5. Fomento de vehículos y maquinaria no de carretera con emisiones cero.	
6. Priorización de combustibles de bajas emisiones en fuentes fijas y móviles	
7. Reducción de la contaminación industrial:	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar medidas para reducir la contaminación industrial según directiva 2010/75/UE. • Utilizar instrumentos económicos para incentivar la reducción de emisiones. • Considerar las especificidades de las PYME.
8. Reducción de las emisiones del transporte marítimo y aéreo:	<ul style="list-style-type: none"> • Promover combustibles alternativos e infraestructuras para combustibles alternativos. • Utilizar incentivos económicos para combustibles alternativos. • Establecer requisitos específicos para las emisiones de buques y embarcaciones. • Acelerar la electrificación de buques y maquinaria portuaria.
9. Reducción de las emisiones procedentes de la agricultura.	
10. Protección de la salud de grupos vulnerables.	
11. Fomento de cambios de comportamiento:	Implementar campañas de sensibilización y educación para fomentar cambios de comportamiento.

Además, en el anexo IX se especifican medidas de emergencia a tener en cuenta para su inclusión en los PACP requeridos por el artículo 20. Entre las medidas a considerar a corto plazo para abordar las fuentes que contribuyen al riesgo de superar el umbral de alerta, dependiendo de las circunstancias locales y del contaminante estarían:

- Restricción de la circulación de vehículos, especialmente alrededor de lugares frecuentados por población sensible y grupos vulnerables.
- Transporte público a bajo costo o gratuito.
- Suspensión de las operaciones en las obras de construcción.
- Limpieza de calles.
- Flexibilización de los horarios de trabajo.



5. PRÓRROGAS – APLAZAMIENTOS EN LA DIRECTIVA (UE) 2024/2881

En el artículo 18 de la Directiva se describe la posibilidad de solicitar una **prórroga de los plazos de cumplimiento y exención de la obligación de aplicar ciertos valores límite y objetivo, por un período** justificado por una **Hoja de Ruta de Calidad del Aire**, en una zona determinada, cuando no puedan respetarse los valores límite de PM10, PM2.5, NO₂, C₆H₆ y/o B(a)P:

- **Hasta el 1 de enero de 2035**, si así lo justifican unas proyecciones que demuestren que, incluso teniendo en cuenta el impacto previsto de las medidas eficaces contra la contaminación atmosférica identificadas en la Hoja de Ruta de Calidad del Aire, los valores límite no pueden alcanzarse dentro del plazo de cumplimiento.
- **Hasta el 1 de enero de 2040**, por las características de dispersión específicas propias del lugar, las condiciones de los límites orográficos, las condiciones climáticas adversas, las contribuciones transfronterizas, o cuando las reducciones necesarias solo puedan lograrse sustituyendo una parte considerable de los sistemas de calefacción doméstica existentes que son la fuente de contaminación que causa la superación.

Para poder solicitar esta prórroga los Estados Miembros deben presentar la solicitud debidamente justificada y acompañada de un plan detallado u hoja de ruta que demuestre cómo se alcanzará el cumplimiento al finalizar la prórroga. El **plazo** para presentar esta **solicitud** debe realizarse **antes de 31 de enero de 2029**.

Para que los Estados Miembros puedan prorrogar un plazo de cumplimiento han de cumplirse las siguientes **condiciones**:

- **Establecer**, a más tardar el 31 de diciembre de 2028, una **Hoja de Ruta de Calidad del Aire** que debe incluir medidas efectivas que garanticen la mejora continua de la calidad del aire durante el período de prórroga, y debe abordar las razones por las cuales no se prevé cumplir con los valores límite dentro del plazo original y proporcionar un calendario claro para alcanzar los objetivos. La Hoja de Ruta, además, tiene que cumplir con los siguientes requisitos:
 - Incluir la información que figura en la letra A, puntos 1 a 7, del anexo VIII (información del exceso de contaminación, tipos de zona, estimación superficie contaminada y de la población expuesta, evaluación de las concentraciones de los últimos 5 años, autoridades responsables, origen contaminación, descripción del escenario base, descripción de las medidas, cuantificación reducción emisiones...).
 - Ir acompañada de la **información** sobre **medidas** de reducción de la contaminación atmosférica que figuran en la letra B del anexo VIII y demuestre cómo los períodos de superación de los valores límite serán lo más breves posible.
 - Estar respaldada por **proyecciones** (modelización) de calidad del aire, que muestren cómo se alcanzarán los valores límite lo antes posible y a más tardar al final del plazo de cumplimiento prorrogado, teniendo en cuenta medidas razonables y proporcionadas.
 - Describir cómo se **informará al público** y, en particular, a la población sensible y a los grupos vulnerables, de manera coherente y fácil de entender, de las consecuencias de la prórroga para la salud humana y el medio ambiente.



- Describir cómo se movilizará **financiación adicional**, también a través de los programas nacionales pertinentes y, en su caso, de programas de financiación de la Unión, a fin de acelerar la mejora de la calidad del aire en la zona a la que vaya a aplicarse la prórroga.
- **Demostrar**, cuando se prorogue un plazo de cumplimiento, que la primera Hoja de Ruta de Calidad del Aire actualizada **se ha aplicado** o que se han tomado medidas con vistas a su aplicación y se debe complementar con un análisis que demuestre que no se han materializado las previsiones originales de cumplimiento.

La Comisión evaluará la Hoja de Ruta presentada por el Estado Miembro y decidirá sobre la concesión de la prórroga. La aprobación se basará en la viabilidad de las medidas propuestas y su capacidad para lograr el cumplimiento al final del período de prórroga.

Durante el período de prórroga, el Estado miembro velará por que se cumplan las siguientes condiciones:

- Que se **están aplicando las medidas** de la Hoja de Ruta de Calidad del Aire actualizada, demostrable mediante un informe de ejecución con previsiones actualizadas de las emisiones, y, cuando sea posible, de las concentraciones, que se facilitará a la Comisión cada dos años y medio y, por primera vez, a más tardar el 30 de junio de 2031 y que demuestre el progreso hacia el cumplimiento de los valores límite. Este informe permite a la Comisión supervisar la implementación de las medidas y la efectividad del plan. Por su parte, la Comisión puede revisar el progreso de los Estados Miembros y, si es necesario, requerir ajustes en las medidas implementadas o en el plan general para asegurar que se logren los objetivos de calidad del aire.
- Que la Hoja de Ruta de Calidad del Aire se actualice de conformidad con el artículo 19, apartado 5.
- Que, a partir del 1 de enero de 2035, los niveles de concentración del contaminante en cuestión muestren una **tendencia general a la baja** en consonancia con una trayectoria indicativa hacia el cumplimiento estimada en una Hoja de Ruta de Calidad del Aire actualizada.
- Que los informes de ejecución y las Hojas de Ruta de Calidad del Aire actualizadas se **comuniquen** a la Comisión en un plazo de dos meses a partir de su adopción.

La prórroga puede ser concedida por un período limitado, dependiendo de la evaluación de la Comisión sobre la necesidad y la justificación presentada por el Estado Miembro.

Cuando se haya prorrogado un plazo de cumplimiento, en el supuesto de que las proyecciones de calidad del aire hayan demostrado que no pueden cumplirse los valores en el año de cumplimiento, los Estados Miembros podrán **prorrogar** el plazo para esa zona concreta por **segunda y última vez** por un período **máximo de dos años** a partir del final del primer período de prórroga y que esté justificado por una Hoja de Ruta de Calidad del Aire actualizada. Para ello, los Estados Miembros notificarán a la Comisión, a más tardar el 31 de enero de 2034, los supuestos en los que no pueda alcanzarse el cumplimiento dentro del plazo prorrogado (justificando los métodos y los datos utilizados para obtener dichas previsiones), y le transmitirán la Hoja de Ruta de Calidad del Aire actualizada con toda la información necesaria para que la Comisión evalúe si se cumplen el motivo aducido para la segunda prórroga.

Esta Directiva, establece un marco detallado para que los Estados Miembros soliciten y obtengan prórrogas para el cumplimiento de determinados valores límite de calidad del aire, garantizando

que las medidas necesarias se implementen de manera efectiva y que el objetivo final de mejorar la calidad del aire se logre dentro del nuevo plazo establecido. Pero también asegura que las prórrogas no se utilicen para retrasar indefinidamente el cumplimiento, sino que proporcionen un marco temporal adicional para implementar medidas efectivas que conduzcan a un aire más limpio y seguro para la población.

6. RECOMENDACIONES ADICIONALES SOBRE PLANES DE CALIDAD DEL AIRE

Este apartado complementa las directrices sobre PMCA y PACP de la Directiva (UE) 2024/2881 con recomendaciones adicionales para la elaboración, implementación y evaluación de estos programas. Además, se abordan otros aspectos relevantes relacionados con la aplicación de medidas para la mejora de la calidad del aire. En el capítulo 7 de esta guía se detallan recomendaciones para medidas de actuaciones sobre diferentes sectores y contaminantes.

- En primer lugar, es recomendable que las medidas a aplicar en el plan se evalúen independientemente aplicando el modelo COM-B (*Capability, Opportunity, Motivation - Capacidad, Oportunidad, Motivación* -, Michie et al., 2011). Este modelo ofrece un marco útil para analizar las barreras y facilitadores que influyen en la adopción de comportamientos que contribuyan a la mejora de la calidad del aire. Una medida puede estar muy bien resuelta a nivel técnico y ser eficaz en su propósito, pero fracasar por falta de convencimiento de la población y de posibilidades de la misma para aplicarla y/o falta de fondos para hacerla posible. Al comprender estos factores, se pueden diseñar PMCA con mayores posibilidades de éxito y aceptación que promuevan un cambio positivo y duradero. La información sobre esta herramienta está desarrollada en la sección 7. De manera muy breve, se fundamenta en los siguientes puntos:
 - **Capacidad:** Estar seguros de que se han aplicado medidas adicionales y paralelas para que la población afectada pueda llevarlas a cabo. Son ejemplos, el desarrollo de planes *renove* para calderas y coches, la gratuidad de peajes urbanos para vehículos con más de dos ocupantes, o los *chips* con GPS que permiten circular unos centenares de kilómetros en una ZBE a ciudadanos que necesitan el vehículo para moverse y no tienen medios para cambiarlos, o la oferta de un transporte público metropolitano, rápido, económico y cómodo.
 - **Oportunidad:** Aprovechar oportunidades para dar mucha más fuerza a unas determinadas medidas o utilizar fondos accesibles para ello. Son ejemplos la necesidad de reducir contaminación por la entrada en vigor da la nueva Directiva de Calidad del Aire, por el rediseño urbano de una zona de la ciudad, o por la llegada de Fondos *Next Generation* u otros que puedan ayudar a aplicar medidas.
 - **Motivación/Convencimiento:** Divulgar el problema de la calidad del aire, la necesidad de aplicar una medida y los beneficios a obtener, e impacto de la no actuación, involucrar a la ciudadanía en la toma de decisiones, e informar a posteriori de los beneficios que se han alcanzado al aplicar dicha medida para retroalimentar la motivación.
- Un PMCA eficaz no debe limitarse a una simple enumeración de medidas y acciones, sino que debe demostrar de manera contundente que su implementación conducirá al cumplimiento de los objetivos establecidos en la fecha prevista. La nueva Directiva exige explícitamente incluir en la elaboración del PMCA la modelización para una demostración clara de que las medidas y acciones propuestas son capaces de alcanzar los objetivos normativos para los cuales se desarrolla el plan (Tabla 4.2 de esta guía, anexo VIII-B de la nueva Directiva). Además, cabe mencionar que la nueva Directiva establece en su artículo 8.3 sobre criterios de evaluación que, **a partir de dos años después de la adopción del acto de ejecución**, se deben utilizar aplicaciones

de modelización o mediciones indicativas adicionalmente a las mediciones fijas para evaluar la calidad del aire ambiente en todas las zonas donde el nivel de contaminantes supere un valor límite pertinente o un valor objetivo establecido en el Anexo 1.

- Es preciso que los PMCA estén articulados e integrados con los Planes de Actuación para Combatir el Cambio Climático y con los del Ruido. Se aconseja que las medidas de estos tres tipos de planes sean evaluadas por los dos ámbitos diferentes a los que han generado el plan. Aunque muchas medidas pueden tener un efecto positivo en los tres (ejemplo, electrificación de vehículos), otras pueden tener un impacto negativo en algunos de los otros dos ámbitos (ejemplos, impulso a la quema de biomasa doméstica con fines climáticos, pero sin una legislación paralela para reducir sus emisiones de contaminantes de la calidad del aire, o apoyo al vehículo Diesel con menos emisiones de CO₂, pero más de NO₂ y PM, hasta EURO 6d).
- En las ciudades de gran y mediano tamaño, el problema de la calidad del aire generado por la movilidad no se limita a los límites urbanos, sino que adquiere una dimensión metropolitana. La movilidad en estas urbes presenta un patrón cíclico con un "sístole" de tráfico vehicular que ingresa a la ciudad durante las mañanas y un "diástole" de salida en las tardes. Esta dinámica involucra tanto a los vehículos que circulan dentro de la ciudad como a aquellos que provienen de áreas circundantes. Debido a esta naturaleza metropolitana del problema, resulta fundamental desarrollar PMCA y PACP que abarquen el área metropolitana en su totalidad, en lugar de enfocarse únicamente en la ciudad central. Un enfoque metropolitano permitirá abordar de manera integral las emisiones generadas por el tráfico vehicular, tanto dentro como fuera de los límites urbanos, garantizando una gestión más efectiva de la calidad del aire en toda la región.
- Considerando que aproximadamente el 70% del PM2.5 es secundario en origen (formación a partir de gases precursores a escala regional), los PMCA y los PACP enfocados en PM2.5 y PM10 deben tener un alcance regional. Diferentes contaminantes requieren de una aproximación y escala de medidas diferente que deben ser evaluadas en detalles. Para ello, la mejor integración entre el PNMCA, y los PMCAs a nivel regional, metropolitano y urbano es necesaria. Incluso, para algunos contaminantes, como PM y O₃ un PMCA único es aconsejable a escala regional/provincial/metropolitano y nacional, respectivamente, con obligatoriedad de aplicación de medidas asignadas a las diferentes administraciones implicadas. Sin embargo, para NO₂ las medidas recaen esencialmente en el ámbito local/metropolitano, aunque las medidas pueden ir acompañadas por planes *renove* a nivel nacional pero focalizados en zonas con problemas de calidad del aire.
- Es recomendable aplicar PACP cuando se prevean episodios intensos de aporte de partículas de polvo africano o determinadas poblaciones se vean afectadas por la contaminación de incendios, tal como indican las Guías de la OMS (2021).
- En las tablas de la nueva Directiva no se contemplan medidas sobre la distribución urbana de mercancías, ni construcción/demolición, y estas fuentes pueden ser muy relevantes y deben ser afectadas por PMCA para algunos contaminantes. Estas, con las del tráfico y la industria se tratarán en el capítulo 9 de esta guía.
- En algunos entornos urbanos de España de tamaño medio-pequeño, el problema de calidad del aire puede ser producido por la quema de biomasa doméstica y agrícola, y ello debe incorporarse en los planes.



7. SANCIONAMIENTO Y DEMANDAS

7.1 RD 102/2011

En el RD 102/2011 se establece el régimen sancionador (Capítulo VI, Artículo 29) según lo previsto en la Ley 34/2007 de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera, en la Ley 14/1986 General de Sanidad y en la Ley 16/2002 de Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Sin embargo, la Ley 16/2002 está derogada actualmente por el RD Legislativo 1/2016 por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Prevención y Control Integrados de la Contaminación integrando así en un texto único las sucesivas modificaciones introducidas en la Ley 16/2002 y que da continuidad al RD 815/2013 del Reglamento de Emisiones Industriales y de Desarrollo de la Ley 16/2002.

En primer lugar, se hace una tipificación del tipo de sanciones que pueden ocasionarse (Tabla 7.1), y a continuación se detallan las medidas y cuantías aplicables en caso de producirse alguna infracción (Tabla 7.2).

Respecto a la imposición de las sanciones se establece que se debe guardar una debida adecuación entre la gravedad de la infracción y la sanción aplicada, y se ha de tener en cuenta:

- Si hay intencionalidad, reiteración o reincidencia.
- Cuáles son los daños causados al medio ambiente y/o la salud de las personas o el peligro creado para la seguridad de las mismas.
- El beneficio obtenido por la comisión de la infracción.

Cuando se haya iniciado un procedimiento sancionador, el órgano competente para imponer la sanción podrá acordar, entre otras, alguna o algunas de las siguientes medidas provisionales, como:

- Designar medidas de corrección, seguridad o control que impidan la continuidad en la producción del riesgo o del daño.
- Ordenar el precintado de aparatos o equipos.
- Clausurar o parar temporal, parcial o totalmente las instalaciones.
- Suspender temporalmente la autorización para el ejercicio de la actividad.

Sin perjuicio de la sanción que se imponga (sea penal o administrativa), el infractor está obligado a la **reposición o restauración** de las cosas al estado anterior a la infracción cometida, así como a abonar la correspondiente indemnización por los daños y perjuicios causados, que en el caso de afectar a las Administraciones Públicas se determinará y recaudará por vía administrativa. En caso de no cumplir, se impondrían multas coercitivas por el importe que determine la normativa autonómica, cuya cuantía no superará un tercio de la multa prevista para el tipo de infracción cometida.



Tabla 7.1. Tipificación de las infracciones recogidas en el RD 102/2011 (en negro) y en el RDL 1/2016 (en azul).

Infracciones muy graves	<p>Aquellas que hayan puesto en peligro grave la seguridad o salud de las personas o haya producido un daño o deterioro grave para el medio ambiente.</p> <p>Incumplir las obligaciones derivadas de las medidas provisionales previstas en el artículo 35 del RD Legislativo 1/2016 cuando suponga un peligro grave para la salud de las personas o el medio ambiente.</p> <p>Incumplir el régimen de autorización y notificación previsto en el artículo 13 de la Ley 34/2007 para las actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera.</p> <p>Incumplir las obligaciones específicas que hayan sido establecidas para productos que puedan generar contaminación atmosférica.</p> <p>Incumplir los valores límite de emisión.</p> <p>El incumplimiento de las condiciones establecidas en materia de contaminación atmosférica en la autorización o aprobación del proyecto sometido a evaluación de impacto ambiental o en los medios de intervención administrativa en la actividad de los ciudadanos establecidos para las actividades clasificadas.</p> <p>Incumplir los requisitos técnicos que le sean de aplicación a la actividad, instalación o producto.</p> <p>El incumplimiento de las medidas contempladas en los PACP a los que se refiere el artículo 16.2 de la Ley 34/2007.</p> <p>El incumplimiento de las medidas contempladas en los planes para la protección de la atmósfera y para minimizar los efectos negativos de la contaminación atmosférica.</p> <p>Ocultar o alterar maliciosamente la información exigida en los procedimientos regulados en la Ley 34/2007.</p> <p>Impedir, retrasar u obstruir la actividad de inspección o control.</p> <p>Incumplir las obligaciones previstas en el artículo 7.1.b) y d) de la Ley 34/2007.</p> <p>Incumplir las obligaciones derivadas de las medidas provisionales previstas en el artículo 35 de la ley 34/2007.</p> <p>Ejercer la actividad o llevar a cabo una modificación sustancial de la instalación sin la preceptiva autorización ambiental integrada, siempre que se haya producido un daño o deterioro grave para el medio ambiente o se haya puesto en peligro grave la seguridad o salud de las personas.</p> <p>Incumplir las condiciones establecidas en la autorización ambiental integrada (AAI), siempre que se haya producido un daño o deterioro grave para el medio ambiente o se haya puesto en peligro grave la seguridad o salud de las personas.</p>
Infracciones graves	<p>Aquellas que no estén tipificadas como infracción muy grave y, además:</p> <p>No cumplir las obligaciones relativas a las estaciones de medida de los niveles de contaminación y al registro de los controles de emisiones y niveles de contaminación a los que se refiere el artículo 7.2.b) y c) de la Ley 34/2007.</p> <p>No realizar controles de las emisiones y de la calidad del aire en la forma y periodicidad establecidas legalmente.</p> <p>Incumplir las obligaciones en materia de información a las que se refiere el artículo 7.1.h) de la Ley 34/2007, cuando de ello pueda afectar significativamente al cumplimiento, por parte de las Administraciones públicas, de sus obligaciones de información.</p> <p>Transmitir la titularidad de la AAI sin comunicarlo al órgano competente para otorgar la misma.</p> <p>No comunicar al órgano competente de la CCAA las modificaciones realizadas en la instalación, siempre que no revistan el carácter de sustanciales</p> <p>No informar inmediatamente al órgano competente de la CCAA de cualquier incumplimiento de las condiciones de la AAI, así como de los incidentes o accidentes que afecten de forma significativa al medio ambiente.</p> <p>Impedir, retrasar u obstruir la actividad de inspección o control.</p> <p>Ejercer la actividad incumpliendo las obligaciones fijadas en las normas adicionales de protección que hayan dictado las CCAA, cuando hayan establecido la exigencia de notificación y registro, siempre que se haya producido un daño o deterioro para el medio ambiente o se haya puesto en peligro la seguridad o salud de las personas</p> <p>Proceder al cierre definitivo de una instalación incumpliendo las condiciones establecidas en la AAI relativas a la contaminación del suelo y las aguas subterráneas.</p>
Infracciones leves	<p>Aquellas no tipificadas como graves y, además:</p> <p>Incumplir los requisitos técnicos que le sean de aplicación a la actividad, instalación o producto-</p> <p>Ocultar o alterar maliciosamente la información exigida en los procedimientos regulados en esta ley, cuando ello no esté tipificado como infracción grave.</p> <p>Incumplir las obligaciones en materia de información a las que se refiere el artículo 7.1.h) de la Ley 34/2007, cuando ello no esté tipificado como infracción grave.</p> <p>El incumplimiento de las prescripciones establecidas en el RDL 1/2016 o en las normas aprobadas conforme a la misma, cuando no esté tipificado como infracción muy grave o grave.</p>

Tabla 7.2. Sancionamiento aplicado en caso de incumplimiento del RD102/2011 y en el [RDL 1/2016](#).

Infracción muy grave	Multa desde 200.001 hasta 2.000.000 de euros. Prohibición o clausura definitiva, total o parcial de las actividades e instalaciones. Prohibición o clausura temporal, total o parcial de las actividades o instalaciones por un periodo no inferior a dos años ni superior a cinco. El precintado de equipos, máquinas y productos, por un periodo no inferior a dos años. Inhabilitación para el ejercicio de la actividad por un periodo no inferior a un año ni superior a cinco. Extinción, o suspensión de las autorizaciones en las que se hayan establecido condiciones relativas a la contaminación atmosférica por un tiempo no inferior a dos años. Publicación a través de los medios que se consideren oportunos, de las sanciones impuestas, una vez que estas hayan adquirido firmeza en vía administrativa o, en su caso jurisdiccional, así como los nombres, apellidos o denominación o razón social de las personas físicas o jurídicas responsables y la índole y naturaleza de las infracciones.
Infracción grave	Multa desde 20.001 hasta 200.000 euros. Prohibición o clausura temporal, total o parcial , de las actividades o instalaciones por un periodo máximo de dos años. Inhabilitación para el ejercicio de la actividad por un periodo máximo de un año. El precintado temporal de equipos, máquinas y productos por un periodo máximo de dos años. Suspensión de las autorizaciones en las que se hayan establecido condiciones relativas a la contaminación atmosférica por un periodo máximo de dos años.
Infracción leve	Multa de hasta 20.000 euros. <i>Cuando la cuantía de la multa resultare inferior al beneficio obtenido por la comisión de la infracción, la sanción será aumentada, como máximo, hasta el doble del importe del beneficio obtenido por el infractor.</i>

7.2 Directiva (UE) 2024/2881 (Capítulo VII)

En la nueva Directiva se modifica el **artículo 29** para aclarar con más detalle cómo los Estados Miembros deben establecer **sanciones** efectivas, proporcionadas y disuasorias para quienes infrinjan las medidas adoptadas en el Estado Miembro destinadas a aplicar la nueva Directiva, incluidas sanciones financieras disuasorias, sin perjuicio de lo dispuesto en la Directiva 2008/99/CE relativa a la Protección del Medio Ambiente mediante el Derecho Penal, de tal forma que el régimen de sanciones aplicable a las infracciones de las disposiciones nacionales adoptadas en aplicación de la nueva Directiva serán las necesarias para garantizar su ejecución.

Por otro lado, las **multas** se calcularán de manera que sean eficaces, proporcionadas y disuasorias.

Además, los Estados Miembros velarán porque las sanciones tengan en cuenta las circunstancias siguientes:

- La naturaleza, gravedad, alcance, escala y duración de la infracción.
- El impacto sobre la población, incluida la población sensible y los grupos vulnerables, o sobre el medio ambiente afectados por la infracción, teniendo en cuenta el objetivo de alcanzar un nivel elevado de protección de la salud humana y del medio ambiente.
- El carácter repetitivo o singular de la infracción, incluida cualquier sanción previa de amonestación o sanción administrativa o penal.
- Los beneficios económicos derivados de la infracción por la persona física o jurídica considerada responsable, en la medida en que puedan determinarse.

Por otro lado, la nueva Directiva en su artículo 27 establece que los Estados Miembros garantizarán que el público interesado tenga **acceso a un procedimiento de recurso** ante un tribunal de justicia para **impugnar** la legalidad en relación con la ubicación y el número de puntos de muestreo, los PMCA, las hojas de ruta sobre calidad del aire y los PACP, siempre que, o bien tengan un interés suficiente, o bien que mantengan el menoscabo de un derecho. Los Estados Miembros determinarán qué constituye un interés suficiente y el menoscabo de un derecho de manera coherente con el objetivo de facilitar al público interesado un amplio acceso a la justicia.

En lo que respecta a la indemnización por daños a la salud humana (artículo 28), establece que los Estados Miembros velen por que las personas físicas que sufren daños en su salud causados por una infracción de las normas cometida de forma deliberada o por negligencia por las autoridades competentes, tengan **derecho a reclamar y obtener una indemnización** por dichos daños, de tal forma que las normas y procedimientos relativos a las reclamaciones de indemnización no hagan imposible o excesivamente difícil el ejercicio de este derecho.

8. CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO Y APLICACIÓN DE MEDIDAS CORRECTIVAS

Existen numerosos ejemplos de políticas que han obtenido buenos resultados en la reducción de la contaminación del aire (AIRUSE, 2018; NEXT, 2023).

La mayor parte de problemas de calidad del aire urbano vienen generadas por el **sector transporte rodado** (a escala metropolitana y urbana), especialmente para NO₂, PM y precursores de O₃. Sin embargo, **las obras de construcción/demolición, la industria y generación eléctrica, la agricultura y ganadería, y las zonas portuarias y aeropuertos** pueden contribuir de manera significativa a incrementar la contaminación atmosférica en determinadas zonas.

Respecto al estado de la calidad del aire en España en esta última década, tanto los informes de MITECO (2023a), como el de la Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (OficinaC, 2023, “Calidad del aire: avances y mejores prácticas”) indican que si bien existe un amplio consenso sobre la mejora generalizada de la calidad del aire que pone de relieve la **efectividad de las políticas públicas aplicadas**, estos avances no son suficientes para proteger la salud pública (y alcanzar los objetivos de las Guía de Calidad del Aire de la OMS, 2021).

La Figura 8.1 muestra la evaluación de algunos parámetros de calidad del aire en España para 2022 según MITECO (2023a). En ella se muestra el cumplimiento (verde) e incumplimiento (rojo) de los valores objetivo (VO) y límite (VL) de la normativa actual. Los resultados muestran la persistencia de problemas en el marco nacional para algunos parámetros, como las superaciones de los valores límite normativos de NO₂ y PM10 de forma local y, de forma mucho más extensiva, los objetivo de O₃ (Figura 8.1). Además, hay que tener en cuenta que los valores límite y objetivo de la nueva Directiva son mucho más estrictos y requerirán de esfuerzos importante para alcanzar su cumplimiento en 2030.

Para continuar mejorando la calidad del aire se requieren medidas más complejas y una mayor integración de políticas de diferentes escalas (europea, nacional, regional, y local), además de una mayor involucración de la ciudadanía. Así mismo, la experiencia en la elaboración y aplicación de PMCA muestra que además de elaborar medidas adecuadas y efectivas a nivel técnico es necesario tener en cuenta otros factores que permitan su aplicación sin rechazo de la ciudadanía y con medios para que se apliquen adecuadamente. Por todo ello en este capítulo, nos centramos sobre estos aspectos en el primer apartado, al cual siguen otros sobre recomendaciones sobre medidas para el tráfico rodado, construcción/demolición, industria y generación eléctrica, agricultura y ganadería, quema de biomasa doméstica, puertos y aeropuertos.



Figura 8.1 Resumen de la evaluación de la calidad del aire en España por contaminante en 2022 (arriba) y evolución de las zonas de calidad del aire respecto al VLA de PM2.5, PM10 y NO₂, y respecto al VO-salud de O₃ (2012-2022). Fuente: MITECO (2023a).

8.1. Factores a tener en cuenta en el diseño y aplicación de las medidas

El Modelo COM-B (Capacidad, Oportunidad, Motivación) se recomienda como una herramienta valiosa para diseñar e implementar intervenciones efectivas que mejoren la calidad del aire. Esta herramienta fue desarrollada por la Prof. Susan Michie (Michie et al., 2011), psiquiatra reconocida por sus contribuciones al campo de la ciencia del comportamiento y el desarrollo de herramientas para entender y cambiar el comportamiento humano. La Figura 8.2 resume las bases del modelo COM-B, cuyas ventajas desde el punto de vista del desarrollo de mejoras en calidad del aire son:

- **Enfoque centrado en las personas:** El modelo COM-B enfatiza la importancia de comprender las necesidades, motivaciones y barreras de los individuos y comunidades para diseñar intervenciones efectivas y sostenibles.
- **Enfoque holístico:** Los PMCA deben considerar una amplia gama de factores, incluyendo las emisiones industriales, el transporte, la calidad de la vivienda y los estilos de vida.
- **Enfoque participativo:** Es fundamental involucrar activamente a todos los actores relevantes en el proceso de desarrollo e implementación de los planes de mejora, fomentando la colaboración y el sentido de corresponsabilidad.
- **Comunicación efectiva:** La comunicación clara, transparente y accesible es esencial para informar a la ciudadanía sobre los problemas de la calidad del aire, las acciones que se están tomando y los resultados obtenidos.

A continuación, se presenta una descripción más detallada de cada concepto y ejemplos específicos de cómo se pueden aplicar en el contexto de la mejora de la calidad del aire. Algunos ejemplos en literatura se pueden encontrar en Kureshi et al. (2023) y McCarron et al. (2024).

Capacidad (C)

La capacidad se refiere a los recursos y habilidades que las personas, comunidades e instituciones necesitan para adoptar comportamientos que contribuyan a mejorar la calidad del aire. Esto incluye:

- Comprensión de la problemática de la contaminación del aire, sus causas, efectos y las acciones que se pueden tomar para reducirla.
- Capacidad para realizar acciones que reduzcan la contaminación del aire, como utilizar el transporte público o realizar un mantenimiento adecuado de los vehículos.
- Confianza en la propia capacidad para tener un impacto positivo en la calidad del aire.
- Disponibilidad de recursos económicos, tecnológicos y de infraestructura para adoptar comportamientos ecológicos. No solo se refiere a subvenciones, sino por ejemplo a tener acceso a un transporte REC (rápido económico y confortable).

Algunos ejemplos de cómo desarrollar esta capacidad son:

- Programas de capacitación y formación.
- Desarrollo de infraestructura sostenible.
- Programas de incentivos y subsidios.
- Eliminar o reducir las barreras económicas que dificultan la adopción de determinadas medidas para los grupos de bajos ingresos. Un ejemplo ilustrativo sería la implantación de chips en coches contaminantes para exentar de determinadas restricciones a usuarios sin posibilidad de renovar el coche, como se hace en la ZBE de Milán, por un coste anual de 30€ y que permite circular 300 km dentro de ella con vehículos afectados por las restricciones, y que han demostrado que no tienen medios para cambiar el vehículo.

Oportunidad (O)

La oportunidad se refiere al entorno social, físico y político que facilita o dificulta la adopción de comportamientos que contribuyan a mejorar la calidad del aire. Esto incluye:

- Fondos globales recibidos que puedan utilizarse (como *Next Generation*) para tales fines.

- Disponibilidad de opciones ecológicas: Acceso a transporte público, energía limpia, productos ecológicos y servicios ambientales.
- Entorno normativo y regulatorio: Existencia de leyes, políticas y regulaciones que promuevan la calidad del aire y desincentiven prácticas contaminantes.
- Implantación o revisión de nueva legislación que requiera actuaciones.
- Normas sociales.
- Participación comunitaria.

Ejemplos de cómo crear oportunidades:

- Fomentar la disponibilidad de productos y servicios sostenibles.
- Crear un entorno social y físico que respalde comportamientos ecológicos, como incentivos fiscales para vehículos no contaminantes, campañas de sensibilización y espacios verdes accesibles. Ejemplos de este respaldo serían los Fondos *Next Generation*.
- Implementación de políticas públicas, como la continua revisión de las normativas europeas.

Motivación (M)

La motivación se refiere a los factores que impulsan a las personas, comunidades e instituciones a adoptar comportamientos que contribuyan a mejorar la calidad del aire. Esto incluye:

- Motivación intrínseca: El deseo de actuar por razones personales, como la satisfacción de contribuir a la protección del medio ambiente para las generaciones futuras.
- Motivación extrínseca: El deseo de actuar por razones externas, como obtener recompensas económicas, reconocimiento social o evitar sanciones.
- Preocupación por la salud.
- Valores ambientales.
- Sentido de comunidad.

Es importante que no solo es conveniente realizar actuaciones para motivar al cambio de comportamiento/actuación, sino que se debe informar a posteriori de los beneficios conseguidos con el cambio, para así retroalimentar la motivación de forma positiva.

Ejemplos de cómo motivar a las personas:

- Comunicar los beneficios de mejorar la calidad del aire de manera clara, convincente y personalizada.
- Compartir historias de personas, comunidades o empresas que han logrado reducir la contaminación del aire y mejorar su calidad de vida.
- Participación ciudadana.
- Reconocimiento y recompensas.

Es muy importante que a la hora de diseñar y antes de aplicar una medida, se evalúe esta según el modelo COM-B, ya que actuaciones o medidas con un sólido contenido técnico y claramente beneficiosas para la calidad del aire, pueden fracasar en su aplicación por no cumplir alguno de los 3 factores de COM-B.

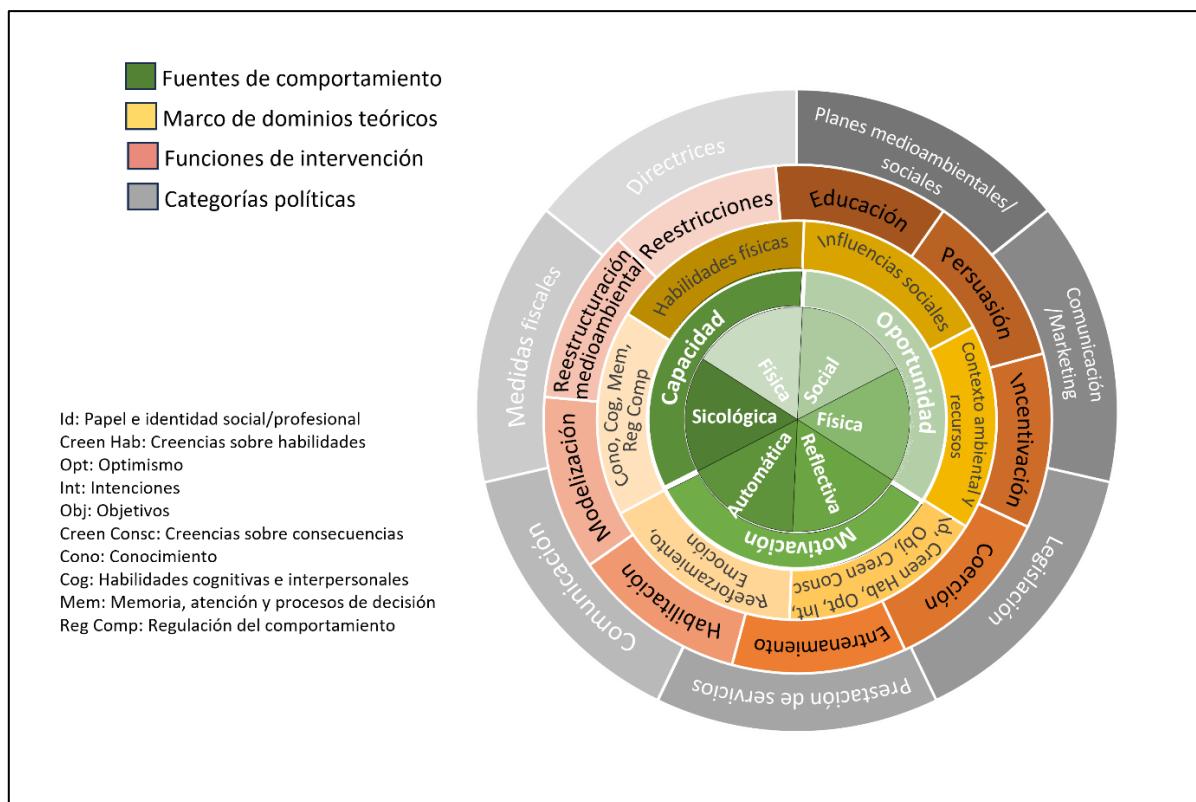


Figura 8.2. Bases del modelo COM-B, adaptada de la figura publicada en Michie et al. (2011).

8.2. Sistemas de gestión ambiental

Además, se recomienda para todos los sectores en los que sea factible, la acreditación de la implementación de **sistemas de gestión medioambiental** (SGA), como por ejemplo la **ISO 14.001:2015/Amd 1:2024** (Sistemas de gestión medioambiental. Enmienda 1: Cambios en la acción por el clima) o **EMAS** (*Eco-Management and Audit Scheme*, EMAS 2009), cuyo propósito es “proporcionar a las organizaciones un marco de referencia para proteger el medio ambiente y responder a las condiciones ambientales cambiantes, en equilibrio con las necesidades socioeconómicas”, mediante:

- Protección del medio ambiente (prevención o mitigación de impactos ambientales adversos).
- Mitigación de efectos potencialmente adversos de las condiciones ambientales sobre la organización.
- Apoyo a la organización en el cumplimiento de los requisitos legales y otros requisitos.
- Mejora del desempeño ambiental.
- Control sobre la forma en la que la organización diseña, fabrica, distribuye, consume y lleva a cabo la disposición final de productos o servicios, usando una perspectiva de ciclo de vida.
- Logro de beneficios financieros y operacionales que puedan ser el resultado de implementar alternativas ambientales respetuosas.
- Comunicación de la información ambiental a las partes interesadas pertinentes.

La base para el enfoque que subyace a un SGA se fundamenta en el concepto de **Planificar, Hacer, Verificar y Actuar (PHVA)** (Figura 8.3).

- Planificar: establecer los objetivos ambientales y los procesos necesarios para generar y proporcionar resultados de acuerdo con la política ambiental de la organización.
- Hacer: implementar los procesos según lo planificado.
- Verificar: hacer el seguimiento, medir los procesos (política ambiental, compromisos, objetivos ambientales y criterios operacionales), e informar de sus resultados.
- Actuar: emprender acciones para la **mejorar continua**.



Figura 8.3. Relación entre el modelo PHVA y el marco de referencia en esta Norma Internacional (ISO 14001:2015)

Por otro lado, el Reglamento EMAS establece requisitos adicionales a la norma ISO 14000 y lo convierten en un SGA más exigente, por lo que supone una ayuda a las organizaciones a contribuir, entre otros aspectos, al desarrollo de una **Economía Circular**, ya que:

- Obliga a establecer unos indicadores de comportamiento ambiental para analizar y medir el uso eficiente de los recursos, desde una perspectiva de ciclo de vida.
- Permite asegurar el cumplimiento legal y anticiparse a la aprobación de nuevos requisitos de carácter ambiental.
- Requiere obligatoriamente la implicación de los empleados, haciéndoles conscientes de la importancia de su participación en el sistema de gestión.
- La Declaración Ambiental validada por un verificador independiente y acreditado ayuda a la organización a poner en valor el esfuerzo derivado de la implantación de un SGA, y supone un ejercicio de transparencia.
- Supone un motor para la innovación ya que, al promover la mejora continua, la organización tiene que investigar nuevos objetivos de reducción de consumos, cambios en los procesos, búsqueda de materiales menos contaminantes, etc.

8.3. Tipos de medidas

Respecto a la **aplicación de medidas**, las que aquí se proponen para **reducir la emisión de contaminantes** se pueden catalogar en los tipos siguientes:

- Medidas **estructurales** para reducir las emisiones a lo largo del año.
- Medidas **episódicas** para reducir emisiones durante episodios de contaminación.

Las **medidas estructurales** son las de mayor eficacia, y se aplican indefinidamente, de manera que siempre están en vigor. Las medidas estructurales tienen que ser sobre las fuentes de emisión propias de la zona como, por ejemplo:

- Quema de biomasa, doméstica, agrícola e industrial.
- Emisiones de amoníaco del sector agropecuario.
- Obras de construcción/demolición públicas y privadas.
- Emisiones industriales.
- Emisiones del transporte rodado.
- Emisiones portuarias y aeroportuarias.

Por otro lado, es necesario que estas medidas vayan acompañadas de la aplicación de políticas y ayudas específicas para las poblaciones donde se apliquen y sus poblaciones vecinas.

Estas medidas serán tratadas con detalle en las siguientes secciones de esta guía.

Las **medidas episódicas** son aquellas diseñadas para reducir la contaminación en episodios de breve duración, e incluyen también medidas para concienciar a la población del problema de la mala calidad del aire y para sugerir protección en la población más vulnerable en episodios agudos.

Existe un Plan Marco de MITECO para los protocolos de medidas episódicas (MITECO 2023b) que debe seguirse en la elaboración de PACP. Algunas de estas medidas episódicas son:

- **Declaración de episodios de contaminación y medidas asociadas.**
 - Diseñar y aplicar episodios de corto plazo para un contaminante, cuando se supere el umbral diario del mismo, y haya previsión de continuar condiciones meteorológicas desfavorables para dispersar contaminantes, independientemente de que si ocurre a final de semana se prevean que las emisiones van a reducirse durante el fin de semana. Por ejemplo, en el caso de que el problema de contaminación fuera un incremento elevado de PM10 o PM2.5, las acciones a aplicar serían:
 - Difundir entre la población la ocurrencia del episodio de contaminación y dar consejos en la población más vulnerable para protegerse (no hacer deporte al aire libre, uso de mascarilla, entre otros)
 - Parar actividades de obras de construcción que emitan polvo o aplicar medidas de aspersión u otros para reducir las emisiones.
 - Reducir al máximo posible el uso de calefacciones con biomasa.
 - Prohibir actividades que den lugar a emisiones de NH₃, como por ejemplo manipulación o utilización de purines para fertilización.
 - Prohibir quemas agrícolas.

- Aconsejar no utilizar el vehículo en la ciudad.
- **Controles de emisiones de contaminante durante episodios de contaminación del mismo.** En situaciones episódicas se pueden registrar valores muy elevados de algún contaminante relacionados con determinadas actividades industriales, agropecuarias, construcción/demolición, entre otras. O bien que las medidas asociadas conlleven el paro de determinadas actividades (como algunas actividades en obras grandes que produzcan mucho polvo). Entre las medidas propuestas están las inspecciones de las potenciales fuentes de emisión durante episodios elevados de concentración del contaminante. Para ello, los responsables de la inspección han de tener acceso remoto continuo a las medidas automáticas del contaminante en las estaciones de medida, de forma que puedan proceder a realizar las inspecciones cuando los valores de concentración excedan un valor definido. Algunos ejemplos pueden ser: i) cuando se incrementen marcadamente los niveles de NH₃, se realicen inspecciones para que no se apliquen purines en campos agrícolas; ii) en episodios de contaminación por PM se realicen inspecciones en obras o infraestructuras grandes, implantando medidas a corto plazo, como limitar o paralizar operaciones que emitan mucho polvo en obras o puertos.

9. MEDIDAS CORRECTIVAS

9.1 Tráfico rodado urbano y metropolitano

9.1.1 Contaminantes relevantes emitidos por el tráfico rodado

El tráfico vehicular es una de las principales fuentes de contaminación del aire en zonas urbanas (Querol et al., 2011, Reche et al., 2011, Vanderstraeten et al., 2010). Se ha convertido en la fuente dominante para determinados contaminantes, incluido el **CO, CO₂, COVs (sobre todo hidrocarburos, HC), NOx y PM, especialmente partículas carbonosas** (EEA, 2019). El tráfico rodado es la principal fuente de emisiones de NOx en las ciudades, y contribuye directamente al aumento de PM tanto por las emisiones de los motores como por el desgaste de frenos, neumáticos y el pavimento, así como por la resuspensión de polvo. Mientras que en el caso del NO₂ en áreas de fondo urbano, entre un 40% y 70% puede provenir del tráfico rodado, para el PM2.5 esta contribución se reduce a un 20-30%. Además, como se mencionó anteriormente, el 70% del PM2.5 en áreas de fondo urbano tiene un origen regional, lo que requiere la implementación de medidas a nivel metropolitano y regional para reducir sus precursores y su formación. Las políticas destinadas a reducir las emisiones del tráfico incluyen medidas como la reducción del número de vehículos (tasas por congestión y restricciones de estacionamiento), el aumento progresivo del transporte activo, como ir en bicicleta o caminar, la transición a vehículos “cero emisiones”, el rediseño urbano, como la introducción de Zonas de Bajas Emisiones (ZBE), reducción de límites de velocidad y modernización del parque de vehículos de transporte de mercancías. Los estudios que evidencian la efectividad de estas políticas locales para reducir la contaminación del aire son algo escasos y las conclusiones muestran diferencias, pero sus resultados son alentadores (Qadir et al., 2013, Invernizzi et al., 2014, Titos et al., 2015, Izquierdo et al., 2020). Existe consenso en la literatura de que las emisiones primarias del tráfico se conocen relativamente bien y la mejora tecnológica en los motores y combustibles de los vehículos están disminuyendo eficientemente la contribución a la concentración de PM2.5 en lo referente a las emisiones de motores (Harrison et al., 2017, Krecl et al., 2017, Viana et al., 2020). Sin embargo, para cumplir los valores límite de PM es necesario actuar sobre los precursores de las fracciones orgánica e inorgánica de aerosoles secundarios, y tener en cuenta el PM de abrasión de frenos y ruedas y polvo de rodadura.

En la nueva Directiva se señala que los contaminantes atmosféricos que emite el sector del transporte representan un riesgo especial para la salud de las personas que viven en zonas urbanas y cerca de los centros de transporte. Por consiguiente, los Estados Miembros y las autoridades regionales y locales pertinentes deben valorar la posibilidad de aplicar planes de movilidad urbana sostenible e invertir en tecnologías de emisión cero y medidas que permitan un cambio modal hacia sistemas de transporte activos, colectivos y sostenibles, así como la creación de espacios verdes y zonas peatonales en las ciudades con el objetivo de reducir la contaminación atmosférica y la congestión vial, especialmente en las zonas urbanas, en consonancia con la Comunicación de la Comisión, de 9 de diciembre de 2020, titulada “Estrategia de movilidad sostenible e inteligente: encauzar el transporte europeo de cara al futuro”. Los Estados miembros también deben adoptar todas las medidas necesarias para acelerar la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos, en particular la infraestructura de recarga eléctrica para vehículos ligeros y pesados, y deben llevar a cabo controles regulares de la calidad de las infraestructuras de transporte para detectar las zonas que necesitan descongestión y optimización de las

infraestructuras, y adoptar las medidas adecuadas, con el apoyo de la financiación de la UE, cuando proceda.

9.1.2 Medidas eficientes sobre el tráfico rodado

Reducir la contaminación del aire asociada a la movilidad requiere un enfoque multifacético que aborde diversos aspectos de la vida urbana, incluido el transporte y la planificación urbana. El diagrama presentado en la Figura 9.1 describe un conjunto de medidas a implementar desde perspectivas complementarias, priorizando las medidas no tecnológicas. Según la evaluación de la efectividad de medidas y actuaciones sobre el tráfico rodado urbano que realizó el proyecto AIRUSE (2018), entre las **estrategias de mejora de calidad aire en base a actuaciones sobre la movilidad** podemos destacar (Figura 9.1):

- Medidas para la mejora del transporte público.
- Medidas para reducir los vehículos urbanos en circulación tenemos:
 - Incrementar la oferta de transporte público.
 - Peajes urbanos.
 - Establecer restricciones de aparcamiento.
- Medidas que favorezcan la renovación y transformación del parque de vehículos urbanos.
- Distribución urbana de mercancías y taxis.
- Rediseño urbano.
- Otras medidas.

0. Los planes de calidad del aire deben elaborarse a escala del área metropolitana

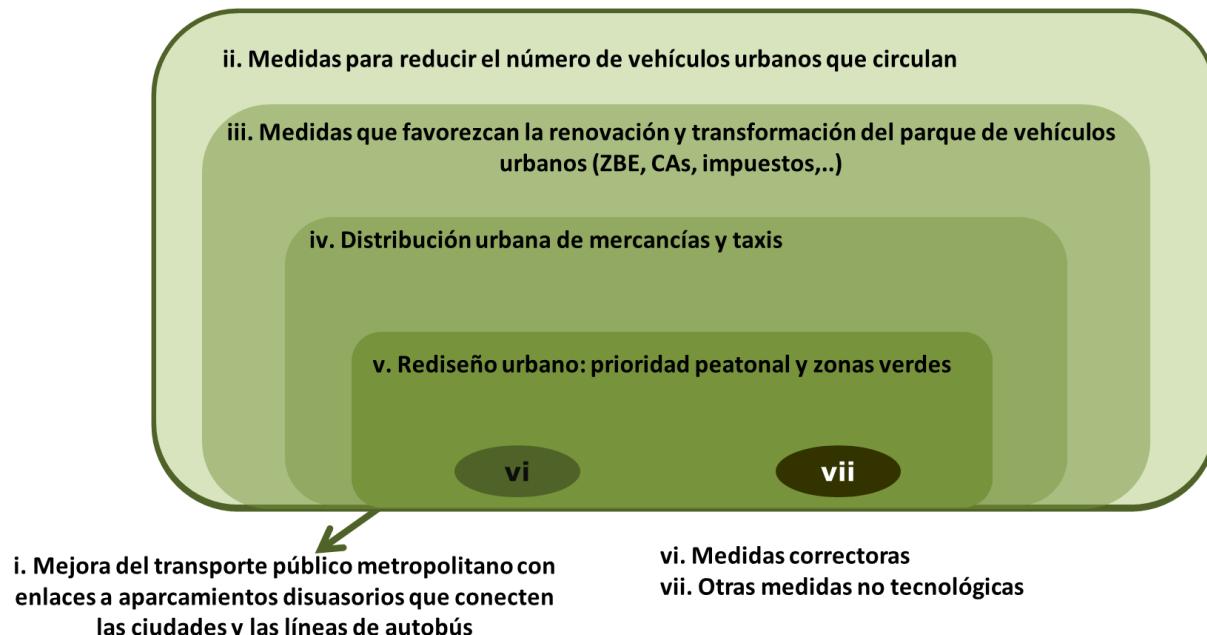


Figura 9.1. Estrategias de mejora de calidad aire en base a la movilidad.

A continuación, se describen brevemente dichas actuaciones/estrategias, pero antes debemos resaltar de nuevo, que la calidad del aire en las metrópolis modernas exige un **enfoque integral** que trascienda los límites municipales y **abarque la totalidad de la región metropolitana**. Un PMCA y PACP metropolitano, implementado de manera efectiva, permitirá abordar las emisiones generadas por los vehículos matriculados en la propia ciudad, como fuera de su límite municipal. Limitarse a

las fronteras de la ciudad central resulta insuficiente, ya que las ciudades experimentan un flujo cíclico de vehículos que ingresan durante las horas pico de la mañana (sístole) y salen por la tarde (diástole). Esta dinámica involucra tanto a los vehículos que circulan dentro de la ciudad como a aquellos que provienen de zonas periurbanas y conurbadas.

9.1.2.1. Medidas para la mejora del transporte público

Atendiendo al **modelo COM-B** expuesto anteriormente, se debe ofrecer un **transporte REC** (rápido económico y confortable) que permita el cambio de modalidad en la movilidad metropolitana.

Todo ello se debe conseguir en base a la **Promoción del transporte público**, la cual debe incluir una mejora de las infraestructuras (desarrollo de redes, mayor frecuencia y rapidez), tarifas asequibles y billetes integrados, así como subsidios y descuentos. Incluiría la mejora del **transporte público metropolitano, con enlaces a aparcamientos disuasorios**, lo que permitiría reducir la congestión en el centro urbano. Los aparcamientos disuasorios deberían ser gratuitos y localizarse en la ciudad o zona residencial de origen y no en las afueras de la ciudad de destino para no congestionar esta última. Además, en el caso de líneas metropolitanas de autobuses, estos aparcamientos disuasorios satélites deberían estar conectado con carriles bus-VAO desde origen hasta la entrada de la ciudad de destino. Estas son situaciones ideales hacia las cuales las ciudades deben tender.

Aunque su implementación presenta desafíos en cuanto a inversión inicial, cambios de hábitos y coordinación entre gobiernos locales, operadores de transporte público y otras partes interesadas, los beneficios a largo plazo pueden ser significativos, reduciendo la dependencia del vehículo privado. Desde hace décadas, podemos encontrar ejemplos de su implementación en Londres, con aparcamientos frecuentes cerca de estaciones de metro y tren, muy frecuentados en horas punta.

9.1.2.2. Medidas para reducir el número de los vehículos urbanos en circulación

Muchos vehículos diésel en circulación, relativamente nuevos (EURO 5 y anteriores a EURO 6d), están afectados por el “fraude de diésel” (*Diesel Gate; Tribunal de Cuentas Europeo, 2019*) y emiten niveles elevados de NOx. No ha sido hasta 2019, con la entrada de la EURO 6d, que obliga a incorporar SCR (*Selective Catalytic Reduction*), cuando se asegura que los niveles de NOx de los vehículos diésel en circulación son próximos a los que marcan los valores de emisión para este contaminante. Esto implica que tomar medidas para reducir el número de vehículos que permita sólo la circulación de vehículos nuevos EURO 6d no es factible por aplicar la prohibición a una gran proporción del parque circulante. Por ejemplo, muchos vehículos diésel fabricados en 2018 emiten niveles elevados de NOx. A pesar de esto, sus propietarios han pagado recientemente un impuesto de matriculación, lo que les permite circular y utilizar estos vehículos legalmente. Este impuesto se cobra al registrar un vehículo y, en teoría, debería reflejar el impacto ambiental del mismo, pero en este caso, no se han tomado suficientemente en cuenta las altas emisiones de NOx. Es por tanto necesario aplicar medidas para reducir el número de vehículos urbanos en circulación que afecte a todos los vehículos en general, indistintamente de si son EURO 6d o no, para evitar que puedan darse estos inconvenientes, como los producidos por el *Diesel Gate*. En el informe *TRUE Initiative - Brussels* se evaluaron las emisiones de vehículos en Bruselas (TRUE, 2021), ofreciéndose datos relevantes sobre la eficacia de las ZBE en la ciudad, centrándose especialmente en las emisiones de NOx (Figura 9.2). Se observó que los vehículos diésel EURO 4, 5 y 6 (anteriores a ‘d’) mostraron emisiones de NOx que excedían significativamente los límites regulatorios, con emisiones reales de

3 a 5 veces superiores a las permitidas en pruebas de laboratorio, evidenciándose la necesidad de políticas que promuevan su renovación. No así en los vehículos de gasolina ni diésel EURO 6d.

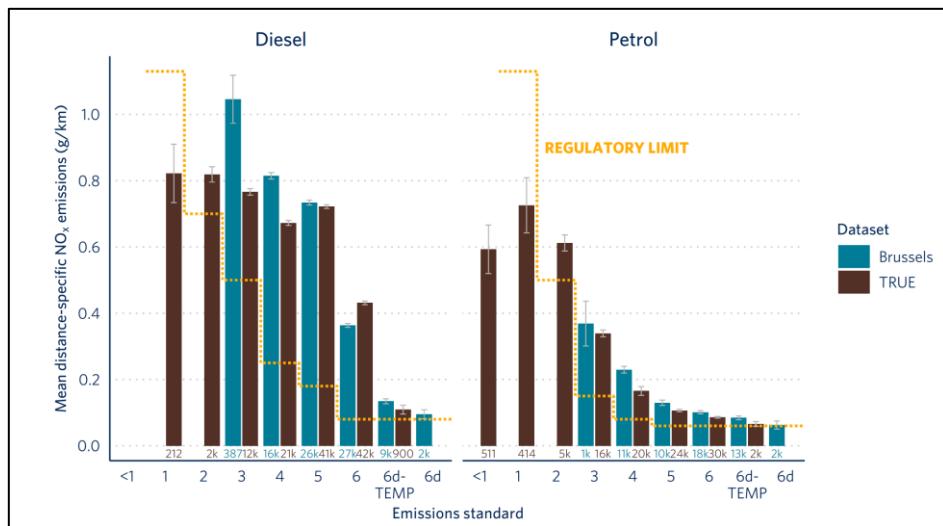


Figura 9.2. Emisiones de vehículos en Bruselas (otoño, 2020), centrándose especialmente en las emisiones de NOx ([TRUE, 2021](#)). Izquierda: Emisiones en condiciones de circulación urbana real medias (en g/km) para vehículos diésel cumpliendo diferentes normas EURO (desde más antiguos que EURO1 a EURO6d); en marrón oscuro las emisiones medias para las categorías específicas según el proyecto TRUE, en azul, la media de las mediciones realizadas en Bruselas en otoño de 2020. Derecha: Ídem para vehículos gasolina. En ambos casos y en amarillo se indican los valores de emisión de las normas EURO respectivas.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que cuando se reducen las emisiones de motor, disminuyen los niveles de NOx y parte del PM, pero no el PM generado por desgaste de frenos, ruedas y firme de rodadura. Así, la tendencia actual de las ciudades más avanzadas en este campo, es ganar espacio a los vehículos (tras haber reducido el número de los circulantes) y hacer ciudades más verdes para que haya más facilidad para ir en bici o a pie (transporte activo), y que sean, por tanto, ciudades más saludables. Para conseguirlo hay que reducir el número de vehículos en circulación. Y no solo para facilitar el transporte activo, sino también para facilitar un rediseño urbano sostenible. Si se peatonalizan calles, sin reducir el número de vehículos, se estaría moviendo la contaminación a otro lado.

Entre las medidas que han demostrado mayor efectividad para reducir **el número de vehículos que circulan en las zonas urbanas** podemos encontrar:

- **Incrementar la oferta de transporte público y activo** (bicicletas) y vehículos compartidos (*car-sharing o bike-sharing*).
- **Aplicación de tasas de acceso (o peaje urbano, o tasa de congestión)**, ejemplos exitosos de este tipo de políticas son los casos de Estocolmo (Figura 9.3) y de Milán, donde las tasas de congestión (3.5 y 5€ en hora punta) han incentivado a algunos residentes y empresas a reconsiderar sus ubicaciones y a reducir el número de vehículos circulantes en un 35%, aun habiendo crecido considerablemente la población en el caso de Estocolmo. Las áreas fuera de las zonas tarifadas han visto también un aumento en la población y las actividades comerciales, mientras que el centro de la ciudad se ha vuelto más accesible y menos congestionado. No obstante, para que esta medida sea factible, se deben considerar algunas excepciones, como servicios de emergencia y ciertos vehículos de transporte público, e ir acompañado de un sistema de deducción fiscal, ya que se puede producir una discriminación social, pues aquellos

ciudadanos con mayor poder adquisitivo podrían entrar pagando peaje. Para disminuir esta discriminación se pueden tomar ciertas medidas como instalar cámaras y hacer que el peaje no sea efectivo para vehículos con un mínimo de 2-3 viajeros (similar a los carriles VAO - Vehículos de Alta Ocupación-); o, utilizar chips de acceso con GPS para personas con bajo poder adquisitivo, como ya se hace en las ZBE de Milán. En este sistema, si se justifica la necesidad de ingresar en la zona restringida y se demuestra un bajo poder adquisitivo, el costo del chip es de 30€/año, sin necesidad de pagar una tarifa adicional por cada entrada. Algunas compañías de seguros instalan ya estos chips en los vehículos asegurados para comprobar kilometraje y velocidades de conducción para aplicar las primas.

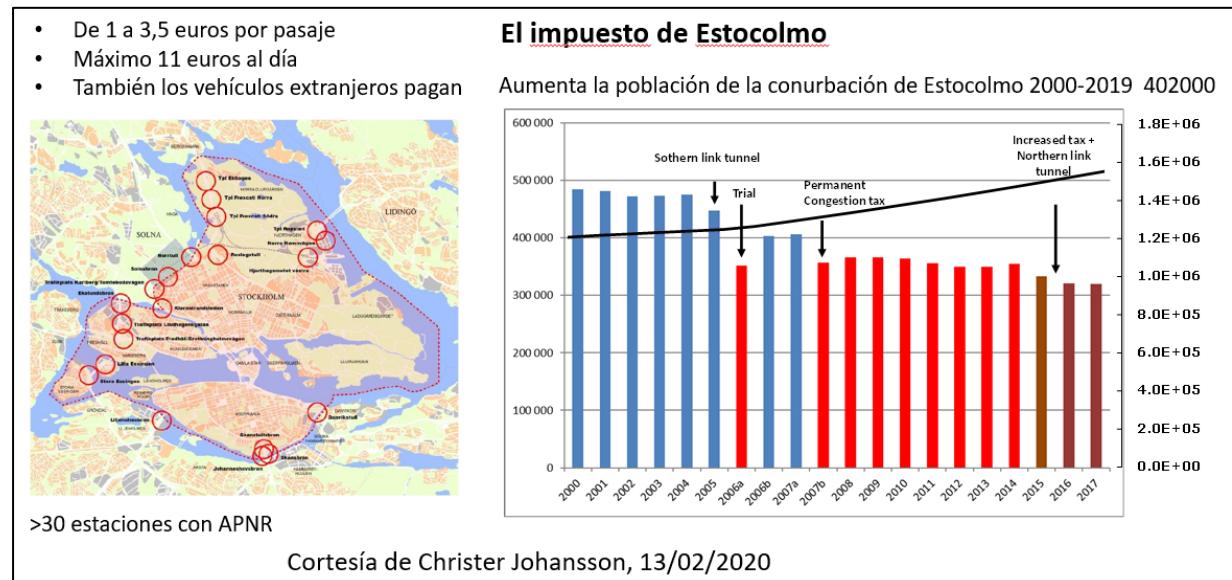


Figura 9.3. Ejemplo de implementación de tasas de acceso en Estocolmo. Izquierda: Los círculos rojos indican la ubicación de cámaras para el peaje. Derecha: Media diaria de vehículos circulantes antes (azul) y con el peaje (rojo); en marrón oscuro después del incremento del peaje y de la construcción de un túnel para el tráfico. La línea continua negra indica la evolución de la población.

- **Restricciones de aparcamiento**, tanto i) eliminando aparcamientos en superficie, ii) obligando al pago de este (con diferentes precios para residentes del barrio y externos), como iii) siendo solamente accesible a los vecinos del barrio. Esto debe ir de la mano de incentivos para aparcamientos disuasorios, que estén bien conectados con redes de transporte público. Un ejemplo del efecto de esta medida está descrito en Querol et al. (2017), quienes demostraron una reducción significativa del número de vehículos circulantes (10-20%) en las áreas con aparcamiento en calle de pago (aparcamiento verde, costes elevados para no residentes y muy reducidos para residentes) (Figura 9.4). Otros ejemplos son ciudades que han aplicado zonas de estacionamiento regulado (SER) en los que solamente pueden aparcar en superficie los residentes del barrio.

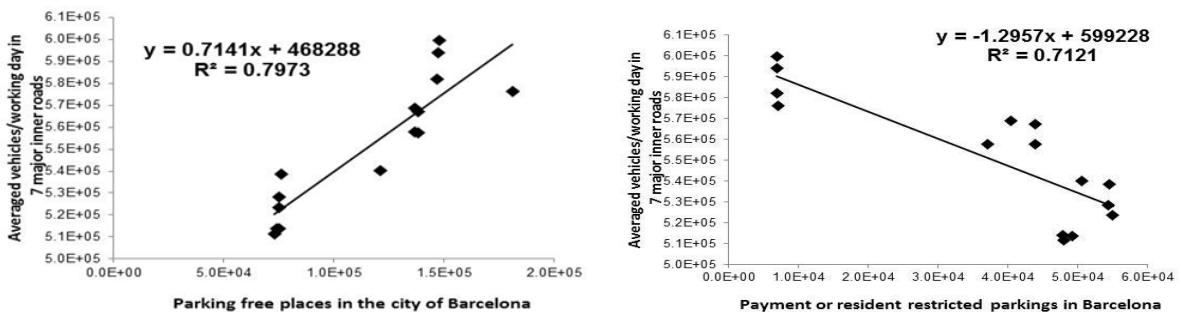


Figura 9.4. Efecto del incremento de zonas con estacionamiento regulado en la reducción del número de vehículos circulantes (Querol et al., 2017). Medidas no tecnológicas para la calidad del aire urbano.

9.1.2.3. Medidas para acelerar el cambio de las flotas de vehículos circulantes: ZBE y transición eléctrica

La reducción alcanzable en el número de vehículos mediante las medidas descritas, debe complementarse simultáneamente con la **renovación y transformación del parque de vehículos urbanos circulantes** para conseguir objetivos ambiciosos de mejora de la calidad del aire (Figura 9.5). Para esto último, la creación de zonas que restringen el acceso a vehículos que no cumplen con ciertos estándares de emisión ha demostrado ser eficaz. Si se consigue reducir un 30% la circulación de vehículos con las medidas de reducción del tráfico, expuestas más arriba, el 70% de los vehículos que accedan ha de ser lo menos contaminantes posible si se quiere reducir más marcadamente la contaminación.



Figura 9.5. Cambio de flota por vehículos eléctricos ayudan a reducir las emisiones. (Imágenes obtenidas con IA, software DALL-E™ y Canvas Multimedia Mágico™)

Algunas de estas medidas son:

Creación de Zonas de Bajas Emisiones (ZBE), Ultra Bajas Emisiones (UZBE), y Zonas de Emisiones Cero (ZEZ).

- **ZBE:** aquella en la que se aplican restricciones de acceso, circulación y estacionamiento de vehículos para mejorar la calidad del aire y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes atmosféricos, conforme a la clasificación de los vehículos por su nivel de emisiones. (Artículo 14.3 de la Ley 7/2021, de Cambio Climático y Transición Energética).
- **UZBE:** aquella donde solo se permite la circulación de Vehículos de Emisiones Ultra Bajas (ULEV), es decir, aquellos vehículos de motor, pero no solo eléctrico, que emiten significativamente menos contaminantes (hasta un 70-80% menos de lo permitido por la ley) que un vehículo convencional.
- **ZEZ:** aquella donde sólo se permiten vehículos de cero emisiones. En estas zonas, todos los vehículos con motor de combustión interna están prohibidos; esto incluye los vehículos híbridos enchufables que no pueden funcionar con cero emisiones, por lo que sólo los vehículos eléctricos de batería y los vehículos de hidrógeno están permitidos.

La Ley 7/2021, de Cambio Climático y Transición Energética, establece la obligación para municipios de más de 50.000 habitantes, territorios insulares y municipios de más de 20.000 habitantes, cuando se superen los valores límite, de establecer ZBE antes de 2023. A julio de 2024, en España hay 17 en vigor, algunas más en trámite (Figura 9.6) y deberían de haberse implantado 149, por lo que España lleva un retraso considerable respecto a otros países que las implantaron con similares características restrictivas en 2008 o 2015. Según *Urban Access Regulation* (UAR, 2024), la ZBE es una medida que se ha aplicado en 339 zonas de Europa, y se considera una medida básica de calidad del aire para muchas ciudades europeas. Las ZBE surgieron en Estocolmo en 1996 (para vehículos de distribución urbana de mercancías), pero ha sido promovida por Londres y sobre todo Berlín, ya que en 2008 fue la primera ciudad en aplicarla a todo tipo de vehículos. Hasta entonces, se aplicaban solo a vehículos pesados y furgonetas de reparto.

Cabe destacar que las ZBEs no suelen reducir el número de vehículos circulantes, pero ayudan a renovar la flota, eliminando de la circulación urbana a los que contaminan más. No obstante, el sistema de etiquetaje actual hace que algunos vehículos como los diésel de 2018, que tiene etiqueta C de la DGT y son muy contaminantes para NOx, como se ha descrito anteriormente, puedan circular por estas zonas. Si bien en las ZBE hay restricciones a la circulación, actuando sobre los vehículos más contaminantes, vemos que hay diversidad en cuanto a los grados de restricción según la ciudad. Así, hay ZBE donde sólo se permite circular a vehículos EURO 6 en adelante, y otras que lo hacen para EURO 4 en adelante. Es importante destacar que no es hasta 2011 cuando los diésel EURO 5 comenzaron a incorporar filtro de partículas, por lo que es necesario prohibir la entrada a estas zonas a vehículos diésel anteriores a esta norma para conseguir ciudades realmente más saludables. Hay que recordar que la OMS en 2012 declaró el hollín del diésel como cancerígeno del grupo 1, por lo que de esta forma eliminaríamos cancerígenos del aire (OMS, 2012).

Estas zonas fomentan la transición hacia combustibles sostenibles y, en particular, hacia el transporte eléctrico, como se concluyó en el estudio de Holman C. et al. (2015). En este estudio se evaluó la eficacia de ZBE en varias ciudades de la UE (Figura 9.7), observándose que no sólo reducen las emisiones de contaminantes clave (se reportaron disminuciones de hasta un 20-30% en los niveles de NOx y PM10 en comparación con las áreas fuera de las ZBE), sino que también promueven un cambio hacia modos de transporte más sostenibles.

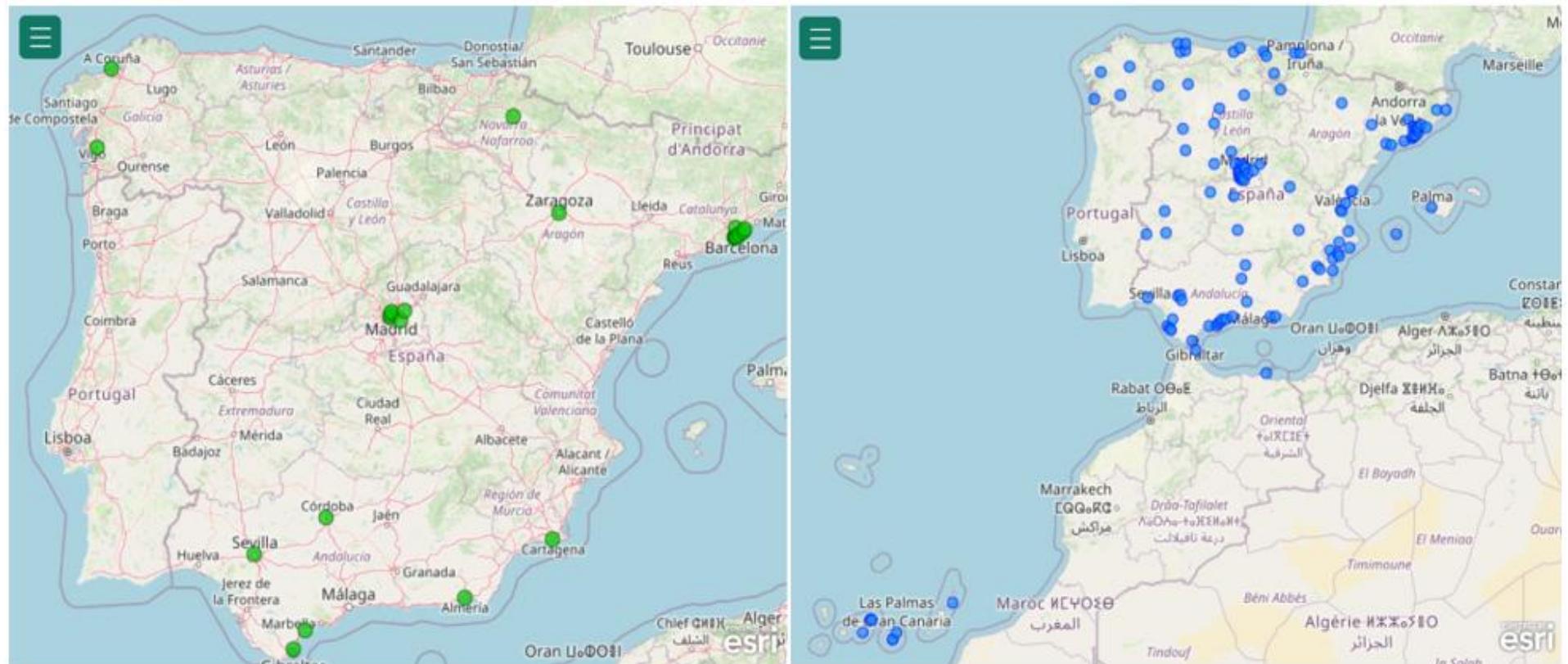


Figura 9.6. Las 17 ZBEs vigentes (verde) y 120 en trámite (azul). MITECO (2024d).

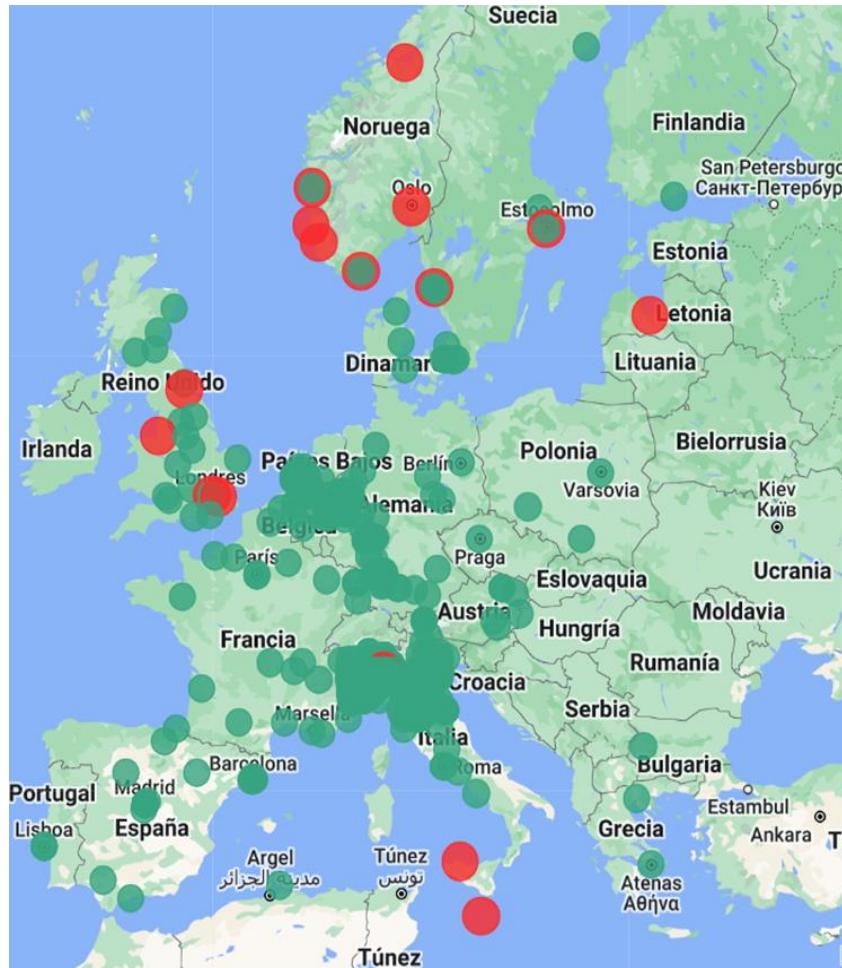


Figura 9.7. Número de ciudades donde se han adoptado ZBE (verde), peajes urbanos (rojo), zonas de emergencia por polución (naranja), ZEZ (violeta), y otras regulaciones de acceso (azul), según información, a julio de 2024, de UAR (2024) y MITECO (2024d). En el caso de España, algunas de las 17 ciudades cuentan con ZBE según la información de MITECO, pero no según la administración local (AMB).

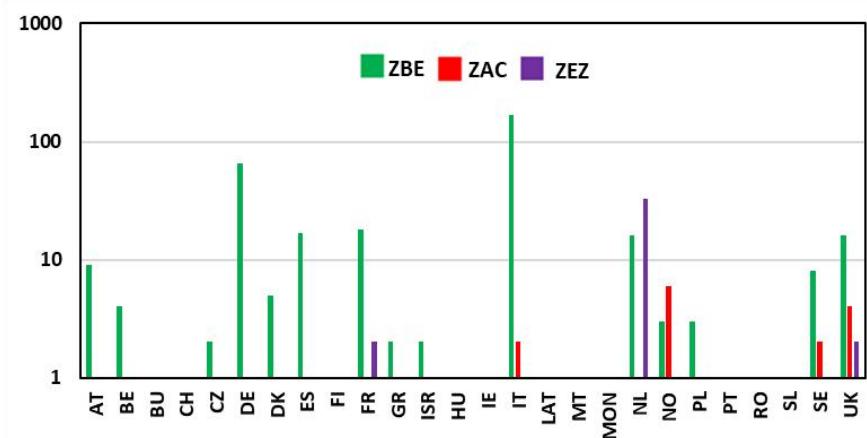
ZBE en la UE

18 PAÍSES, 339 CIUDADES:

AT, BE, BL, CZ, SE, DK, ES, FI, FR, DE, GR, IS, IT, NL, NO, PL, PT, SE, CH, UK
ONLY HU, IE, MAL, MON, RO, SLO, CH sin ZBE

ES (17)

Madrid, Torrejón de Ardoz, Rivas-Vaciamadrid, Barcelona, San Cugat del Vallés, Badalona, Sant Joan Despí, A Coruña, Pontevedra, Pamplona, Zaragoza, Cartagena, Córdoba, Sevilla, Almería, Estepona, La Línea de la Concepción



Diseño de ZBEs

Holman et al. (2015) concluyeron que las ZBEs:

- Deben aplicarse a todos los tipos de vehículos (reparto, taxi, particulares, transporte, ...)
- Deben de tener una aplicación estricta acompaña de sanciones.
- Deben aplicar también a motocicletas.
- Deben tener un ámbito grande de aplicación para no crear efectos frontera indeseados.
- En lo posible se debe utilizar una clasificación de vehículos según las emisiones reales de circulación, más que las derivadas de las normas EURO.

Además, para evaluar el impacto en la calidad del aire de una futura ZBE (mediante modelización) en el marco de un PMCA, es esencial encuestar a la ciudadanía sobre sus decisiones respecto a los vehículos afectados por las restricciones. Por ejemplo, cambiar un coche EURO 2 diésel por otro diésel EURO 4 o 5 (involucrados en el *Diesel Gate*) podría incluso empeorar la situación, mientras que optar por un vehículo de gasolina, eléctrico o híbrido reduciría el impacto en el NOx. Incluir los resultados de estas encuestas en la modelización es crucial para evitar resultados inesperados o no ajustados a una correcta predicción.

La Figura 9.8 ofrece información sobre el estado actual de las ZBEs en algunas de las principales ciudades europeas según tipo de restricciones y extensión.

ZBE de un tamaño reducido pueden generar un "**efecto frontera**" indeseado, que se refiere al posible incremento de la contaminación en áreas adyacentes a la ZBE debido a la desviación del tráfico vehicular hacia esas zonas. En cambio, ZBE más grandes, a partir de 90 km², reducen este efecto, por lo que es preferible implementar ZBE amplias.

Además, es recomendable **estructurar las ZBE** en capas, con restricciones que aumenten hacia las áreas más contaminadas. Por ejemplo, Londres incorporó en 2019 una ZBE de 360 km², con una zona central más reducida de UZBE, que ha ido aumentando progresivamente. En Holanda, las ZBE incluyen ZEZ donde los vehículos de logística son eléctricos.

Es importante que estas **ZBE se apliquen también a los vehículos de reparto**, que trabajan 12h al día. Eximir de la prohibición a quienes hacen más kilómetros no contribuye a reducir la contaminación. Es necesario **implementar medidas que eviten la discriminación social** también en este sector, como ofrecer ayudas para cambiar de vehículo o permitir la circulación de un límite de kilómetros/año a personas que necesitan el vehículo para desplazarse y no tienen medios para cambiarlo (véase ejemplo anterior del chip de las ZBE de Milán, que con un coste reducido permite circular un máximo fijado de km/año en la ZBE para vehículos que no cumplen las normas de acceso y cuyos propietarios no tengan posibilidad de renovarlos).

En cuanto al **horario**, puede aplicarse las restricciones a partir de la 7:00 h local hasta las 20 h, y no aplicarse los fines de semana si no hay episodios de contaminación, o bien aplicarse las 24 h.

En paralelo a la ZBE debe apoyarse la **electrificación e hibridación** del parque circulante de vehículos. Europa ha mostrado un crecimiento significativo de las ventas de vehículos eléctricos (EVs), pero su proporción en el parque circulante es aún muy baja (3.8 % en 2023, Figura 9.9).

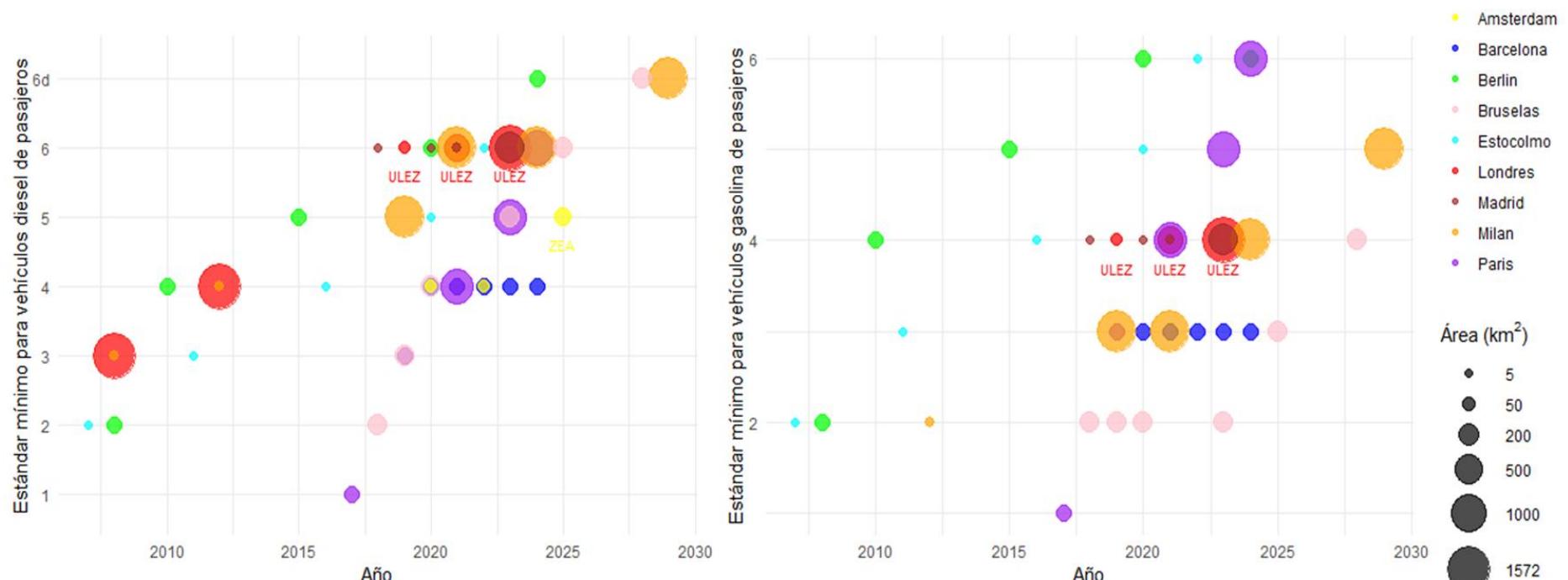


Figura 9.8. Extensión y grado de restricción de ZBEs en algunas ciudades de Europa. Derecha para vehículos de gasolina, e izquierda para diésel, según información UAR (2024).

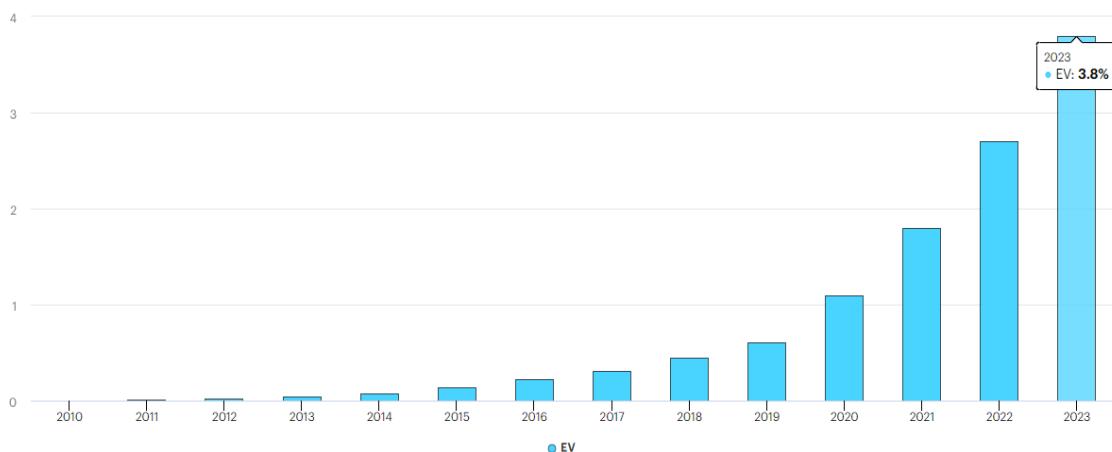


Figura 9.9. Porcentaje de coches eléctricos en la flota Europa. IEA (2024).

Un ejemplo notable de éxito en esta transición al EV es Noruega, que lidera el camino en la adopción de estos vehículos con un 29% del total del parque en 2023 y un 93% de las ventas anuales en 2023, incluyendo eléctricos e híbridos enchufables (IEA, 2024) (Figura 9.10). Este éxito se debe en gran parte a un enfoque que combina estrictas regulaciones ambientales con generosos incentivos fiscales desde 1990, que deben servir como guía para otros países europeos. Estos vehículos eléctricos no pagan impuesto de matriculación, ni circulación, ni IVA (25% en Noruega), ni peaje en autopistas, ni los viajes con ferris. Aun así, por primera vez en 2023, disminuyó marcadamente la venta de vehículos eléctricos (Figura 9.10). Probablemente esto se deba a que solamente una proporción de la población está dispuesta a adquirirlos o no puede hacerlo. Otro impulso a la electrificación lo encontramos en los programas de motos urbanas eléctricas. Ciudades como París y Milán están a la vanguardia de esta iniciativa, demostrando los beneficios.

Cabe resaltar la baja proporción de EVs en las ventas anuales y en la flota circulante de España comparadas con el resto de Europa. Así, la proporción en la flota es de 1.5%, muy inferior a la media de la UE (3.8%) y de países vecinos como Francia y Portugal (4.10 y 3.90%, respectivamente) (Figura 9.10).

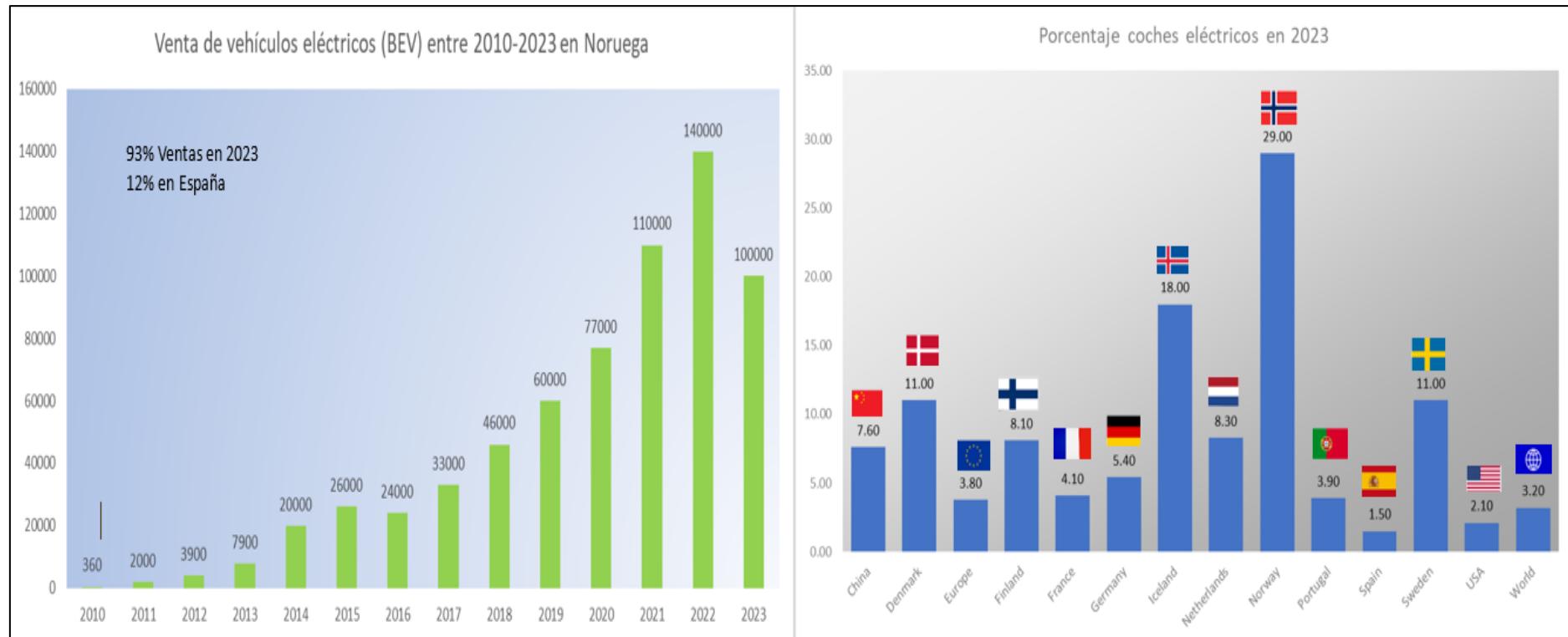


Figura 9.10. A la izquierda, registro de venta de vehículos eléctricos en Noruega entre 2010-2023. El 29% de vehículos son eléctricos en 2023 (20% totalmente eléctricos). A la derecha, porcentaje de turismos eléctricos enchufables en circulación en países y mercados regionales seleccionados IEA (2024).

9.1.2.4 Medidas para mejorar la distribución urbana de mercancías (DUM)

Otra importante estrategia de mejora es abordar las actuales ineficiencias en la distribución urbana de mercancías (DUM), ya que sus vehículos alcanzan altos kilometrajes/día, lo cual les hace ser considerados como un sector que causa una parte relevante de la contaminación atmosférica urbana (Estrada et al, 2018; Holguin-Veras et al, 2020, OMM, 2023).

Algunos puntos clave para reducir la contaminación atmosférica derivada de la DUM son (Querol, 2018; F. Robusté, UPC, comunicación personal):

- **Electrificación e hibridación** preferiblemente para vehículos de reparto. La electrificación/hibridación específica de los vehículos de reparto y/o taxis debe apoyarse, porque circulan muchos km/día. En calidad del aire, el efecto en emisiones de electrificar un vehículo de reparto equivale a electrificar a 11 vehículos particulares por kilometraje. Se recomienda aplicar subvenciones para estos vehículos, antes que, para el uso privado, ya que en estos últimos casos se suelen beneficiar personas de mayor poder adquisitivo, que usan el coche para desplazamientos que se podrían hacer preferiblemente en transporte público.
- **Evitar la DUM** de vehículos de distribución en horas punta (de 7 a 9 de la mañana), especialmente en condiciones meteorológicas desfavorables y cuando la densidad de tráfico es alta, y la velocidad del viento baja.
- Implementar **sistemas avanzados de gestión logística** que optimicen las rutas y tiempos de entrega en la **última milla**. Esto incluye la distribución nocturna, el uso de plataformas logísticas (grandes vehículos con bajas emisiones) que permiten la consolidación de cargas en puntos estratégicos, a partir de los cuales se realiza la DUM (con vehículos, a poder ser eléctricos, que transportan varios tipos de productos a la vez) a partir de la citada plataforma, y de forma desatendida por el local receptor (el repartidor tiene acceso autónomo a un espacio limitado del local, como espacio entre persiana y puerta). Ello permite una DUM más eficiente (Estrada et al, 2018; Holguin-Veras et al, 2020). Como media en Manhattan, un bar-restaurante, recibe mercancías de alrededor de 7 vehículos/día (Holguin-Veras et al, 2020), si se optimizan los repartos y se suministran diferentes tipos de productos de manera conjunta se reduce el número de vehículos necesarios y los costes de distribución. Además, es muy aconsejable establecer puntos de recogida (casilleros) de productos comprados por internet al lado del transporte público, donde se pueda dejar de noche por parte del transportista, y recoger el usuario al día siguiente.
- Establecer **regulaciones** rigurosas que garanticen el **uso de vehículos de bajas emisiones** para la distribución urbana y definir, **en los locales receptores, volúmenes mínimos** disponibles para el almacenamiento de mercancías (en bares, restaurantes, cafeterías, tiendas...), que eviten tener que realizar pedidos con alta frecuencia. Muchas ciudades tienen ordenanzas para ello, pero el control del cumplimiento de las mismas a lo largo de la vida del establecimiento es muy laxo.
- En la misma línea, se debe promover también la electrificación/hibridación de los **taxis**, así como un uso más eficiente mediante aplicaciones que optimicen la recogida de pasajeros y reducir el número de taxis circulando en busca de ellos.

9.1.2.5 Medidas sobre rediseño urbano enfocado en la movilidad y otros sectores

El rediseño urbano (Figura 9.11) es la medida más importante, no solo para mejorar la calidad del aire y disminuir el ruido, sino también para mejorar la calidad de vida de la ciudadanía. El incremento de áreas verdes ganando espacios ocupados por el tráfico, el incremento de la distancia entre la ciudadanía y las emisiones del tráfico, especialmente para zonas con población más vulnerable (escuelas, centros de atención médica, zonas de juego y deportes,...), así como separar adecuadamente peatones y ciclistas de las vías de tráfico, no solamente puede llegar a reducir la exposición y dosis de contaminantes, sino atraer más ciudadanía al transporte activo, lo cual ayuda a reducir sedentarismo y obesidad. Es importante resaltar que muchas de las medidas de rediseño urbano suponen reducir el tráfico, o incluso prohibirlo, a determinadas calles/zonas. Si no se consigue haber reducido el tráfico y hacer que éste sea más eco-eficiente, solamente se conseguirá mover el tráfico de unas zonas a otras. Por todo ello es importante aplicar las medidas anteriores antes del rediseño.

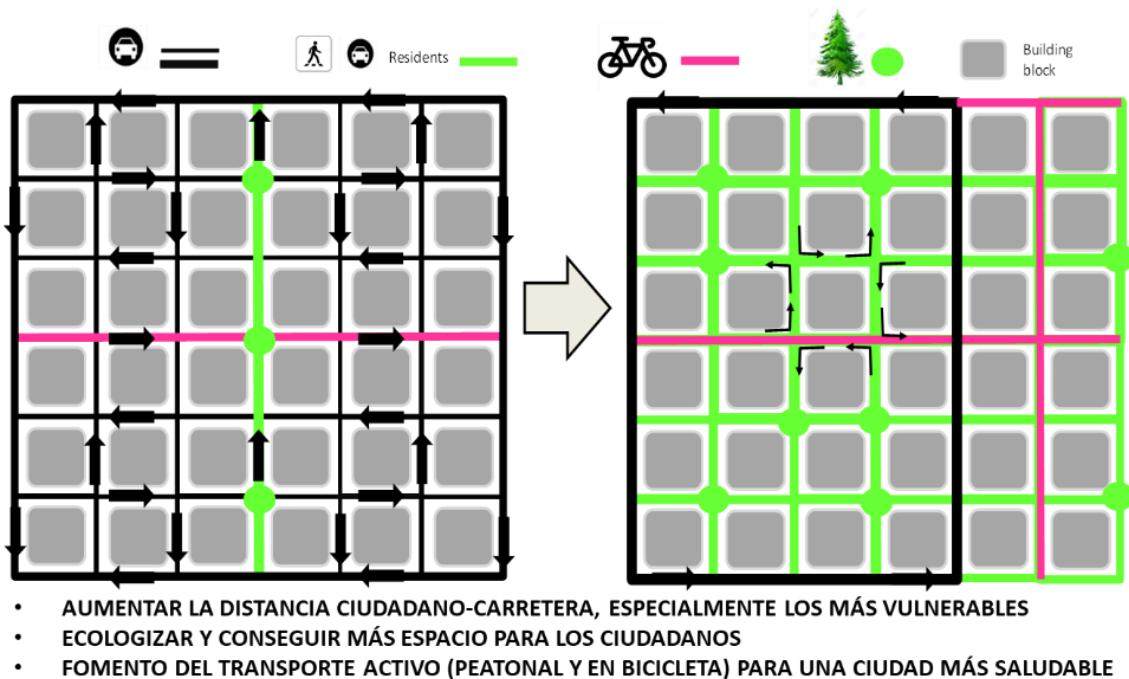


Figura 9.11. Rediseño urbano enfocado en la movilidad.

A continuación, se presentan diferentes estrategias clave con ejemplos de ciudades que han implementado estas medidas con éxito:

- **Aumentar la distancia ciudadano-vía de tráfico**, especialmente para los más vulnerables. Se deben rediseñar las zonas urbanas para que las áreas residenciales y espacios frecuentados por poblaciones vulnerables (niños, ancianos, escuelas, hospitales) estén alejadas de las vías de tráfico principales y zonas de alta densidad de tráfico, así como crear barreras naturales y artificiales, como parques, jardines y muros verdes, que actúen como filtros de aire entre las carreteras y las zonas habitadas. Un ejemplo lo encontramos en la ciudad de Utrecht, Países Bajos, que ha desarrollado zonas residenciales alejadas del tráfico intenso mediante la planificación de barrios donde los vehículos no pueden acceder fácilmente. Esto incluye la creación de parques y áreas verdes que separan las carreteras de las viviendas, así como reducir tráfico alrededor de hospitales, escuelas, centros de atención primaria, geriátricos y zonas

deportivas y parques de juegos. Es importante además separar los caminos verdes escolares, caminos de peatones, y carriles bici del tráfico.

El rediseño urbano se presenta, por tanto, como una herramienta eficaz para mejorar la calidad del aire, y que puede además favorecer ésta en entornos con poblaciones vulnerables, como los escolares, creando espacios más saludables. Diversos estudios han demostrado la importancia de la distancia al tráfico rodado en la exposición a contaminantes con potenciales efectos en la salud, como son el *black carbon* (BC) y las partículas ultrafinas, en entornos escolares, tanto en los patios como en el interior de las aulas (Reche et al., 2014; Reche et al., 2015 y Amato et al., 2019). La proporción de espacio urbano destinado a vías de tráfico o a espacio verde alrededor de las escuelas determinará en gran medida los niveles de exposición (Figura 9.12), incluida la exposición en espacios interiores, la cual está muy influenciada por fuentes externas. El estudio de Amato et al. (2019) proporciona una comprensión detallada de cómo las concentraciones de BC se reducen exponencialmente con la distancia al tráfico en diferentes tipos de calles y configuraciones urbanas (Figura 9.13). Los hallazgos subrayan la importancia de diseñar entornos escolares que maximicen la distancia a las fuentes de tráfico, utilicen barreras físicas efectivas (altas y densas) y consideren la ubicación vertical de las aulas para minimizar la exposición. Los resultados de estos estudios deben ser utilizados para informar políticas de planificación urbana y estrategias de mitigación, protegiendo la salud de los niños.

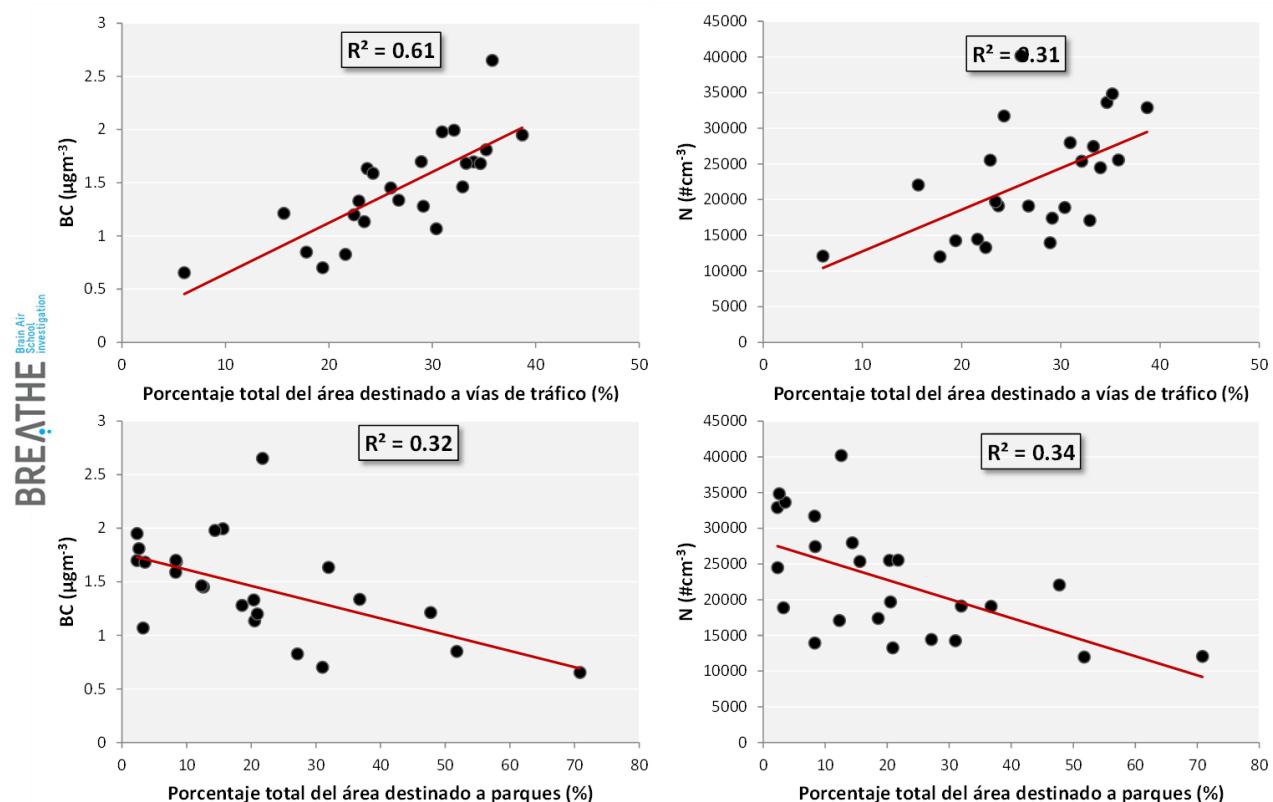


Figura 9.12. Correlación entre los niveles medios de BC y las concentraciones de partículas ultrafinas en diferentes distritos de la ciudad de Barcelona y el porcentaje de superficie destinada a la red viaria y a parques. Datos Reche et al. (2014, 2015).



Figura 9.13. A la izquierda, como media, la reducción a la mitad de la exposición al BC (disminución del 50% desde el bordillo) se alcanza a 25 m del bordillo, pero con una variabilidad muy elevada. A la derecha, carreteras abiertas con mucho tráfico (azul), reducción del 50% a 32 m, concentración de fondo a 80 m; Cañón urbano (verde), reducción del 50% a 26 m, concentración de fondo a 49m; Centro histórico (rojo), reducción del 50% a 22 m, concentración de fondo a 56 m. Datos de Amato et al. (2019).

Por otra parte, implantando el camino escolar verde o el carril bici teniendo en cuenta la circulación a micro escala en una calle determinada puede reducir la exposición de ciclistas y peatones en una proporción muy elevada (Figura 9.14).

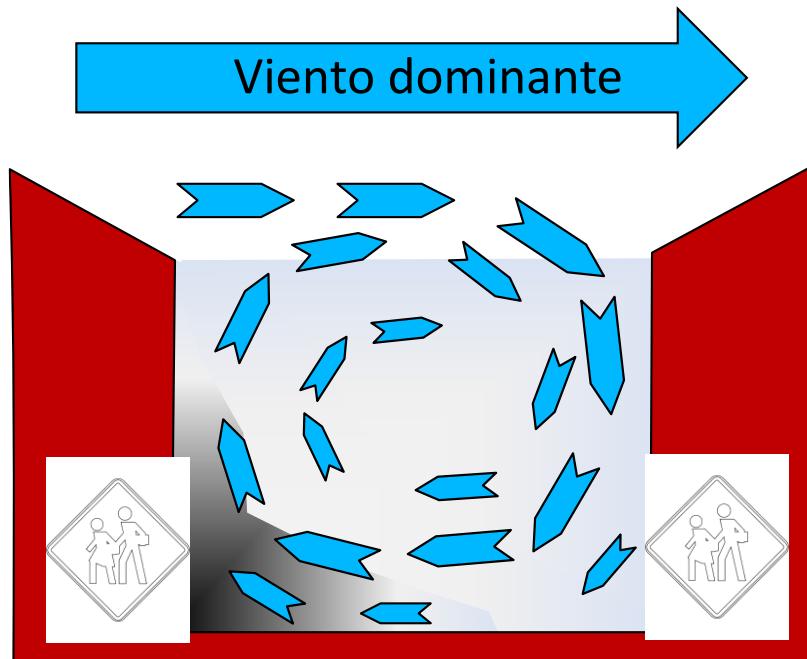


Figura 9.14. Modelo idealizado de desplazamiento de la contaminación en una calle con tráfico y viento perpendicular, mostrando las ventajas de ubicar el camino escolar verde o carril bici en la parte derecha.

De esta manera, las medidas de mitigación más eficaces se basarían en dos pilares:

- Reducir el tráfico en los alrededores de las escuelas, geriátricos, centros de atención médica, hospitales, parques de juego y zonas de deporte, entre otros, aumentando las áreas verdes

y peatonales: esto englobaría medidas como cerrar calles al tráfico, reducir el número de carriles, ampliar las aceras, crear barreras verdes, reubicar las zonas de carga y descarga, las paradas de autobús y los semáforos, o reducir la velocidad, además de ubicar los aparcamientos para coches lo más lejos posible de estas zonas. Obviamente, antes de aplicar estas medidas se ha tenido que reducir el tráfico para no causar derivaciones del mismo a otras zonas. Además, es importante tener en cuenta cuestiones de ética ambiental y aplicar estas medidas, no solo en los centros urbanos (con población de mayor nivel económico), sino también en barrios más desfavorecidos.

- Planificación de crecimiento urbano sostenible: Planificar nuevas construcciones de espacios y edificios frecuentados por la población más sensible en ubicaciones alejadas de las principales arterias de tráfico.

Por otro lado, en el estudio de Rivas et al. (2018), además de muchas de las medidas anteriores, se proporciona evidencia clara de otras medidas prácticas fácilmente alcanzables, como las enumeradas a continuación, también pueden tener un efecto muy positivo:

- Aumentar la conciencia dentro y fuera de la comunidad escolar sobre los impactos de la contaminación del aire en la salud de los niños y del público en general y difundir medidas para reducir el uso de automóviles privados.
- La ventilación controlada de las aulas, que evita abrir ventanas durante períodos de alta contaminación exterior. La ventilación es importante para reducir el efecto de fuentes de contaminación interiores en entornos muy habitados, que puede ser significativa (Figura), pero se debe minimizar especialmente cuando el aula esté directamente orientada a una vía de alta densidad de tráfico, para evitar en la medida de lo posible la infiltración de contaminantes (Figura 9.16).

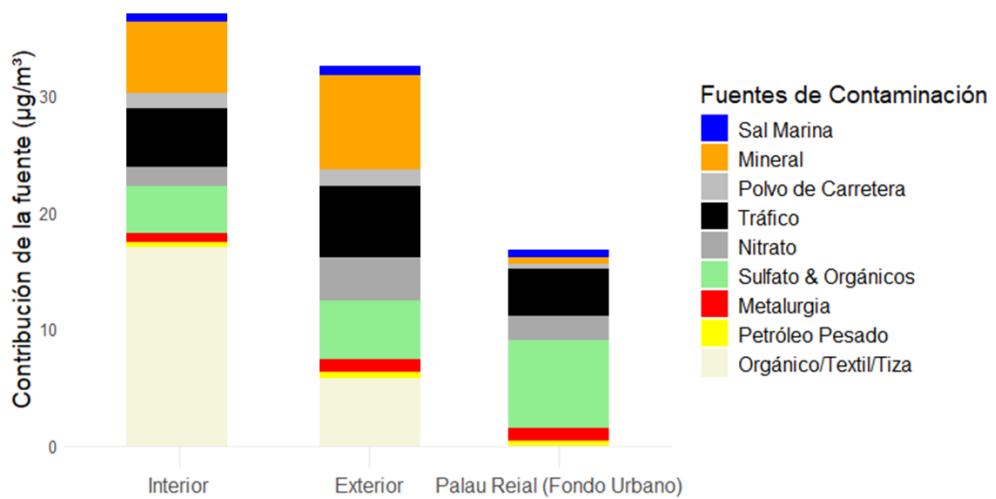


Figura 9.15. Reparto de fuentes de PM2.5 (factorización matricial positiva) en el interior de aulas (indoor), en patios (outdoor) y en el fondo urbano (Palau Reial). Adaptado de Amato et al. (2014).

◆ Ventanas cerradas ■ Ventanas abiertas

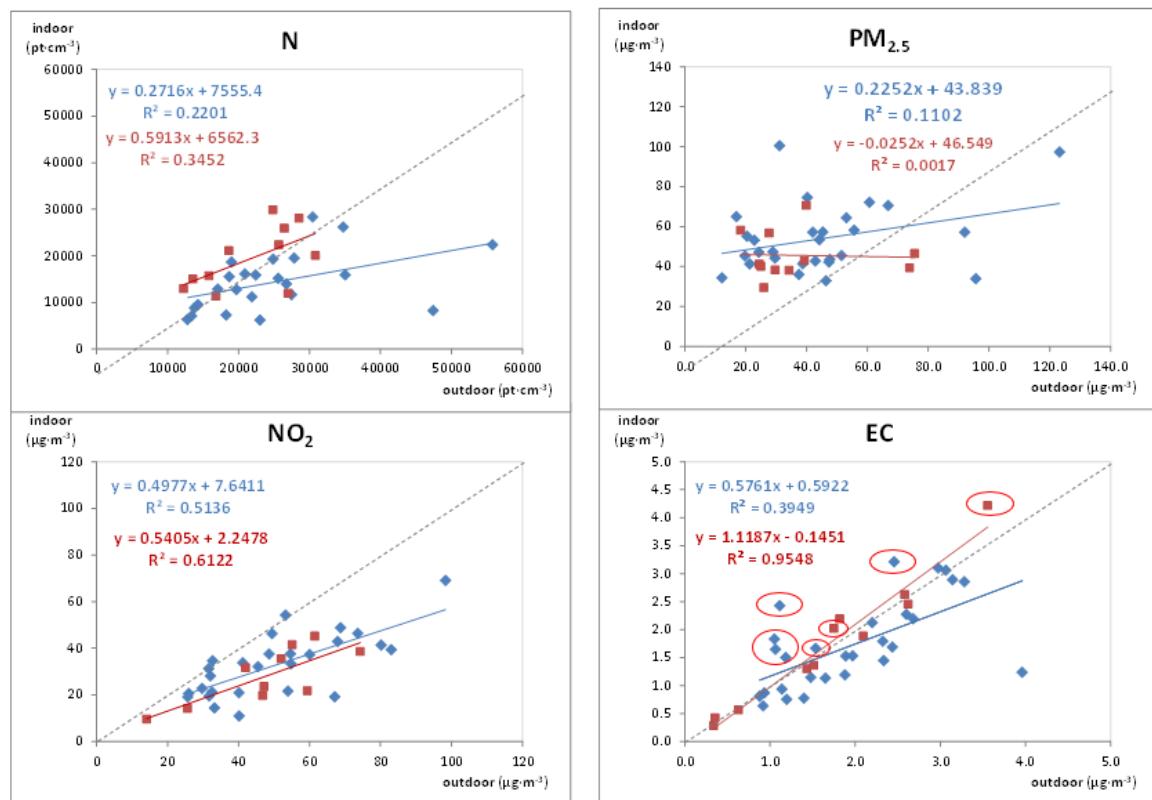


Figura 9.16. Correlaciones de las concentraciones de partículas ultrafinas (N), PM_{2.5}, NO₂ y carbono elemental (EC) observadas en el patio de escuelas (outdoor) y en el interior de aulas (indoor), diferenciando períodos con ventanas abiertas y cerradas. Adaptado de Rivas et al. (2015).

- Promover el transporte activo o el transporte público para ir y volver de la escuela. Organizando un transporte escolar colectivo o creando aparcamientos seguros para bicicletas y patinetes.
- Permitir que los estudiantes puedan entrar de forma escalonada.
- Limpiar las aulas después del horario escolar (abriendo las ventanas) y seleccionar un producto de limpieza 'verde' puede disminuir específicamente la exposición a partículas ultrafinas y a compuestos orgánicos volátiles (COVs).
- Limpiar y reemplazar la arena de los patios de recreo periódicamente. Los patios de recreo sin pavimentar contribuyen significativamente a las concentraciones de PM_{2.5} debido a la resuspensión del polvo. En Amato et al. (2014), los autores reportaron concentraciones de PM_{2.5} de 16.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en patios no pavimentados frente a 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en patios pavimentados. Esta diferencia también era muy significativa en el interior de las aulas, con concentraciones en las aulas cercanas a patios no pavimentados en torno a 5-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ más elevadas (Figura 9.17).

Fuentes minerales

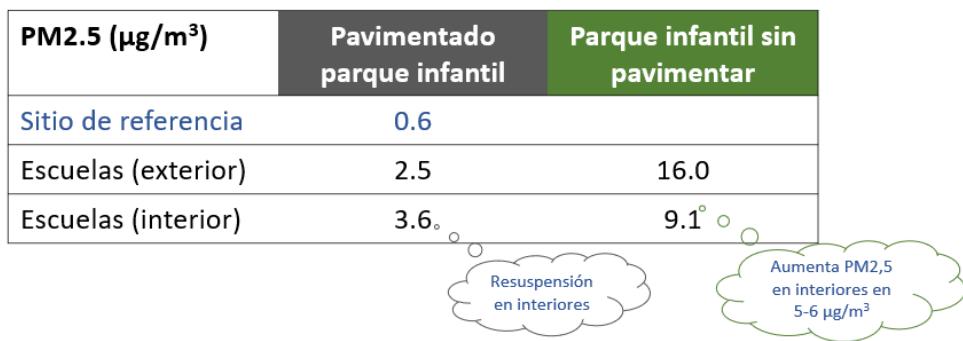


Figura 9.17. Concentraciones de PM2.5 en patios escolares pavimentados y sin pavimentar. Datos de Amato et al. (2014) y Rivas et al. (2015).

- **Ecologizar y conseguir más espacio para la ciudadanía.** Transformar las infraestructuras urbanas, como calles y plazas, en espacios verdes accesibles al público e implementar políticas que limiten el espacio destinado a los vehículos y lo destinen a áreas peatonales y verdes. Ejemplo de ello son ciudades como Pontevedra, Vitoria, Oviedo y Valencia. Además, la ciudad de Madrid ha implementado el proyecto [Madrid Río](#), que transformó una autopista en un parque lineal a lo largo del río Manzanares, creando más espacio verde y áreas recreativas para los ciudadanos. También el proyecto [Superilles](#) (Supermanzanas) en Barcelona es un buen ejemplo. Estas zonas restringen el tráfico vehicular en espacios urbanos de 500x500m², permitiendo solo el acceso de residentes y servicios esenciales, y aumentan significativamente los espacios verdes y las áreas para peatones y ciclistas (Mueller et al., 2020). Otra forma de conseguir más espacio para la ciudadanía es organizando eventos de **cierre de calles para aire limpio**, como organizar eventos regulares donde se cierren ciertas calles al tráfico motorizado, promoviendo actividades peatonales y recreativas. Con esta medida se pretenda incentivar el uso del transporte público y/o activo, de tal manera que el cierre de esas calles no suponga cargar de más tráfico las calles adyacentes, sino disminuir la dependencia del coche particular como medio de desplazamiento por ocio.
- **Fomentar el transporte activo** (peatonal y en bicicleta). Mejorar y expandir las infraestructuras para peatones y ciclistas, como carriles bici seguros y amplios, zonas peatonales, y facilidades para el estacionamiento de bicicletas. Incentivar el uso de bicicletas y caminar mediante programas y campañas educativas, así como mediante políticas de movilidad urbana que prioricen estos modos de transporte. Un ejemplo es el de la implementación de calles completas (*Complete Streets*) en Nueva York, donde se reconfiguran las calles para incluir espacios seguros y accesibles para peatones y ciclistas, reduciendo el espacio destinado a vehículos. Una forma de fomentar el transporte activo es **promocionar la creación de carril bici y sistemas de alquiler de bicicletas**. Cada vez que una persona hace la elección de desplazarse en bicicleta en la ciudad, en vez de hacerlo en automóvil, no es ella sola quien recibe los beneficios de su acción, sino la sociedad entera (Puig, 1999). Es por eso que los sistemas de bicicletas compartidas ayudan a fomentar el uso (como por ejemplo dejar su alquiler gratuito temporalmente para incentivar su uso y familiarizarse) y la concienciación a favor de la movilidad sostenible. En este sentido, la creación y promoción del carril bici en las ciudades puede ayudar a reducir la congestión del tráfico al fomentar la adopción de medios de transporte alternativos al automóvil. Además, los

carriles bici adecuadamente diseñados y señalizados (separar físicamente a los ciclistas del resto del tráfico, incorporación de semáforos específicos para ciclistas, etc) contribuyen a mejorar la seguridad vial tanto para los ciclistas como para los peatones y conductores, reduciendo los riesgos de accidentes y proporcionando un entorno más seguro para todos los usuarios de la vía. De esta forma, mejores infraestructuras, tecnología y políticas adecuadas pueden favorecer el uso de los sistemas de bicicletas compartidas (Sanmiguel-Rodríguez y Arufe, 2021). Un ejemplo es la ciudad de Boston, donde el número de usuarios de bicicletas compartidas se triplicó en aquellas rutas que utilizaban el carril bici segregado (Karpinski, 2021).

- Medidas destinadas al **fomentar transporte activo escolar**, como por ejemplo organizar grupos de alumnos que caminen o vayan en bicicleta (bici-bus) juntos a la escuela bajo la supervisión de adultos voluntarios.
- Descentralizar las ciudades, promocionando las **ciudades de los 15 minutos**, de forma que la mayoría de las necesidades y servicios de los ciudadanos (como el trabajo, la compra, la educación, los centros de salud o el ocio) se encuentren a distancias caminables o en bicicleta menores a 15 minutos desde cualquier punto de la ciudad (Moreno et al., 2021), reduciendo así los desplazamientos en otro tipo de vehículos, lo que implica una mejora en la calidad del aire y en la vida de las personas a nivel medioambiental, económico y social (Figura 9.18).



Figura 9.18. Beneficios de la ciudad de 15 minutos a nivel social, económico y medioambiental. Adaptado de Khavarian-Garmsir et al. (2023).

También es importante tener en cuenta otros factores que pueden influir en la mejora de la calidad del aire y el rediseño urbano, como:

- Introducir medidas de **control en la recogida de residuos**. Los contenedores orgánicos llenos y expuestos todo el día al calor son una fuente significativa de NH₃ en ambientes urbanos, como se identificó en Reche et al. (2012). Este NH₃ puede ser un precursor importante de PM2.5 secundario. Por este motivo, se recomienda implementar contenedores con sistemas de control de apertura, programados para su uso nocturno mediante tarjeta identificativa o subterráneos. También sería necesario optimizar la frecuencia de vaciado según la generación de residuos y condiciones climáticas, utilizando sistemas de monitoreo de llenado. Todo esto tendría que ir acompañado de un fomento del correcto uso de contenedores orgánicos, la separación de residuos en origen y el compostaje doméstico o comunitario. Por otro lado, orinar (personas y mascotas) en la vía pública también puede generar altos niveles de emisión de NH₃, así como las fugas del sistema de alcantarillado. Sería necesario, por tanto, una campaña de concienciación entre la población para evitar que se orine en la vía pública, fomentar la limpieza de los orines de las mascotas, instalar urinarios públicos más accesibles y un correcto mantenimiento de la red de alcantarillado.
- Mejorar la **climatización de viviendas** para reducir emisiones de las calefacciones y aires acondicionados, y sustituirla por sistemas de calefacción que no dependan de la combustión, como:
 - Bombas de calor reversibles, son máquinas que transfieren calor entre un foco externo y un foco interno (vivienda en el caso de climatización). En función de la fuente de calor externa se distingue entre: i) sistemas geotérmicos en los que esta fuente externa es el subsuelo; ii) sistemas de aerotermia en los que la fuente externa es el aire ambiente. Estos equipos consumen electricidad, y tienen un coste de instalación elevado (mayor en geotermia), pero presentan una elevada eficiencia energética, se amortizan a largo plazo, evitan emisiones locales, y si la energía eléctrica es renovable contribuyen a reducir las emisiones de efecto invernadero.
 - Sistemas de autoabastecimiento con energía solar: su funcionamiento requiere de la instalación de paneles fotovoltaicos o paneles solares térmicos, lo que hace que la inversión inicial sea elevada, pero permite disponer de electricidad o agua caliente, respectivamente, de fuentes renovables sin emisiones.
 - Alimentación eléctrica de un suministro externo mayoritariamente de origen renovable.

9.1.3 Otras medidas eficientes sobre el tráfico y la movilidad

- **Transporte público eléctrico.** Entre los medios de transporte públicos que son 100% eléctricos, están algunos autobuses, el tranvía y el metro, por lo que sería recomendable priorizar estos medios de transporte cuando sea posible. Sin embargo, no todas las ciudades disponen de este sistema de transporte, por lo que, si se usan autobuses y/o trenes de cercanías, sería aconsejable avanzar hacia la electrificación de estos medios, para reducir las emisiones en las ciudades.
- Fomentar el **teletrabajo**, en aquellos puestos en los que sea posible, y no solo en episodios de contaminación. Badia et al. (2021) analizó diferentes propuestas de implantación del teletrabajo a partir de los datos obtenidos de un modelo de calidad del aire junto con las medidas de las estaciones XPCA (Red de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica de Cataluña)

registradas en el Área Metropolitana de Barcelona (AMB) durante el período de restricción obligada de la movilidad por el confinamiento por el COVID-19. Teniendo en cuenta que el 85% de los trabajadores del AMB se dedica al sector servicios y que cerca del 40% del tráfico de vehículos personales está relacionado con el trabajo, se plantearon tres escenarios sociolaborales diferentes en base a la implantación de dos, tres o cuatro días semanales de teletrabajo, y estudiaron los cambios en la contaminación con un modelo de calidad del aire para cada uno, de tal forma que, implantar un sistema de teletrabajo de dos, tres o cuatro días a la semana permitía reducir los niveles de NO₂, en un 4%, un 8% y un 10%, con una disminución de los desplazamientos laborales entorno al 12.5%, 25% y 37.5% si se acogen al plan un 20%, 30% y 40% de los empleados del sector servicios, respectivamente. Por tanto, favorecer el teletrabajo favorece la mejora de calidad del aire al disminuir el número de desplazamientos.

- **Reducir** al máximo el espacio destinado a **aparcamiento** en centros de **trabajo**, para favorecer el uso de transporte público como medio de desplazamiento, así como incrementar marcadamente la **inclusión del transporte a la empresa y desde la empresa en los convenios laborales de las empresas**, reduce la dependencia de los vehículos privados y se facilita un transporte de empresa cómodo para los empleados. También se pueden **fomentar** prácticas de **transporte sostenible** mediante la integración en los contratos de trabajo, lo cual permite abordar las preocupaciones medioambientales y promover el bienestar de los empleados. Estas pueden incluir:
 - Subvenciones al transporte público: Fomentar el uso del transporte público cubriendo o reintegrando parcialmente el coste de los billetes de autobús, tren o metro.
 - Incentivos para el transporte activo por empresas: Promover el ciclismo y la marcha a pie ofreciendo compensaciones económicas o recompensas a los empleados que opten por estos modos de transporte activo.
- Fomentar prácticas de **conducción sostenible** (Mensing et al., 2014) que ahorren combustible (como evitar el ralentí, la aceleración suave, evitar acelerar y frenar demasiado rápido siempre que sea posible, mantener una velocidad constante, etc.), puede ser también un aspecto crucial de las estrategias de mitigación de la contaminación del aire urbano, especialmente en ciudades con alta densidad de población. Esta manera de conducción favorece la reducción de las emisiones de gases de escape, disminuye el desgaste del vehículo y supone un aumento de la seguridad. Implementar programas de incentivos para premiar a los conductores que adoptan prácticas de conducción ecológica y demuestran una mejor eficiencia de combustible podría ser una propuesta interesante para conseguir que más personas se sumen a esta manera de conducción. En el caso de los **taxis**, además, es aconsejable incidir en la planificación optimizada de rutas (minimiza el tiempo en ralentí), acortar el tiempo de conducción, y disminuir una circulación libre en busca de pasajeros.
- Baldeo de calles, con agua subterránea, o barrido con barredoras de aire regenerativo, como medida de reducción de los niveles de contaminación al disminuir la acumulación de polvo y partículas en el ambiente. El polvo de la carretera es una fuente demostrada de contaminación atmosférica urbana. Por ello, la aplicación de estrategias de baldeo/barrido de calles que limiten eficazmente la acumulación y resuspensión del polvo de la carretera por el tráfico rodado debe ser una prioridad de salud pública. Este polvo contiene metales y compuestos orgánicos del desgaste de frenos, ruedas y firme de rodadura que afectan tanto a PM10 como a PM2.5 cuando la circulación del tráfico produce turbulencias y emite las partículas depositadas (Amato, 2018).

Das y Wiseman (2024) examinaron la eficacia del barrido municipal de las calles para eliminar las partículas depositadas en la calzada y los metales(loides) de interés para la salud respiratoria, y descubrieron que la eficacia media del barrido fue del 76 % para partículas de tamaño torácico ($<10 \mu\text{m}$, y que éste eliminó eficazmente entre el 35% y el 65% de los metales(loides) de las vías arteriales, aunque la eficacia del barrido de calles se veía afectada por la calidad del firme (dependiente en gran parte de su estado de conservación). El estudio subraya la importancia de adaptar localmente los niveles de servicio y las tecnologías de barrido en función de la calidad de la superficie de la calzada y los patrones de tráfico, aunque es esencial seguir esforzándose por mitigar en su origen las emisiones no procedentes de los gases de escape que suponen un riesgo para la salud respiratoria. En el caso del baldeo con agua, se aconseja seguir buenas prácticas y no hacerlo los días de lluvia. El baldeo no arrastra el PM10 y PM2.5 sino que al humedecer la superficie reduce la resuspensión. En este caso es muy importante aplicar el baldeo entre las 4 h y las 5 h de la madrugada, ya que Amato et al. (2012) muestran que, al cabo de ocho horas tras haber llovido, se recupera el 50% del potencial de resuspensión del PM. Si se aplica el baldeo a las 0 h, en hora punta del tráfico el efecto se verá muy reducido. Además, tanto el baldeo como la aspiración, con vehículos que tengan lavado interior del flujo de aire aspirado, es muy aconsejable posteriormente a los días de calima (aporte de polvo africano), dado que una vez depositado sobre el firme de rodadura, se resuspende continuamente. Amato et al. (2014) muestra la efectividad de los lavados y del uso de aglomerantes de polvo en firmes de rodadura, recomendando el baldeo por cuestiones económicas.

Por último, hay que tener en cuenta que las **medidas de control del tráfico** pueden tener efectos contrapuestos en diferentes contaminantes y esto debe ser evaluado. Un ejemplo ilustrativo es la reducción de la velocidad de circulación de 50 km/h a 30 km/h. Si bien esta medida puede disminuir las emisiones de PM10 en un 20% (por producir menos resuspensión de polvo de rodadura), paradójicamente, podría aumentar en la misma proporción las emisiones de NOx del motor (por utilizar marchas cortas). A pesar de este impacto negativo en la calidad del aire, cabe destacar que la reducción de la velocidad conlleva un beneficio considerable para la seguridad vial. No obstante, dependiendo del contaminante problemático se tendría que seleccionar una u otra medida.

9.2 Sector de la construcción

9.2.1 Contaminantes relevantes emitidos por el sector de la construcción

Las emisiones en las obras de construcción-demolición tienen diferentes fuentes, no sólo de las propias actividades de construcción y demolición, sino también de la maquinaria empleada, tanto estática como móvil, así como de los vehículos ligeros y pesados relacionados con la actividad (Tabla 9.1). Se puede distinguir, por tanto, diferentes tipos de emisiones, como:

- **Emisiones de polvo:** Se deben a la resuspensión de material excavado, material resuspendido durante la carga y descarga de camiones, material transportado durante las obras en carreteras pavimentadas y sin pavimentar y a la erosión eólica de las zonas que se han arado para la construcción.
- **Emisiones de combustión:** Incluye las partículas y gases emitidos por la maquinaria diésel y de gasolina utilizada durante la excavación y la construcción, por los camiones cisterna generadores de energía, compresores, bombas, etc., y también por los vehículos que transportan materiales dentro de la obra, los camiones que transportan materiales de construcción (cemento, etc.), y los vehículos del personal.

En base a esto, los **principales contaminantes de calidad del aire** generados por todas estas actividades son:

- **PM10** y **NOx** emitidos por la combustión de gasóleo y gasolina de la maquinaria empleada (transporte de materiales, equipos auxiliares de construcción y también transporte de personal).
- **PM10** mineral procedente de la resuspensión de las diferentes actividades de obras de construcción y, especialmente, de demolición. En esta fracción debe prestarse atención a la posible presencia de sílice cristalina respirable, que es un contaminante no contemplado en la legislación sobre calidad de aire, pero incluido como agente cancerígeno en la legislación sobre exposición laboral.
- **COVs** emitidos durante la pavimentación de carreteras y la aplicación de materiales orgánicos en estructuras y acabados en edificación (impermeabilizantes, adhesivos, sellados, etc.).

Tabla 9.1. Principales fuentes de emisiones de PM y NOx procedentes de las obras de construcción y demolición.

EMISIONES			
	DEMOLICIÓN	PRE-CONSTRUCCIÓN	CONSTRUCCIÓN
PM10	Demolición, carga y machaque o molienda	Movimientos de tierra	Transporte y manipulación de materiales
	Transporte y manejo de residuos	Extracción de materiales	Existencias de material
	Resuspensión de polvo depositado	Resuspensión de polvo depositado	Resuspensión de polvo depositado
	Resuspensión del suelo	Transporte y manejo de material	Corte de material seco
NO_x+PM10	Motores de maquinaria pesada	Motores de maquinaria pesada	Motores de maquinaria pesada
	Motores de camiones de transporte	Motores de camiones de transporte	Motores de camiones de transporte
	Generadores eléctricos	Generadores eléctricos	Generadores eléctricos

Respecto a las actividades que pueden generar contaminación atmosférica se pueden resumir en (Figura 9.19):

En la propia obra

- Demolición. Las demoliciones pueden emitir PM.
- Machaque de residuos en obra. Antes de transportar los residuos, o con el fin de reciclarlos se suelen machacar y ello emite PM.
- Resuspensión de polvo depositado al paso de camiones, que emite PM.
- Resuspensión por el viento de polvo depositado, que emite PM.
- Emisión de PM desde parvas o acopios de materiales finos.
- Carga y descarga de materiales en camiones, que emite PM.
- Corte de materiales, que emite PM.
- Emisiones de los motores de la maquinaria, camiones y otros vehículos que acceden o abandonan la obra, que emiten NOx y PM.
- Generadores eléctricos de combustión pueden emitir PM y NOx.
- Quemas de madera, que emiten PM y metales.

En los accesos y fuera de las obras

- Polvo depositado sobre diferentes partes del camión en las cargas, que emite PM durante su circulación.
- La propia carga del remolque del camión puede emitir PM si no está sellada (sin pérdidas) y si no está cubierta.
- La acumulación de camiones en vías de acceso a la obra emite grandes volúmenes de PM y NOx.
- El polvo depositado en los firmes de rodadura de calles adyacentes es resuspendido por el tráfico general.

EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA CONSTRUCCIÓN



Figura 9.19. Principales actividades que pueden generar contaminación atmosférica. Imágenes creadas mediante IA Canvas (Multimedia Mágico™).

9.2.2 Medidas eficientes

Los estudios de diagnóstico han permitido concluir que el PM mineral es también uno de los mayores contribuyentes al PM10 en fondo urbano, alcanzando en muchas ocasiones el 20% del PM10 del fondo urbano (Amato et al., 2016). Este PM mineral urbano proviene de emisiones de polvo de rodamiento del tráfico rodado y de las obras públicas y privadas de construcción/demolición y, en días concretos, de episodios de calimas.

Es recomendable que los ayuntamientos generen ordenanzas en base a las prácticas que más abajo se recomiendan, y hacer seguimiento del cumplimiento de estas. Así mismo, en episodios de contaminación los planes de acción a corto plazo deben contemplar la implementación de medidas que limiten las operaciones que generen contaminación elevada en las obras públicas y privadas de construcción y demolición.

A continuación, se detallan medidas específicas para reducir estas emisiones (resumidas posteriormente en la Tabla 9.2) en base a lo propuesto por Querol et al. (2012), AMB (2016) y AIRUSE (2018).

9.2.2.1 Medidas para la reducción de emisiones de PM dentro de la obra

Reducir emisiones de actividades de la obra

- **Demolición. Reducir la altura** desde la que cae el material tanto como sea posible al demoler cualquier construcción. Si no es posible bajar la altura, entonces la demolición debe realizarse en **diferentes etapas**. Debe **evitarse el uso de explosivos** debido a la gran cantidad de polvo que se produce durante las explosiones. Lo ideal es cargar los materiales más finos primero para su transporte. Si hay presencia de amianto en la construcción, debe gestionarse conforme a la normativa vigente y un gestor autorizado debe retirarlos antes de la demolición.
- **Utilizar aspersores durante la demolición y machaque de residuos**, que permitan reducir el polvo producido durante estas actividades, y evitar su resuspensión y dispersión.
- **Elección de los materiales de construcción para reducir las emisiones**. Siempre es preferible utilizar materiales prefabricados, ya que se transportan a la obra una vez terminados, reduciendo la producción de polvo mientras se construyen. Algunos ejemplos de materiales a utilizar en la construcción son los ladrillos y el hormigón proyectado (hormigón transportado a través de una manguera y proyectado neumáticamente a gran velocidad sobre una superficie). En cuanto a la pavimentación, es preferible utilizar materiales resistentes para reducir la necesidad de reparaciones frecuentes. En cualquier caso, la elección de la mejor capa de rodadura para reducir las emisiones dependerá principalmente de la intensidad del tráfico y de la proporción de cargas pesadas a las que vaya a estar expuesta la carretera.
- **Utilizar tolvas antipolvo o aspersores** durante las operaciones de carga y descarga de material que pueda emitir polvo. **Reducir al mínimo la altura** a la que se **carga** el material en los camiones. Además, la carga y descarga de materiales pulverulentos debe hacerse **lentamente**.
- **Cortar materiales y perforar con un flujo de agua** sobre el corte para reducir **emisiones de PM** (Figura 9.20). Durante las actividades de construcción tienen lugar numerosos procesos de fabricación, como el corte y la perforación de materiales de construcción. Estos procesos deben llevarse a cabo en zonas **protegidas del viento** y es necesario aplicar simultáneamente **agua** para reducir las emisiones dentro y fuera de la obra.

- **Controlar** la cantidad de lodo que se produce y transporta en y desde la obra, ya que puede aumentar considerablemente las emisiones de PM, especialmente en carreteras pavimentadas al producirse pérdidas del lodo durante su transporte si los remolques de los camiones no están perfectamente sellados.
- **Reducir el flujo de tráfico** a través de la obra y reservarlo a las zonas necesarias para cada actividad. La **velocidad** máxima de los vehículos debe limitarse a 10 km/h dentro de la obra, especialmente en terrenos no asfaltados. La emisión de polvo incrementa exponencialmente con la velocidad.
- **Humedecer** con frecuencia las zonas potenciales de emisiones en las vías de paso de camiones, las operaciones de excavación y manipulación (Figura 9.20). En la vía de la obra frecuentada por camiones se recomienda regar cada 1-2 h. Si las obras van a estar inactivas durante un tiempo, como por ejemplo durante el fin de semana o cualquier periodo superior a 3 días, deberá **aplicarse agua** al menos 3 veces durante el último día de trabajo en las zonas expuestas, o **un aglomerante químico** (acetato de calcio y magnesio, cloruro de magnesio, entre otros) diluido que mantenga la superficie estable durante más tiempo que el agua.
- **La maquinaria pesada** (grúas, excavadoras, apisonadoras, trituradoras, percutoras, ...), así como los **generadores eléctricos de combustión**, deberían contar con certificación de bajas emisiones para no incrementar las emisiones de PM y NOx.
- **Maximizar**, en la medida de lo posible, el **uso de maquinaria y herramientas eléctricas**.



Figura 9.20. Ejemplo de emisiones de polvo por paso de camiones y corte en seco (arriba) y de la disminución de las mismas mediante aplicación de agua (abajo).

Medidas para el almacenamiento/apilamiento de material

- **Confinar** la carga y descarga de material en zonas **protegidas del viento**, cubriendo parcial o totalmente los acopios en edificios de 3 paredes o en silos si el material es cemento, bentonita o cualquier otro material fino que pueda resuspenderse fácilmente (Figura 9.21). Si no es posible construir estas estructuras el material puede cubrirse con plástico que debe ser adecuado para condiciones de viento fuerte. En algunos casos, pueden construirse defensas porosas para reducir la velocidad del viento y, en consecuencia, reducir su potencial de resuspensión. Estas defensas pueden ser materiales vegetales o artificiales.

- **Regar** los acopios de material (ya sea con sistemas de riego directo o por aspersión manual o automática). En algunos casos, el agua produce una costra dura que disminuye la resuspensión del material.
- **Cubrir con vegetación** las zonas expuestas lo antes posible, regando la zona hasta que la vegetación se estabilice.



Figura 9.21. Restos de materiales de obra. Los materiales no están cubiertos ni irrigados, por lo que son susceptibles de resuspensión. Barcelona 2010.

Otras medidas adicionales en obra

- **Cubrir con vegetación** (preferiblemente hidrosiembra, Figura 9.22) las zonas no pavimentadas expuestas a la intemperie durante largos periodos antes del inicio de las actividades (solares de demolición, excavaciones, pistas, entre otros), así como los acopios de tierra u otros materiales polvorrientos. También las zonas finalizadas en los 10 días siguientes a la finalización de las obras, minimizando así el área expuesta a resuspensión. Cuando no sea posible cubrir con vegetación (por ejemplo, porque el suelo esté muy erosionado), se utilizarán otros materiales como la grava (que será de mayor tamaño en regiones ventosas para una mayor resistencia), tierra vegetal o materiales geotextiles.
- **No quemar** ningún material dentro del recinto. La quema de materiales de desecho (como material vegetal...) a bajas temperaturas implica una incompleta combustión y la consiguiente emisión de productos tóxicos. En muchos casos, estos materiales pueden **reutilizarse** en lugar de destruirse.
- **Cubrir con vallas** todo el perímetro de la obra, en especial la parte afectada por la dirección del viento prevalente, para proteger del viento. Las vallas pueden ser árboles, planchas de madera, balas de paja, paquetes, etc. que protejan el emplazamiento de la resuspensión y que impidan que las emisiones lleguen al exterior del emplazamiento.
- **Cambio de la capa de rodadura del pavimento.** En muchas ciudades, antes de la renovación de la capa de rodadura del pavimento, la capa de rodadura degradada se realiza mediante rascado repetido con cepillos mecánicos que permiten renovar la capa de rodadura sin afectar a la base de la carretera. Este rayado se suele realizar en un proceso continuo en el que el material triturado se carga en una cinta sinfín y se transporta hasta una altura determinada sobre el contenedor del camión y se suelta al aire para que caiga en el contenedor (Figura 9.23). En este

procedimiento (el cepillado de la capa de rodadura y la carga del contenedor), es recomendable utilizar un sistema de pulverización para **humedecer** la capa de rodadura durante el lijado para reducir emisiones durante el rascado y durante la carga del contenedor.



Figura 9.22. Efecto estabilizador del polvo en la superficie mediante hidrosiembra en la restauración de un talud. Imágenes cedidas por [Montaña Restauración Medioambiental S.L.U.](#)



Figura 9.23. Ejemplos de emisiones de polvo durante el rayado de la capa de rodadura y la carga del contenedor del camión.

9.2.2.2 *Medidas para el transporte de material*

Fuera de la obra, debido a emisiones de PM de la misma o del transporte de materiales, se producen emisiones que pueden afectar a los niveles de calidad del aire y acumular polvo en los firmes de rodadura circundantes que luego es resuspendido por el tráfico general (Figura 9.24). Se sugieren las siguientes medidas para evitar/reducir estos impactos:

- **Reducir** la necesidad de transporte en la medida de lo posible, por ejemplo, implementando medidas *in situ* de reutilización de residuos.
- **Fomentar** el transporte por barco y ferrocarril.
- Exigir una determinada **norma EURO mínima** para los camiones en base a etiquetaje de la DGT en los camiones.
- **Lavado de las calles** próximas a la obra. Esto debe hacerse al menos una vez al día, controlando el agua resultante para no saturar la superficie de las calles adyacentes pavimentadas o sin pavimentar.

- **Lavado de los camiones que presenten restos de materiales pulverulentos** (no sólo las ruedas y los bajos, sino también el resto del vehículo) antes de abandonar la zona de acceso a la obra. Los camiones que presenten suciedad deben lavarse cada vez que salgan de la obra. La zona de lavado también debe lavarse periódicamente (Figura 9.25).
- **Cubrir el compartimento de carga** de los camiones con lonas o un material similar, independientemente de si el camión está cargado o no. Si el material a transportar es muy fino, siempre es preferible utilizar camiones con el compartimento de carga cerrado.
- **Limitar la altura de carga**, dejando un espacio en la parte superior para evitar reboses por la parte superior de los compartimentos durante el transporte.



Figura 9.24. Ejemplo de polvo depositado en automóviles (izquierda) y carreteras (derechas) en zonas afectadas por obras de construcción/demolición. Barcelona, obras en el entorno de la estación del AVE Sagrera, 2010 (izquierda) y en Zona Universitaria obras líneas de metro 9 y 10, 2008 (derecha).



Figura 9.25. Zona habilitada para el lavado de los camiones antes de salir de la obra (Imágenes creadas mediante software Canvas- Multimedia Mágico™).

- Buen **mantenimiento del compartimento de carga**, que debe estar en buenas condiciones para evitar pérdidas de polvo durante el transporte, con un sellado adecuado del compartimento de carga, por ejemplo, en la puerta trasera en los tipos bañera.
- Reducir el **flujo de tráfico** a través de la obra y reservarlo a las zonas necesarias para cada actividad. La **velocidad** máxima de los vehículos debería limitarse a 15-25 km/h en las carreteras

circundantes, en la medida de lo posible. Deben colocarse numerosas señales que indiquen el límite de velocidad en las carreteras del recinto, orientadas en ambos sentidos de circulación para garantizar su visibilidad.

- **Diversificar vías de acceso/salida a las obras**, para evitar que se concentren las emisiones en unas calles concretas. No solo la posible pérdida de polvo de la carga sino las emisiones de PM y NOx de los vehículos pueden perjudicar mucho a la calidad del aire. Si se diseñan varios puntos de acceso esta contaminación puede diluirse.

Tabla 9.2. La primera tabla especifica el nivel de riesgo potencial de emisiones de material particulado en obras según características de sus fases principales. La segunda tabla describe medidas preventivas y paliativas para las actividades de demolición, movimiento de tierras, construcción y seguimiento obras de acuerdo con la clasificación de nivel de riesgo indicados en la primera tabla (adaptado de IAQM, 2014). Una doble cruz en la categoría significa un mayor grado de riesgo ambiental dentro de la misma, es decir, bajo-medio, medio alto o muy alto, entendiendo riesgo como la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas.

Fase de la obra	Nivel de Riesgo		
	Bajo	Medio	Alto
Demolición	Volumen total de material demolido < 10000 m ³ Material de construcción con bajo potencial de generación de polvo (placas metálicas) Actividades de demolición a <10m sobre el nivel del suelo	Volumen total de material demolido entre 10000 y 50000 m ³ Material de construcción susceptible de generar polvo Actividades de demolición entre 10 y 20m sobre el nivel del suelo	Volumen total de material demolido > 50000 m ³ Material de construcción con alto potencial de generación de polvo (hormigón) Actividades de demolición a > 20m sobre el nivel del suelo
	Superficie de la obra < 1000 m ² Suelo con medida de partícula grande (arenas) Necesarios < 5 vehículos de alta carga Apilamiento de tierras de <4 m de altura Materia total movida <10000 t	Superficie de la obra entre 1000 y 10000m ² Suelo con medida de partícula susceptible de general polvo (limos) Necesarios entre 5 y 10 vehículos de alta carga Apilamiento de tierras de entre 4-8 m de altura Materia total movida entre 20000 y 100000 t	Superficie de la obra entre > 10000m ² Suelo con medida de partícula muy pequeña (arcilla) Necesarios >10 vehículos de alta carga Apilamiento de tierras de > 8 m de altura Materia total movida >100000 t
	Volumen total de construcción <25000m ³ Material de construcción con bajo potencial de generación de polvo (placas metálicas)	Volumen total de construcción entre 25000 y 100000m ³ Material de construcción susceptible de generar polvo (cemento) Fabricación de hormigón <i>in situ</i>	Volumen total de construcción > 100000m ³ Material de construcción con alto potencial de generación de polvo (hormigón) Fabricación de hormigón <i>in situ</i> Chorro de arena
Transporte de material	< 10 viajes de vehículos pesados (>3.5t) en un día Superficie de circulación con bajo potencial de generar polvo Circulación por superficies no pavimentadas <50m	Entre 10 y 50 viajes de vehículos pesados (>3.5t) en un día fuera del ámbito de la obra Superficie de circulación susceptible de generar polvo (alto contenido en arcillas) Circulación por superficies no pavimentadas entre 50 y 100m	>50 viajes de vehículos pesados (>3.5t) en un día fuera del ámbito de la obra Superficie de circulación con bajo potencial de generar polvo (alto contenido en arcillas y limos) Circulación por superficies no pavimentadas >100m

Medidas preventivas y paliativas	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Alto
Gestión del sitio			
Desarrollar y aplicar un plan de comunicación con las partes interesadas que incluya la participación de la comunidad antes de que comiencen las obras.	XX	XX	
Elaborar un plan de gestión del polvo .	XX	XX	
Indicar el nombre y los datos de contacto de la(s) persona(s) responsable(s) de las emisiones contaminantes de la calidad del aire y del polvo en el límite del emplazamiento.	XX	XX	XX
Mostrar la información de contacto de la oficina central o regional.	XX	XX	XX
Celebrar reuniones periódicas de enlace con otras obras de construcción de alto riesgo situadas a menos de 500 m del límite de la obra, para garantizar la coordinación de los planes y minimizar las emisiones de polvo y partículas, con especial atención a los acuerdos adoptados.			XX
Realizar inspecciones periódicas de las instalaciones para supervisar el cumplimiento de los procedimientos de control de la calidad del aire y del polvo, registrar resultados de las inspecciones, proponer medidas correctoras en el caso de que se produzca desviaciones en cuanto a los procedimientos de control y revisión de las medidas correctoras propuestas para evaluar su grado de implantación y efectividad.	XX	XX	XX
Registrar y responder a todas las quejas sobre el polvo y la calidad del aire, e informar de las medidas aplicadas.	XX	XX	XX
Registrar cualquier incidente excepcional que cause problemas de polvo y calidad del aire, ya sea dentro o fuera de la obra, y la acción tomada para resolver la situación se registra en el libro de registro. Revisión de la medida implantada.	XX	XX	XX
Preparación y mantenimiento del sitio			
Planificar la disposición del emplazamiento: la maquinaria y las actividades que generan polvo deben situarse lejos de los receptores.	XX	XX	XX
Colocar pantallas o barreras sólidas alrededor de las actividades polvorrientas o de los límites de la obra que sean, como mínimo, tan altas como los acopios existentes en la obra.	XX	XX	XX
Cercar completamente el lugar o las operaciones específicas en las que exista un alto potencial de producción de polvo y el lugar esté activo durante un periodo prolongado.	X	XX	XX
Instalar muros verdes, pantallas u otras infraestructuras verdes para minimizar el impacto del polvo y otros contaminantes.		X	X
Evitar la escorrentía de agua o barro.	XX		XX
Mantener limpias las vallas, barreras y andamios de la obra utilizando métodos húmedos.	X	XX	XX
Retirar los materiales polvorrientos del lugar lo antes posible.	X	XX	XX
Cubrir, sembrar o vallar los acopios para evitar el azote del viento.		XX	XX
Realizar comprobaciones periódicas de la suciedad por polvo de los edificios situados a menos de 100 m de los límites del emplazamiento y proceder a su limpieza en caso necesario.	X	XX	
Acordar con la autoridad local los lugares de control .		XX	XX
Siempre que sea posible, comenzar el seguimiento de referencia al menos tres meses antes del inicio de la fase.		XX	XX
Establecer controles de polvo y otros contaminantes en tiempo real en todo el emplazamiento y asegurarse de que se comprueban periódicamente.		XX	XX
Manejo de vehículos/maquinaria y desplazamientos sostenibles			
Garantizar que todos los vehículos de carretera cumplan los requisitos de la Zona de Bajas Emisiones.	XX	XX	XX
Hacer lo posible para que todas las máquinas móviles no de carretera (MMNC) tengan las menores emisiones posibles.	XX	XX	XX
Específico para demolición			
Revestimiento suave del interior de los edificios antes de la demolición (muros de contención y ventanas en el resto del edificio cuando sea posible, para proporcionar una pantalla contra el polvo)	X	X	XX
Garantizar el uso de agua de extinción durante las operaciones de demolición.	XX	XX	XX
Evitar las voladuras explosivas , utilizando alternativas manuales o mecánicas adecuadas.	XX	XX	XX

Específico para actividades de movimiento de tierras			
Revegetar los movimientos de tierra y las zonas expuestas/apilamientos de tierra para estabilizar las superficies.		X	XX
Utilizar tejido de arpillería, mantillos o aglutinantes cuando no sea posible revegetar o cubrir con tierra vegetal.		X	XX
Retirar las cubiertas de seguridad sólo en pequeñas zonas durante el trabajo y no todas a la vez		X	XX
Específico para construcción			
Evitar, en la medida de lo posible, el raspado de las superficies de hormigón y asfalto.	X	X	XX
Garantizar que la arena y otros áridos se almacenan en zonas cubiertas y que no se dejan secar, a menos que sea necesario para un proceso concreto, en cuyo caso se adoptarán medidas de control adicionales adecuadas.	X	XX	XX
Garantizar que el cemento a granel y otros materiales en polvo fino se entregan en camiones cisterna cerrados y se almacenan en silos con sistemas de control de emisiones adecuados para evitar el escape de material y el sobrelleñado durante la entrega.		X	XX
Para pequeños suministros de materiales en polvo fino, asegurarse de que las bolsas se cierran herméticamente después de su uso y se almacenan adecuadamente para evitar el polvo.		X	X
Específico para actividad de seguimiento			
Utilizar periódicamente una barredora de polvo asistida por agua en las carreteras de acceso y locales, según sea necesario, para eliminar cualquier material arrastrado fuera de la obra. El agua debería de ser freática no potable.	X	XX	XX
Evitar el barrido en seco de grandes superficies.	X	XX	XX
Garantizar que los vehículos que entren y salgan de las obras estén cubiertos de forma segura para evitar el escape de materiales durante el transporte.	X	XX	XX
Registrar todas las inspecciones de las rutas de transporte y cualquier acción subsiguiente en un libro de registro del emplazamiento.		XX	XX
Instalar rutas de transporte de superficie dura, que se humedezcan regularmente con sistemas de aspersión fijos o móviles y se limpian periódicamente.		XX	XX
Inspeccionar la integridad de las rutas de transporte e instigar las reparaciones necesarias en la superficie tan pronto como sea razonablemente posible.		XX	XX
Implantar un sistema de lavado de ruedas (con rejillas rugosas para desalojar el polvo y el barro acumulados antes de abandonar del emplazamiento, siempre que sea razonablemente factible), y todo el vehículo si es necesario. Limpiar periódicamente .	X	XX	XX
Garantizar la existencia de una zona adecuada de carretera asfaltada entre la instalación de lavado y la salida del emplazamiento , siempre que el tamaño y la distribución del emplazamiento lo permitan.		XX	XX
En la medida de lo posible, las puertas de acceso se situarán al menos a 10 m de los receptores.		XX	XX
Aplicar supresores de polvo en los lugares donde un gran volumen de vehículos entra y sale de la obra.		X	XX

9.3 Industria y generación eléctrica

Las actividades industriales (incluyendo en este capítulo la generación eléctrica) producen emisiones atmosféricas que pueden tener un impacto significativo sobre la calidad del aire y la salud humana, así como sobre el medio ambiente. Entre los contaminantes emitidos por la industria se distinguen dos grupos según su principal impacto: i) gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2) o el metano (CH_4); y ii) contaminantes que deterioran la calidad del aire, dañando la salud humana y afectando al medio ambiente. En este capítulo se van a abordar las medidas tendentes a controlar prioritariamente las emisiones industriales del segundo grupo. No obstante, aunque pueden provenir de motivaciones distintas, las acciones para alcanzar los objetivos de descarbonización y las tendentes a minimizar las emisiones de contaminantes que deterioran la calidad del aire están, en muchas ocasiones, fuertemente interrelacionadas. De hecho, el desarrollo y grado de implantación de las diferentes tecnologías de descarbonización van a ser un factor decisivo en la evolución de las emisiones industriales, como ya lo está siendo en el sector de generación eléctrica.

9.3.1 Contaminantes relevantes emitidos por la industria y la generación eléctrica

Los **contaminantes de origen industrial** son muy variados debido al elevado número de materias primas y procesos de los que pueden proceder. En general, los contaminantes atmosféricos pueden clasificarse en función de diferentes parámetros, por ejemplo, su origen (natural o antropogénico), el proceso de emisión y su naturaleza.

Clasificación según el proceso de emisión

La agrupación de los contaminantes, en función del proceso de emisión, es la siguiente:

- **Contaminantes primarios:** aquellos que proceden directamente de la fuente de emisión como por ejemplo las cenizas de carbón procedentes de una central térmica.
- **Contaminantes secundarios:** aquellos originados en la atmósfera a partir de precursores primarios como por ejemplo el O_3 producido en la atmósfera a partir de COV y NO_x en presencia de luz solar.

Clasificación según su naturaleza

Los contaminantes, en función de su naturaleza química, se pueden clasificar en **material particulado o aerosoles** (incluye partículas sólidas o líquidas) y **contaminantes gaseosos**. Las características del material particulado que más definen los posibles impactos de la contaminación atmosférica sobre el medio son: el tamaño de sus partículas, la morfología y la composición química (Hinds, 1999; McKenna et al., 2008; Baron et al., 2011; Celades, 2013). El tamaño de partícula es considerado el parámetro más importante para caracterizar el comportamiento de las partículas, así como su afección sobre la salud humana y sobre el medio ambiente. En el caso de estudios de calidad de aire y de emisiones industriales, las fracciones granulométricas consideradas son PST (partículas en suspensión totales), PM10 y PM2,5.

Dependiendo de su origen, la composición química del material particulado varía de unas partículas a otras. Así, la composición de las partículas procedentes de focos industriales dependerá del

proceso productivo, de su naturaleza y del flujo de materias primas y combustibles, de las condiciones de operación y de la presencia de otros contaminantes.

Los **contaminantes gaseosos** pueden clasificarse en función de su naturaleza en compuestos inorgánicos y compuestos orgánicos. Una segunda clasificación, habitualmente utilizada, es agruparlos según el elemento principal del contaminante; en este sentido se pueden clasificar, por ejemplo, en compuestos de azufre, de nitrógeno, de carbono o halógenos.

Existe una interconexión entre las distintas categorías planteadas, dado que puede haber una amplia diversidad de compuestos que pertenecen a dos o más familias simultáneamente, como en el caso de los compuestos de carbono orgánico halogenados.

Los contaminantes de interés en esta guía incluyen: el material particulado (PM), los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COVs), el monóxido de carbono (CO), y metales pesados, tales como el níquel (Ni), el cadmio (Cd), el arsénico (As), el plomo (Pb) o el mercurio (Hg).

Otros aspectos importantes en la clasificación de las emisiones de los procesos industriales, que determinan en gran medida las posibles técnicas de tratamiento son: i) **forma de emisión**, en este sentido se distinguen entre emisiones no canalizadas (difusas, incluyendo las emisiones fugitivas y no-fugitivas) y emisiones canalizadas, las que se emiten a través de conductos; ii) la **temperatura de emisión**, sobre todo en las emisiones canalizadas, en este sentido se pueden clasificar en: emisiones frías (a temperaturas próximas a la temperatura ambiente) y emisiones calientes (a temperatura netamente superiores a la temperatura ambiente, porque proceden de procesos con calentamiento eléctrico o de combustión).

Según estos criterios se puede establecer varias clasificaciones. En la Tabla 9.3 se muestra una clasificación como ejemplo.

Tabla 9.3. Ejemplos de diferentes contaminantes industriales, incluyendo clasificación y origen.

Contaminante	Clasificación de la emisión	Origen industrial
Material particulado	No canalizada	<ul style="list-style-type: none"> Almacenamiento y manipulación de materiales pulverulentos al aire libre Transporte de materiales pulverulentos
	Canalizada fría	<ul style="list-style-type: none"> Almacenamiento y manipulación de materiales pulverulentos Procesado mecánico de materiales (corte, pulido, desbaste, otros)
	Canalizada caliente	<ul style="list-style-type: none"> Partículas de procesos de combustión con combustibles líquidos pesados o sólidos Partículas del arrastre mecánico en procesos de alta temperatura
Gases	No canalizada	<ul style="list-style-type: none"> Fugas de gases en sistemas de almacenamiento y transporte Procesado de compuestos volátiles en espacios abiertos (recubrimientos, sistemas de depuración)
	Canalizada fría	<ul style="list-style-type: none"> Compuestos gaseosos evaporados en procesos a temperatura ambiente Emisiones de gases refrigerantes
	Canalizada caliente	<ul style="list-style-type: none"> Gases de procesos de combustión Gases de procesos de descomposición térmica Compuestos volátiles de procesos de evaporación, destilación o tratamientos de polimerización a alta temperatura

9.3.2 Marco legislativo en la UE para actividades industriales: proceso de Sevilla

9.3.2.1 Marco legislativo básico para actividades industriales

La legislación relativa a la calidad de aire se ha tratado en detalle en la presente guía junto con la gestión actual de algunas fuentes de emisión específicas que presentan legislación dirigida a reducir las emisiones de los contaminantes atmosféricos generados por las mismas (tráfico, pinturas y renovación del acabado de vehículos, etc.).

La mayor parte de países europeos tenían marcos legislativos tendentes a regular las emisiones industriales desde la segunda mitad del siglo XX, pero hasta la década de 1990 las exigencias ambientales presentaban diferencias muy relevantes, particularmente en emisiones atmosféricas y en calidad de aire. A partir de la creación de la UE (Tratado de Maastricht en 1993), se dio un gran impulso al desarrollo de un marco normativo comunitario progresivamente más homogéneo y exigente, en el que se ha promovido la implantación de las tecnologías más avanzadas para minimizar el impacto de las actividades industriales, en todos sus ámbitos, incluyendo obviamente las emisiones atmosféricas. El punto de inflexión fue, sin duda, la publicación de la Directiva 96/61 relativa a la Prevención y Control Integrados de la Contaminación, más conocida como Directiva IPPC, que estableció un marco de referencia común dentro del ordenamiento jurídico ambiental para las actividades industriales.

Uno de los conceptos de aplicabilidad legal relacionados con las actividades industriales y su impacto medioambiental más relevante -que nació con la publicación de la Directiva 96/61/CE (Prevención y Control Integrado de la Contaminación, conocida por sus siglas en inglés como IPPC)- es el concepto de mejor técnica disponible (MTD). La definición e identificación de las MTDs es fundamental, ya que son los elementos básicos del sistema de autorización ambiental, a partir de

los cuales se establecen los criterios a adoptar y los valores límite de emisión (VLE), y por tanto definen cómo deben diseñarse las actividades industriales, para que operen bajo las técnicas más óptimas alcanzables desde el punto de vista ambiental, con el objetivo último de que no impacten negativamente al ambiente o, en su defecto, dicho impacto sea el menor posible y que sean viables desde el punto de vista económico y técnico para la prevención y el control de las emisiones.

Las MTDs (cuyas siglas en inglés son BAT -*Best Available Technique*-) se identifican para cada sector de actividad, a través del denominado **Proceso de Sevilla** (Retsoulis et al., 2024). Este proceso, que nació con la Directiva IPPC, se desarrolla de forma colaborativa entre todos los agentes implicados de la UE (fabricantes, administraciones implicadas, grupos de interés, etc.), con criterios de transparencia (todos los documentos generados son públicos), y es un proceso gestionado directamente por el Centro Común de Investigación (cuyas siglas en inglés son JRC -*Joint Research Centre*) de la CE (accesible en <https://joint-research-centre.ec.europa.eu/>).

Este proceso de identificación de MTDs da lugar a documentos de referencia sobre las MTD (cuyas siglas en inglés son BREF -*Bat REference*-) (accesibles en Oficina Europea de Investigación sobre la Transformación Industrial y las Emisiones (EU-BRITE), <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/es/>), que ayudan a formar las conclusiones sobre las MTD (BAT_C). Las BAT_C son decisiones de ejecución adoptadas por la Comisión que sirven de base para la elaboración de las condiciones que deben incluirse en los permisos expedidos por parte de las autoridades competentes de los Estados miembros, al autorizar instalaciones industriales, incluidos los valores límite de emisión (VLE). Los permisos también pueden contener requisitos cuantitativos vinculantes de eficiencia de los recursos para los materiales, el agua y la energía, según corresponda, para abordar mejor los desafíos de la escasez de agua y la generación de residuos.

Los documentos BREF cubren las actividades industriales y agroindustriales a gran escala incluidas en el anexo I de la Directiva sobre emisiones industriales (2010/75/UE), aproximadamente 75.000 en toda la UE. Cada BREF contiene un capítulo con las conclusiones sobre las MTDs para un sector determinado. Incluyen, normalmente una breve descripción de las que se han identificado, cómo se aplican y los niveles de emisión, consumo o generación asociados (por ejemplo, generación de residuos o vertido de agua). Las conclusiones sobre estas técnicas se publican en el Diario Oficial de la Unión Europea. Las conclusiones MTD son la referencia en los Estados miembros de la UE para establecer valores límite de emisión y autorizar el funcionamiento a las instalaciones industriales.

La mayoría de los BREFs son sectoriales y abarcan las actividades de un sector industrial o agroindustrial específico. Sin embargo, también hay una serie de «BREF horizontales» que abordan cuestiones transversales como la eficiencia energética, los sistemas de refrigeración industrial o las emisiones procedentes del almacenamiento, con relevancia para la fabricación industrial en general.

9.3.2.2 Directiva de emisiones industriales (DEI 2.0)

En la actualidad, para la regulación europea de las emisiones industriales existen, principalmente, los siguientes instrumentos: Directiva 2010/75/EU sobre emisiones industriales (revisada en 2024 por la Directiva 2024/1785, conocida como DEI 2.0), que incluye los requisitos de permiso y control de las instalaciones industriales y supone el marco normativo más importante en materia de emisiones industriales; la Directiva 2015/2193, sobre medianas instalaciones de combustión (MIC);

la Directiva 1994/63/EU y la Directiva 2009/126/EU, sobre distribución y almacenamiento de gasolina; y el nuevo Reglamento sobre el Portal de Emisiones Industriales (*Industrial Emissions Portal Regulation (UE) 2024/1244, IEPR*) que entró en vigor el 22 de mayo de 2024.

El IEPR, que sustituye al reglamento E-PRTR, establece el marco para los requisitos legales de información de las instalaciones industriales en la UE. Los objetivos del reglamento son mejorar el acceso público a la información ambiental de las instalaciones industriales mediante la creación de un Portal de Emisiones Industriales (EEA, 2022), facilitando así la participación del público en la toma de decisiones en materia de medio ambiente y detectando las fuentes de contaminación industrial, y permitir el seguimiento de la contaminación industrial para contribuir a su prevención y reducción. Dicho Portal abarca más de 60 000 emplazamientos industriales de 65 actividades económicas en toda Europa enmarcadas en nueve sectores.

El portal muestra la ubicación y los datos administrativos de los sitios, así como las emisiones y transferencias de sustancias reguladas al aire, al agua y al suelo, y las transferencias de residuos. En el caso de las grandes instalaciones de combustión (GIC), hay datos más detallados sobre el consumo de energía y las emisiones.

Por tanto, la nueva Directiva (UE) 2024/1785, de 24 de abril de 2024, conocida como DEI 2.0, es el principal instrumento de la UE para reducir estas emisiones a la atmósfera, al agua y al suelo, y para evitar la generación de residuos procedentes de las instalaciones industriales que estén dentro de su ámbito de aplicación, incluyendo las explotaciones ganaderas intensivas de porcino y de aves de corral. La DEI 2.0 introduce una serie de requisitos, algunos de los cuales suponen una ampliación importante con respecto a la normativa anterior. Entre las novedades que plantea la DEI 2.0 cabe destacar:

- Se amplía el alcance de los BREF para dar respuesta al conjunto de políticas europeas de carácter ambiental, de forma que integre, por ejemplo, las políticas en materia de descarbonización, de eficiencia en el uso de los recursos y de los principios de economía circular
- No solo se establecen niveles de emisión asociados a las MTD (BAT-AEL, por sus siglas en inglés), sino también niveles de desempeño medioambiental asociados a las MTD (BAT-AEPL, por sus siglas en inglés) y rangos de referencia indicativos que pueden incluir niveles de consumo, niveles de eficiencia en el uso de los recursos y niveles de reutilización correspondientes a los materiales, el agua y los recursos energéticos, así como residuos. Además, se promueve el cumplimiento del valor más estricto del rango BAT-AEL asociado a una MTD determinada, salvo excepciones que deben ser justificadas adecuadamente.
- Las conclusiones sobre las MTD deben determinar las técnicas emergentes y las mejores técnicas disponibles que los titulares industriales puedan aplicar.
- Al establecer los VLE para las sustancias contaminantes, se deben incluir las nuevas sustancias preocupantes que puedan tener una repercusión importante en el medio ambiente o la salud humana. La lista de contaminantes a considerar será la contenida en el anexo II del Reglamento (CE) 166/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo. Como se ha indicado anteriormente en EEA (2022) se puede consultar el índice de contaminantes asociados a las actividades industriales.
- Se plantea una promoción de la innovación y la transformación mediante la creación en 2024 del Centro de Innovación para la Transformación Industrial y las Emisiones (INCITE, por sus siglas

en inglés). El INCITE tiene por objeto identificar y evaluar el rendimiento medioambiental de las técnicas industriales innovadoras en Europa y fuera de ella para la descarbonización, la descontaminación o para aumentar la eficiencia de los recursos (por ejemplo, la eficiencia hídrica y energética) y la circularidad (INCITE, 2024).

9.3.3 Medidas eficientes para desarrollar planes de calidad de aire

Existen un gran número de medidas correctoras aplicables a la industria y a la generación eléctrica, pero, aunque la propia normativa indica que se deben considerar factores del entorno, en la práctica la mayor parte están centradas únicamente en las propias instalaciones industriales, consideradas de forma individual. No obstante, es posible aplicar estrategias integradas que prioricen la planificación y la prevención integrada de un territorio frente a las medidas de corrección aplicadas a focos o procesos individuales. En este sentido, la aplicación de las estrategias integradas de prevención, con una visión global del territorio, puede mejorar los beneficios que proporcionan los planes de gestión de la calidad del aire centrados únicamente en medidas correctoras.

Las estrategias integradas pueden ser de diferente naturaleza y se establecen *ad hoc* sobre la zona geográfica en la que se pretende intervenir. A continuación, se describen algunas de las estrategias principales que pueden ser de aplicación.

9.3.3.1 Medidas centradas en la gestión del territorio

Son medidas de prevención tendentes a mejorar el impacto de las emisiones generadas por las actividades, considerando las actividades no sólo con carácter individual sino en el conjunto de una zona, incluyendo las infraestructuras existentes, aspectos ambientales sensibles, optimización de la ubicación de las actividades en el territorio, entre otros aspectos. De forma, que la gestión ambiental industrial de una zona no se base sólo en la suma de acciones individuales, sino que exista un plan de gestión integral de las zonas industriales.

La gestión de territorio puede incluir acciones como:

- Desarrollo de políticas sectoriales específicas que incluyan normativa sobre gestión de áreas industriales como, por ejemplo, la Ley 14/2018, de gestión, modernización y promoción de las áreas industriales de la *Comunitat Valenciana*.
- Desarrollo de criterios para seleccionar las tipologías de industrias que sean sostenibles y compatibles con el entorno (derecho de admisión).
- Búsqueda y desarrollo de localizaciones adecuadas en forma de polígonos industriales que dispongan de los servicios necesarios para alojar a la industria seleccionada.
- Implementación de sistemas de gestión en polígonos industriales que vele por la sostenibilidad y que incluyan en su esquema de funcionamiento una relación fluida con las administraciones competentes.
- Desarrollo de sistemas de información ambiental relacionadas con las actividades industriales, como por ejemplo un inventario de las instalaciones y de focos contaminantes incluidas en las mismas.
- Desarrollo de inventarios de emisiones que incorpore los datos de monitorización en continuo de los focos principales y los resultados de los controles periódicos de los focos secundarios (Red de Emisiones a la Atmósfera).

- Establecimiento de planes de actuación específicos para contaminantes de interés, por ejemplo, uso de disolventes, uso de biocombustibles (biomasa).

Este tipo de actuaciones deben permitir disponer de información más precisa sobre las fuentes industriales más significativas en la zona de interés, y puede servir de base para establecer estrategias de mejora de la calidad del aire en la zona, por parte de las autoridades competentes en la materia.

9.3.3.2 Medidas centradas en las instalaciones Industriales

Las medidas eficientes de carácter preventivo y correctivo aplicables a las instalaciones industriales individuales derivan del marco normativo actual, el cual está marcado por la DEI 2.0 en cuanto a concesión de permisos ambientales y la aplicación de mejores técnicas disponibles. La aplicación de estas medidas es de carácter local, dado que la instalación se integra dentro de un área industrial. En este caso, se indican las siguientes medidas, de obligado cumplimiento:

- Obtención de los permisos ambientales correspondientes, la especificidad de los mismos dependerá del tipo de industria, de las condiciones del entorno y de las administraciones competentes. Estos permisos incluyen un amplio abanico de condicionados específicos que pueden, a su vez, requerir el cumplimiento de determinados valores límite de emisión (VLE), así como valores límite y rangos de desempeño ambiental.
- Aplicación de las MTDs en el conjunto de procesos de la instalación que asegure el mejor desempeño ambiental posible.

La Oficina Europea de Investigación sobre la Transformación Industrial y las Emisiones específica en su página web los Documentos de referencia sobre las mejores técnicas disponibles (CE, 2024). Ver Tabla 9.4.

Tabla 9.4. Listado de sectores con BREFs (CE,2024).

Nombre	Código	Documento Aprobado/Publicado	Estado
<u>Producción de Cloro-Álcali</u>	CAK	<u>BREF BATC (12.2013)</u>	Publicado
<u>Industria de fabricación cerámica</u>	CER	<u>BREF (08.2007)</u>	Revisión iniciada
<u>Fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio</u>	CLM	<u>BREF BATC (04.2013)</u>	Publicado
<u>Sistemas comunes de tratamiento y gestión de aguas y gases residuales en el sector químico</u>	CWW	<u>BREF BATC (06.2016)</u>	Publicado
<u>Economía y efectos interambientales</u>	ECM	<u>REF (07.2006)</u>	Documento aprobado formalmente
<u>Emisiones generadas por el almacenamiento</u>	EFS	<u>BREF (07.2006)</u>	Documento aprobado formalmente
<u>Eficiencia energética</u>	ENE	<u>BREF (02.2009)</u>	Documento aprobado formalmente
<u>Industrias de alimentación, bebida y leche</u>	FDM	<u>BREF BATC (12.2019)</u>	Publicado
<u>Industria de procesos de metales ferreos</u>	FMP	<u>BREF BATC (11.2022)</u>	Publicado
<u>Fabricación de vidrio</u>	GLS	<u>BREF BATC (03.2012)</u>	Publicado

Nombre	Código	Documento Aprobado/Publicado	Estado
<u>Sistemas de refrigeración industrial</u>	ICS	<u>BREF (12.2001)</u>	Documento aprobado formalmente
<u>Cría intensiva de aves de corral o de cerdos</u>	IRPP	<u>BREF BATC (02.2017)</u>	Publicado
<u>Producción siderúrgica</u>	IS	<u>BREF BATC (03.2012)</u>	Publicado
<u>Vertederos</u>	LAN		Elaboracion iniciada
<u>Grandes instalaciones de combustión</u>	LCP	<u>BREF BATC (12.2021)</u>	Publicado
<u>Productos químicos inorgánicos de gran volumen</u>	LVIC		Elaboracion iniciada
<u>Industria química inorgánica de gran volumen de producción – Amoniaco, ácidos y fertilizantes</u>	LVIC-AAF	<u>BREF (08.2007)</u>	Documento aprobado formalmente
<u>Industria química inorgánica de gran volumen de producción – sólidos y otros</u>	LVIC-S	<u>BREF (08.2007)</u>	Documento aprobado formalmente
<u>Industria química orgánica de gran volumen de producción</u>	LVOOC	<u>BREF BATC (12.2017)</u>	Publicado
<u>Minería (extracción) de minerales</u>	MIN		Elaboracion iniciada
<u>Industrias de metales no ferrosos</u>	NFM	<u>BREF BATC (06.2016)</u>	Publicado
<u>Producción de química orgánica fina</u>	OFC	<u>BREF (08.2006)</u>	Documento aprobado formalmente
<u>Producción de polímeros</u>	POL	<u>BREF (08.2007)</u>	Documento aprobado formalmente
<u>Producción de pasta, papel y cartón</u>	PP	<u>BREF BATC (09.2014)</u>	Publicado
<u>Refino de petróleo y de gas</u>	REF	<u>BREF BATC (10.2014)</u>	Publicado
<u>Monitorización de emisiones al aire y agua en instalaciones DEI</u>	ROM	<u>REF (07.2018)</u>	Publicado
<u>Industrias de mataderos, subproductos animales o coproductos comestibles</u>	SA	<u>BREF BATC (12.2023)</u>	Publicado
<u>Forja y fundición</u>	SF	<u>SF BREF SF BATC</u>	Publicado
<u>Producción de especialidades químicas inorgánicas</u>	SIC	<u>BREF (08.2007)</u>	Documento aprobado formalmente
<u>Tratamiento de superficies metálicas y plásticas</u>	STM	<u>BREF (08.2006)</u>	Revisión iniciada
<u>Tratamiento de superficies mediante disolventes orgánicos, incluyendo conservación de la madera y de los productos derivados de la madera utilizando productos químicos</u>	STS	<u>BREF BATC (06.2020)</u>	Publicado
<u>Curtido de cuero y pieles</u>	TAN	<u>BREF BATC (02.2013)</u>	Publicado
<u>Industria textil</u>	TXT	<u>BREF (01.2023) BATC (12.2022)</u>	Publicado
<u>Fabricación de tableros derivados de la madera</u>	WBP	<u>BREF BATC (11.2015)</u>	Publicado
<u>Sistemas comunes de gestión y tratamiento de gases residuales en el sector químico</u>	WGC	<u>BREF (01.2023) BATC (12.2022)</u>	Publicado
<u>Incineración de residuos</u>	WI	<u>BREF BATC (12.2019)</u>	Publicado
<u>Tratamiento de residuos</u>	WT	<u>BREF BATC (08.2018)</u>	Publicado

9.3.3.3 Aplicaciones de Planes Específicos para áreas industriales con problemas de calidad de aire

Cuando sea necesario implementar un plan de mejora de calidad de aire en una zona determinada que incluye actividades industriales o de generación eléctrica, puede ser necesario impulsar medidas complementarias a las recogidas anteriormente para aquellos casos donde sea necesario activar protocolos específicos de reducción de la contaminación. Las actuaciones pueden ser las siguientes:

- Aplicación de VLE más restrictivos a las instalaciones industriales con mayor potencial contaminador.
- Aplicación de criterios técnicos sobre limitación de emisiones de grandes instalaciones industriales a aplicar a aquellas instalaciones más pequeñas incluidas en la zona de interés (instalaciones CAPCA - Catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera- fuera del alcance de la DEI). En el caso de aplicar esta medida es necesario tener en cuenta que los BAT-AELs pueden no ser representativos para instalaciones que estén fuera del ámbito de aplicación de la DEI.
- Establecimiento de prescripciones técnicas específicas para reducir las emisiones canalizadas y difusas generadas en las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación geográfico del plan de calidad de aire.
- Implantación de planes y programas de inspección y control más rigurosos en las industrias instaladas en la zona de interés.

9.3.4 Mejores Técnicas Disponibles para los principales contaminantes industriales

El contenido de los documentos BREF ha evolucionado recientemente para dar respuesta al conjunto de políticas europeas de carácter ambiental incluidas en la DEI 2.0, como, por ejemplo, la descarbonización, la eficiencia en el uso de los recursos y la aplicación de la economía circular. Por otro lado, las MTD han ampliado su alcance incorporando como obligatorias actividades de control operacional o de los procesos y su desempeño relacionado con el medio ambiente en un ámbito que puede alcanzar a una planta productiva. Algunos ejemplos incluyen la obligatoriedad de disponer de SGA que además de los requisitos recogidos en normas internacionales se complementa, en el caso de la DEI2.0, con otras MTD de gestión como la implantación de un inventario de entradas y salidas de materiales y recursos, de un sistema de gestión de productos químicos o aspectos relativos a la monitorización de parámetros clave ambientales y de proceso.

Las MTD de gestión se clasifican como medidas de carácter general. También existen técnicas específicas de aplicación a determinados aspectos de un sector o de una instalación. Estas técnicas, generales y específicas, se pueden clasificar, a su vez, en función del aspecto ambiental tratado. A modo de ejemplo, las emisiones al aire se pueden clasificar en función de la naturaleza del contaminante, en material particulado o en gases, o de su fuente de emisión, canalizada o difusa.

Otra clasificación ampliamente utilizada en el caso de MTD es la diferenciación entre medidas primarias o preventivas y medidas secundarias o correctivas. Las medidas primarias tienen por objeto reducir la formación de contaminantes en sus fuentes mientras que las medidas secundarias tienen por objeto tratar los flujos de contaminante ya generados (tecnologías correctivas o de final de línea). A continuación, se describen algunos ejemplos de medidas primarias y medidas secundarias aplicadas a las emisiones al aire.

9.3.4.1 Medidas primarias

Las medidas primarias, en general, deben aplicarse de forma prioritaria porque previenen el problema desde su origen, siempre que sean técnica y económicamente viables. En este sentido, es importante distinguir entre las instalaciones existentes, en las que puede haber mayores dificultades, y las nuevas instalaciones, en las que estas medidas deben considerarse desde su concepción. Cabe destacar que existe una gran variedad de medidas primarias aplicables a los diferentes procesos industriales, por lo que intentar elaborar una lista exhaustiva no es práctico. Para su aplicación concreta, se recomienda consultar los documentos BREF específicos de cada sector de actividad.

En la Tabla 9.5 se recogen ejemplos de medidas primarias para reducir las emisiones al aire de algunos contaminantes.

Tabla 9.5. Ejemplo de técnicas primarias para reducir las emisiones atmosféricas de diferentes contaminantes.

Tipo de emisiones:	Técnicas para reducir las emisiones
Emisiones no canalizadas de material particulado	<ul style="list-style-type: none"> Instalar sistemas de extracción de alta eficacia cerca de las fuentes de emisión. Limpiar los viales de circulación, carreteras y ruedas de vehículos de transporte. Confinar al máximo posible los almacenamientos de materiales pulverulentos. Minimizar la altura de descarga de materiales pulverulentos. Limitar al mínimo imprescindible el apilamiento de materiales al aire libre. Proteger los apilamientos de materiales contra vientos predominantes. Usar sistemas de rociadores de agua por pulverización.
Emisiones canalizadas en general (material particulado y gases)	<ul style="list-style-type: none"> Sustituir combustibles pesados por combustibles de bajas emisiones específicas. Limitar el número de puntos de emisión (chimeneas), siempre que sea posible agregar focos con características similares para facilitar su control. Extracción de emisiones lo más cerca posible de la fuente de emisión.
Emisiones canalizadas de compuestos gaseosos	<ul style="list-style-type: none"> Reducir los precursores de contaminantes mediante la selección de materias primas. Optimización de los ciclos térmicos en los procesos de elevada temperatura. Optimización de los procesos de combustión (p.ej.: evitar formación de CO). Instalar, cuando sea posible, quemadores de baja emisión de NOx. Electrificar los procesos de combustión, siempre que sea posible, para eliminar los contaminantes asociados a los procesos de combustión.

9.3.4.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias reducen los flujos de contaminante ya generados mediante la implantación de **tecnologías correctivas** o de final de línea. Con carácter general, sin considerar los detalles específicos singulares, se pueden definir las MTD mayoritariamente **implantadas para los principales contaminantes** asociados a la actividad industrial y a la generación eléctrica (Tablas 9.6 a 9.13).

Material particulado

Para la depuración del material particulado presente en las emisiones industriales se pueden utilizar varios sistemas: ciclones, filtros de mangas o de cartuchos, precipitadores electrostáticos o sistemas vía húmeda, entre otros, dependiendo del proceso, pero los dos sistemas mayoritarios incluidos como MTDs en los documentos BREF más recientes de muchos procesos industriales son los filtros

de mangas o de cartuchos y los precipitadores electrostáticos. Ambos sistemas se describen brevemente en la Tabla 9.6 y en la Tabla 9.7, respectivamente.

Tabla 9.6. Ejemplo de técnicas para reducir las emisiones canalizadas de material particulado: Filtros de Mangas.

Filtro de mangas	
Descripción	Los filtros de mangas están fabricados con telas porosas tejidas o fieltradas a través de las cuales se hacen pasar los gases para eliminar las partículas presentes en la corriente gaseosa a tratar. La utilización de filtros de mangas exige la selección de un tejido adecuado para las características de los gases residuales y la temperatura de funcionamiento máxima. Los filtros de cartuchos son similares, pero en vez de tejidos flexibles se utilizan cartuchos, que es un sistema más rígido y compacto, su elección depende de la aplicación concreta, pero el principio de funcionamiento en los dos casos está basado en una separación heterogénea sólido-gas mediante filtración.
Fotografías	 
	<p>Vista externa de un filtro de mangas</p> <p>Vista interior con detalle de las mangas</p>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficacia de recolección en un amplio intervalo de tamaños de partículas. Elevada flexibilidad de diseño con distintos medios filtrantes y sistemas de limpieza. Caídas de presión y requisitos de potencia razonables. El material se recupera en seco para usos posteriores o eliminación final Posibilidad de recirculación del aire filtrado. Posibilidad de inyectar reactivos para depurar gases por reacción química o adsorción.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> Requisitos de espacio (puede llegar a ser una razón para que no se pueda implantar). Posibilidad de incendio o explosión por chispas o partículas incandescentes. Necesidades de mantenimiento (reposición de las mangas). Los costes mantenimiento puede llegar a ser elevados, dependiendo de la cantidad de mangas necesarias y del tipo de tejido filtrante utilizado. Dificultad para manejar materiales o corrientes húmedas. No separa los compuestos gaseosos, para ello se requiere añadir aditivos específicos.

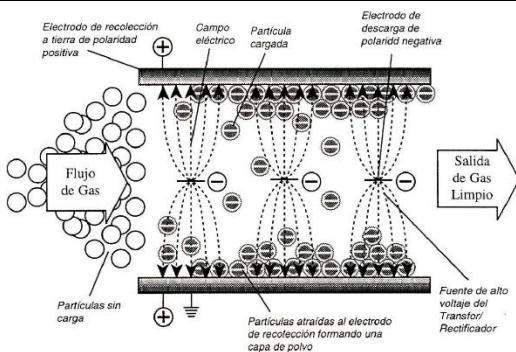
Los filtros de mangas han demostrado ser altamente eficaces en la eliminación de partículas finas y contaminantes del aire en una variedad de industrias, mejorando tanto las emisiones como la eficiencia operativa. En términos de aplicaciones, los filtros de mangas se usan con éxito en sectores como la metalurgia, cerámica, procesado de minerales, alimentación o productos farmacéuticos, entre otros. En algunos entornos, no solo eliminan partículas del aire, sino que también mejoran la seguridad y reducen los costos de limpieza y mantenimiento. Por ejemplo, en la industria alimentaria, estos filtros ayudan a prevenir la contaminación de productos al capturar partículas sin introducir contaminantes o agentes (agua, disolventes, etc.) adicionales. Dependiendo del tamaño de partícula que se desea retener, la eficiencia depende sólo parcialmente del tamaño de los poros de la tela y del diámetro de las fibras de los filtros de mangas, porque la capa de polvo formada sobre la superficie de la tela actúa también como medio filtrante (Liu et al., 2019). En estos equipos

los principales factores en su rendimiento son el tipo de tela, la relación caudal de aire-superficie filtrante, las pérdidas de carga a las que opera el sistema y el método de limpieza.

Los precipitadores electrostáticos (ESP) son dispositivos utilizados en diversas industrias, como la generación de energía, el procesamiento de metales, la industria cementera y química, para la eliminación eficiente de partículas finas presentes en gases de escape industriales. Su operación se basa en la ionización de partículas a través de un campo eléctrico de alto voltaje, atrayendo las partículas cargadas hacia placas colectoras, donde se depositan y pueden ser removidas.

En la industria, los precipitadores secos se usan en plantas de energía para controlar emisiones de ceniza volátil, mientras que los húmedos son más adecuados en procesos donde el gas contiene partículas pegajosas o ácidas, como en aplicaciones químicas o de incineración de residuos. Su eficiencia es notable, alcanzando hasta el 99% en la captura de partículas, lo que los convierte en una tecnología clave para cumplir con las normativas ambientales cada vez más estrictas en cuanto a la calidad del aire. Los principales factores que afectan su rendimiento son el voltaje entre electrodos, las propiedades de las partículas y la relación caudal de aire-superficie de placas colectoras (Chen et al., 2023).

Tabla 9.7. Ejemplo de técnica para reducir las emisiones canalizadas de material particulado: Precipitador electrostático.

Precipitador electrostático	
Descripción	Un precipitador electroestático (ESP) es un dispositivo de control de partículas que utiliza las fuerzas eléctricas para separar en un colector las partículas de un flujo de gases. Las partículas que entran en el sistema adquieren carga eléctrica cuando pasan a través de una corona, en la que los electrodos del centro del canal del flujo se mantienen a alta tensión y generan el campo eléctrico. Estas partículas cargadas se recogen en las placas colectoras con carga eléctrica de signo eléctrico contrario. La tensión de corriente continua requerida en los electrodos se sitúa típicamente a nivel industrial entre 20 y 100 kV.
Esquemas	
	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Elevada eficacia de recolección (mayor del 99%) incluso en partículas submicrónicas. Posibilidad de trabajar a temperaturas elevadas (>500°C). Elevada versatilidad: funcionamiento eficaz en casi todos los procesos industriales. Pérdidas de carga pequeña y constante, lo que conlleva poca potencia del ventilador. Adaptabilidad: tolera fluctuaciones en las condiciones de operación. Recolección del polvo en su estado original, excepto si se usan aditivos. Elevada durabilidad. Efectos de abrasión insignificantes.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> Diseño complejo. Pueden no operar a la eficacia de su diseño original. Operación y mantenimiento relativamente complejo. Se requiere personal especializado. Inversión inicial elevada. Eficacia altamente dependiente de las propiedades de la corriente a tratar (propiedades eléctricas). Poco adecuados para caudales relativamente pequeños (< 50 000 m³/h).

Óxidos de azufre (SO_x)

La emisión de óxidos de azufre (sobre todo SO_2 y SO_3) se debe a procesos de combustión que usen combustibles con azufre, pero en algunos procesos el uso de materias primas con azufre puede originar emisiones significativas de óxidos de azufre durante el procesado. Por lo que las medidas preventivas encaminadas a utilizar combustibles y materias primas con bajo contenido en azufre, o implementar tratamientos de desulfurización previos son acciones prioritarias.

Cuando no es posible aplicar estas medidas, o sólo es posible hacerlo de forma parcial, se debe recurrir al tratamiento de los gases residuales mediante sistemas de depuración. Los sistemas secundarios de control de SO_x se basan en reacciones de neutralización ácido-base por lo que pueden utilizarse para depurar simultánea o específicamente otros gases ácidos, tales como HF o HCl. En función de cómo se alimente al sistema el reactivo básico se distinguen dos grandes grupos de tecnologías: sistemas vía húmeda y sistemas vía seca (Larki et al., 2023). Existen otras tecnologías,

incluyendo opciones intermedias como sistema semi-húmedos, pero los más utilizados son los dos comentados que se describen brevemente en la Tabla 9.8. y en la Tabla 9.9.

Tabla 9.8. Ejemplos de técnicas para reducir las emisiones a la atmósfera de óxidos de azufre (SO_x). Vía húmeda.

Sistemas de desulfurización vía húmeda	
Descripción	<p>El proceso de desulfurización vía húmeda (conocidos por sus siglas en inglés como FGD) se basa en alimentar con el reactivo básico (los más utilizados son CaCO₃, Ca(OH)₂, NaHCO₃, NH₃) en forma de suspensión, para que se produzca la reacción química de neutralización de los óxidos de azufre y/o otros compuestos ácidos presentes en los gases. El contacto se produce normalmente en torres donde se pulveriza la suspensión en forma de finas gotas, para garantizar un alto nivel de contacto con los gases y alcanzar elevados rendimientos (>95%).</p> <p>Dentro de estos sistemas existen muchas variantes, casi todas ellas tendentes a reducir la cantidad de residuos y/o permitir la reutilización de las sales formadas durante el proceso de neutralización. Si se utiliza reactivos cárnicos se forma yeso (CaSO₄), que puede utilizarse en construcción, si se utiliza amoníaco se forma sulfato amónico ((NH₄)₂SO₄) que podría utilizarse como fertilizante. Pero las impurezas presentes en los materiales residuales suelen dificultar, a veces de forma insalvable, las posibilidades de reutilización de los productos de neutralización.</p>
Esquema	<p>Esquema de un sistema de desulfurización vía húmeda completo (preparación del reactivo en forma de suspensión, depuración de SO_x por absorción y tratamiento del residuo) (Fuente: http://libros.redsauce.net/)</p>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Puede alcanzar rendimientos superiores al 95%. Apto para elevadas concentraciones de contaminantes. Permite el uso eficaz de reactivos económicos, como CaCO₃. Permite eliminar partículas simultáneamente si se realiza un diseño tipo Venturi.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> En el proceso se generan aguas residuales y residuos húmedos, lo que complica y encarece su gestión. Pueden surgir graves problemas de corrosión en todo el sistema. Mayor complejidad de gestión que los sistemas vía seca, por lo que su uso se centra en grandes instalaciones (por ej.: centrales térmicas).

Tabla 9.9. Ejemplo de técnica para reducir las emisiones a la atmósfera de óxidos de azufre (SO_x). Vía seca.

Sistemas de desulfurización vía seca			
Descripción	<p>El proceso de desulfurización vía seca se basa en poner en contacto un reactivo sólido (los más utilizados son $CaCO_3$, $Ca(OH)_2$, $NaHCO_3$, o sus mezclas) para que se produzca una reacción química heterogénea sólido-gas de neutralización de los óxidos de azufre y/o otros compuestos ácidos presentes. El contacto de los gases con el reactivo se puede llevar a cabo por varias tecnologías, pero las más implantadas en Europa son: i) los lechos fijos, en los que el reactivo básico se alimenta granulado; ii) los sistemas con adición de reactivo micronizado, este sistema permite disponer de una gran superficie de contacto gas-sólido y favorecer la reacción química heterogénea de neutralización, posteriormente se separa el reactivo excedentario y las sales formadas en un sistema de separación de partículas, típicamente un filtro de mangas.</p> <p>En cualquier caso, una de las principales características para alcanzar buenos rendimientos de depuración en estos sistemas es utilizar reactivos con elevada superficie específica (micronizados). En los sistemas en los que el reactivo está granulado (lechos) no hay que confundir el tamaño de partícula con el tamaño de gránulo (aglomeraciones de partículas), el primero interesa que sea bajo para aumentar la superficie específica reactiva, mientras que el segundo (gránulo) en los lechos interesa que sea relativamente grande, para minimizar las pérdidas de carga al pasar el gas por el lecho de gránulos.</p>		
Fotografías			
	<i>Sistema vía seca con reactivo micronizado y filtro de mangas</i>		<i>Sistema vía seca de lecho fijo</i>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Al operar vía seca el residuo obtenido es un polvo y no producen aguas residuales. Al utilizar un sistema de separación de partículas de alta eficacia (filtros de mangas), presentan un elevado rendimiento en captación de partículas. Fácil gestión del sistema de depuración (alimentación y residuos) es sencilla y automatizable. 		
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> Al operar vía seca requiere operar con relaciones estequiométricas (reactivo/contaminante) elevadas (>2), por lo que se genera una mayor cantidad de residuos. El mayor consumo de reactivos y la mayor generación de residuos limita la aplicación a grandes instalaciones. Aplicable a corrientes con bajas concentraciones de contaminante. 		

Compuestos orgánicos volátiles (COVs)

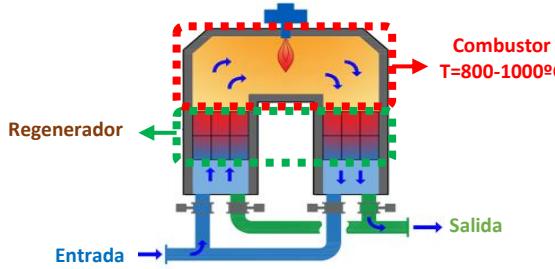
Para la depuración de estos compuestos se pueden utilizar varias técnicas, como oxidación térmica, adsorción, condensación criogénica, absorción o biorreactores, pero los dos sistemas mayoritarios incluidos como MTDs en los documentos BREF de muchos procesos industriales son la adsorción y la oxidación térmica (Baskaran et al., 2024). Ambos sistemas se describen brevemente en la Tabla 9.10 y la Tabla 9.11.

Tabla 9.10. Ejemplo de técnica para reducir las emisiones canalizadas a la atmósfera de COV: adsorción.

Adsorción	
Descripción	<p>Separación de los contaminantes de un flujo de gases mediante la retención sobre una superficie sólida (se utiliza normalmente el carbono activado como adsorbente). La adsorción puede ser regenerativa o no regenerativa.</p> <p>En la adsorción no regenerativa, el adsorbente gastado no se regenera para la misma aplicación, se reutiliza en otros procesos o se elimina. En el caso de la adsorción regenerativa, el adsorbato se somete a un proceso de desorción en un momento posterior, por ejemplo, con vapor (frecuentemente <i>in situ</i>), para su reutilización o eliminación y se reutiliza el adsorbente. En funcionamiento en continuo, suelen utilizarse más de dos columnas de adsorción (adsorbedores) en paralelo, una de ellas en modo de desorción.</p>
Esquemas	  <p>Vista de columnas de adsorción de lecho fijo (Fuente: https://www.ecotec.es/absolucion-neutralizacion-olores.php)</p>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • En general presenta una alta eficacia en la eliminación de COVs, pero debe verificarse caso por caso. • Tecnología sencilla y robusta. • Adecuada para procesos discontinuos. • Fácil de mantener, sobre todo para concentraciones bajas. • Fácil de instalar por necesidades de espacio e instalaciones auxiliares.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • No aplicable a altas temperaturas. • Sólo aplicable para bajas concentraciones de contaminantes. • La presencia de material particulado y/o elevada humedad puede provocar obturaciones. • Las mezclas de componentes pueden provocar averías prematuras. • No es adecuado para gases de combustión húmedos (menos crítico para el carbón activo impregnado). • Riesgo de combustión espontánea en el lecho (cetonas, aguarrás...). • Riesgo de polimerización de hidrocarburos insaturados en el carbón activo (reacción exotérmica y causa de bloqueos).

La oxidación térmica es particularmente útil en la depuración de compuestos orgánicos volátiles (COVs) en gases residuales de procesos industriales. Proporcionan una alta eficiencia en la destrucción de contaminantes, así como su aplicabilidad en procesos industriales. Los equipos de oxidación térmica regenerativa, por ejemplo, destacan por su capacidad para capturar el calor de oxidación mediante lechos cerámicos, alcanzando eficiencias térmicas de hasta un 98% y reduciendo las emisiones de NOx y CO (Noguera, 2023).

Tabla 9.11. Ejemplo de técnica para reducir las emisiones canalizadas de COVs: oxidación térmica.

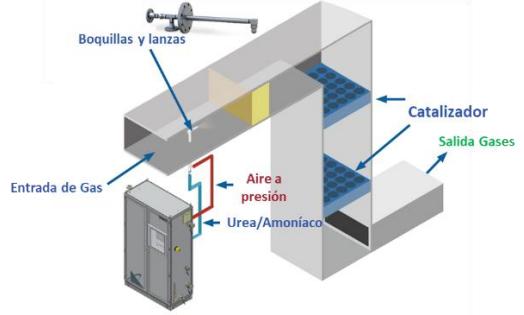
Oxidación térmica	
Descripción	<p>Sistema que se basa en la oxidación completa por reacciones de combustión de los COVs presentes en una corriente de gases al introducirlos en una cámara de combustión, en unas condiciones de contenido en oxígeno, temperatura y tiempo de residencia suficiente para completar su combustión. La temperatura del tratamiento suele ser del orden de 800 a 1 000°C. Se utilizan varias tecnologías para adaptarse a la gran casuística industrial:</p> <ul style="list-style-type: none"> Oxidación térmica directa: oxidación térmica directa de los gases a tratar sin ningún tipo de recuperación de energía procedente de la combustión. Oxidación catalítica: en estos equipos se incorporan catalizadores que permiten reducir las temperaturas de tratamiento, el consumo de energía y la generación de NO_x por combustión. Oxidación térmica recuperativa: oxidación térmica que utiliza el calor de los gases residuales mediante transferencia de calor indirecta de intercambio de calor para precalentar los gases a tratar. Oxidación térmica regenerativa (conocidos por sus siglas en inglés como RTO): estos equipos están equipados con uno o varios lechos regenerativos, que constan de elementos cerámicos que permiten acumular y liberar calor por el paso alternativo de los gases tratados (que ceden calor al lecho) y los gases a tratar (que se precalientan al pasar por el lecho) antes de llegar a la cámara de combustión. Operan de forma cíclica. Oxidación térmica regenerativa eléctrica (RTO eléctrico): son equipos como el comentado anteriormente, pero el calentamiento en la cámara de oxidación se produce mediante un sistema eléctrico sin llamas.
Imágenes	 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Combustor T=800-1000°C</p> <p>Regenerador</p> <p>Entrada</p> <p>Salida</p> </div> <div> <p>Vista exterior de un RTO</p> <p>Esquema de un RTO de dos lechos regenerativos (Adaptado de Condorchem Enviro Solutions, www.condorchem.com)</p> </div> </div>
Ventajas	<p>Oxidación térmica directa</p> <ul style="list-style-type: none"> Suficiente eficacia para muchos contaminantes (>90%). Costes reducidos de inversión y mantenimiento. Tolera mejor otros contaminantes de los gases (halógenos, metales, partículas, etc.). <p>Oxidación catalítica</p> <ul style="list-style-type: none"> Mayor eficacia en la oxidación térmica (95%). Menores costes de operación en combustible auxiliar. Reduce el riesgo de formación de NO_x al operar a menores temperaturas. <p>Oxidación térmica recuperativa</p> <ul style="list-style-type: none"> Los costes asociados al combustible disminuyen drásticamente al aplicar la recuperación de calor. Técnica robusta con un alto rendimiento. No presenta problemas de obstrucción ni de envenenamiento. <p>Oxidación térmica regenerativa (RTO)</p> <ul style="list-style-type: none"> No hay problemas de envenenamiento del catalizador. Recuperación de energía muy completa: 85 – 95%, con lo que reduce costes de combustible auxiliar. Funcionamiento autotérmico con concentraciones relativamente bajas de COV (a partir de 1- 2 g/m³ de COVs) En los RTO eléctricos se evita generar CO₂ y NO_x por combustión.
Desventajas	<p>Oxidación térmica directa</p> <ul style="list-style-type: none"> Costes variables elevados para gases combustibles con bajas concentraciones de COV. Sólo aplicable a instalaciones pequeñas, al no recuperar energía. <p>Oxidación catalítica</p> <ul style="list-style-type: none"> Mayor inversión inicial y de mantenimiento del catalizador. Posibilidad de envenenamiento del catalizador por metales pesados y halógenos. <p>Oxidación térmica recuperativa</p> <ul style="list-style-type: none"> El intercambiador de calor puede ensuciarse a altas temperaturas y requiere mantenimiento. Riesgo de combustión espontánea para concentraciones de COV elevadas. <p>Oxidación térmica regenerativa (RTO)</p> <ul style="list-style-type: none"> Costes de inversión elevados. Los lechos cerámicos pueden bloquearse con polvo y partículas condensadas. En funcionamiento discontinuo, el lecho debe recalentarse cada vez, consumiendo combustible adicional. Necesidades de espacio y de ubicaciones adecuadas (tamaño y peso elevados).

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

La emisión de óxidos de nitrógeno está asociada principalmente a sistemas de combustión, aunque también pueden generarse en los procesos productivos por descomposiciones térmicas de materiales o por reacciones químicas, con lo que la adopción de medidas primarias adecuadas puede reducir significativamente estas emisiones en algunos procesos, como se ha comentado anteriormente (por ejemplo, con el uso de quemadores de baja emisión de NO_x o con una selección de materias primas exenta de nitratos).

No obstante, en muchos casos estas medidas primarias no son suficientes para lograr unos bajos niveles de emisión y cumplir con los VLE establecidos en la legislación, sobre todo en instalaciones existentes y/o en procesos de combustión a alta temperatura. Por ello se debe recurrir a implantar medidas secundarias basadas en la depuración de la corriente residual. Los sistemas secundarios de control de NO_x incluyen tres tecnologías básicas: sistemas vía húmeda (aplicando disoluciones alcalinas u oxidantes), sistemas de reducción catalítica selectiva (RCS) y sistemas de reducción no catalítica selectiva (RNCS) (Flagiello et al., 2021; Muzio et al., 2002; Van Caneghem J. et al., 2016). Las dos últimas tecnologías son actualmente las más utilizadas a nivel industrial, y se comentan brevemente en la Tabla 9.12 y Tabla 9.13.

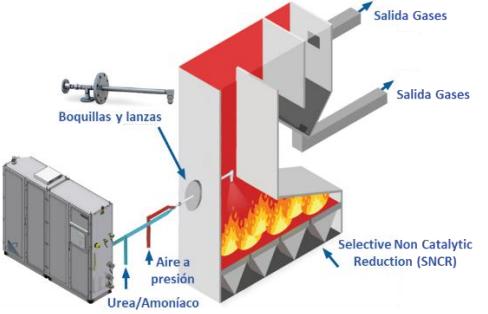
Tabla 9.12. Ejemplo de técnica para reducir las emisiones canalizadas de óxidos de nitrógeno (NO_x). RCS.

Reducción catalítica selectiva (RCS)	
Descripción	Reducción selectiva de los óxidos de nitrógeno con amoníaco o urea en presencia de un catalizador. La técnica se basa en la reducción de los NO _x a nitrógeno en un lecho catalítico por reacción con amoníaco (NH ₃) a una temperatura de funcionamiento óptima situada entre los 200 y 450 °C. Generalmente, el amoníaco se inyecta como solución acuosa; la fuente de amoníaco también puede ser amoníaco anhidro o una solución de urea. Pueden aplicarse varias capas de catalizador. Se obtiene una mayor reducción de los NO _x utilizando una superficie de catalizador mayor, instalada como una o más capas. La RCS reduce el escape de amoníaco en comparación con el escape que se produce en la RNCS.
Imágenes	 
	<p><i>Sistema catalítico selectivo (RCS) (Fuente: www.aprovis.com)</i></p> <p><i>Esquema de un sistema RCS (Adaptado de Spraying Systems Co., www.spray.com)</i></p>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Reducciones más altas de NO_x en comparación con quemadores de bajo NO_x y sistemas no catalíticos (SNCR). Es aplicable a fuentes con bajas concentraciones de NO_x. Las reacciones ocurren dentro de un rango de temperatura más bajo y amplio que en la SNCR. No requiere modificaciones a la unidad de combustión.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> Coste de capital y de operación significativamente más altos que los quemadores de bajo NO_x y la SNCR. La instalación de la SCR en procesos industriales existentes es difícil y costosa. Se requieren grandes volúmenes de reactor y catalizador. Puede requerir limpieza del equipo corriente abajo. La posible emisión de amoníaco en el gas residual puede impactar en la visibilidad de la pluma. La corriente debe llegar al catalizador libre de partículas.

La técnica de “Reducción No Catalítica Selectiva” (RNCS) utiliza prácticamente los mismos agentes reductores que la técnica RCS, y aunque obtiene menores rendimientos es compatible con la

presencia de elevadas concentraciones de material particulado y/o compuestos que puedan contaminar los catalizadores. Por estas razones, esta técnica ha tenido una gran implantación en el sector cementero, en el que además se da la circunstancia de que la inyección del reactivo se puede realizar fácilmente dentro del intervalo de trabajo óptimo (800-1000°C). Pruebas realizadas en varias plantas cementeras (Rungger & Canedo, 2011) han demostrado que la tecnología RNCS, en condiciones óptimas, puede alcanzar eficiencias elevadas en la reducción de NO_x, aunque es importante tener presentes algunas precauciones operativas para limitar al máximo la emisión de amoníaco sin reaccionar (*slip*), así como la formación de monóxido de carbono por reducción química del CO₂.

Tabla 9.13. Ejemplo de técnica para reducir las emisiones canalizadas de óxidos de nitrógeno (NO_x). RNCS.

Técnica	Reducción no catalítica selectiva (RNCS)	
Descripción	Reducción selectiva de los óxidos de nitrógeno a nitrógeno molecular con amoníaco o urea a altas temperaturas y sin necesidad de un catalizador. Para que la reacción sea óptima, la corriente de gases a tratar debe mantener en un intervalo de temperatura entre los 800 °C y los 1 000 °C.	
Imágenes		
	<i>Sistema de reducción no catalítica selectiva (RNCS)</i> (Fuente: https://www.areaimpianti.it/es/tratamiento-de-humos/de-nox-sncr/)	<i>Esquema de un sistema RNCS</i> (Adaptado de Spraying Systems Co., www-spray.com)
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> El coste de capital y de operación están entre los más bajos entre todos los métodos de reducción de NO_x. La instalación de RNCS es relativamente simple. Es adecuado en coste para uso estacional o aplicaciones de carga variable. Acepta corrientes de gas residual con niveles altos de partículas. Puede aplicarse con controles de combustión para proporcionar mayores reducciones de NO_x. 	
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> La corriente de gas debe estar dentro de un rango de temperatura específico (8-100 °C). No es aplicable a fuentes con bajas concentraciones de NO_x. Menores reducciones de NO_x que con la Reducción Selectiva Catalítica (RCS). Puede requerir limpieza del equipo corriente abajo. La posible emisión de amoníaco en el gas residual puede impactar en la visibilidad de la pluma. 	

9.3.5 Recomendaciones y acciones de mejora para emisiones industriales

La regulación normativa de las actividades industriales incluidas en las Directiva de Emisiones Industriales (DEI) está muy desarrollada en el conjunto de la UE, con un marco normativo comunitario que en la actualidad es teóricamente muy homogéneo basado en la implantación de las tecnologías más avanzadas para minimizar el impacto de las actividades industriales.

A pesar de las grandes mejoras registradas en la prevención, minimización y control de las emisiones procedentes de las actividades industriales, gracias al desarrollo de la normativa descrita en esta sección de la Guía y comentada anteriormente, todavía se observan en muchas instalaciones deficiencias significativas en la aplicación práctica y efectiva de los requisitos establecidos en las autorizaciones ambientales.

Por ello, se considera necesario continuar con los esfuerzos para reducir las emisiones primarias industriales de contaminantes atmosféricos. En especial, es crucial focalizar los esfuerzos en aquellas especies gaseosas, que además son precursoras de contaminantes de origen secundario como el O₃ o PM (principalmente, PM2.5), que tienen parte de su origen en la industria y cuyo impacto sobre la calidad del aire y los posibles efectos perjudiciales para la salud pueden ser significativos.

A continuación, se incluyen una serie de recomendaciones generales en esta sección, encaminadas a mejorar la gestión de las emisiones industriales en el marco del desarrollo de Planes para la Mejora de la Calidad del Aire. Estas recomendaciones están principalmente dirigidas a administraciones públicas y entidades responsables de gestión de polígonos industriales, entre otros:

- **Aplicación de estrategias integradas de gestión al territorio.** La mayor parte de medidas ambientales aplicables a las actividades industriales están enfocadas a las propias instalaciones industriales, consideradas de forma individual. No obstante, sobre todo en zonas urbanas y/o con gran concentración industrial, como se ha indicado, se deben aplicar estrategias integradas que prioricen la planificación y la prevención integrada de un territorio frente a las medidas de corrección aplicadas a focos o procesos individuales. En este sentido, se considera fundamental la participación y coordinación técnica, de los diferentes niveles de la administración, esencialmente de la autonómica y municipal.

Por otra parte, se está generando un debate sobre el incremento de la participación ciudadana, a través de la denominada "ciencia ciudadana" (Hidalgo-Barquero, 2022) como opción de capacitar a los ciudadanos para asumir un papel protagonista en la medición de la contaminación atmosférica en sus barrios, gracias a la proliferación de sensores de bajo coste, que permiten la recogida de datos centrada en el ciudadano para cambiar la forma en que se producen y utilizan los datos de contaminación. Esta participación ciudadana cada vez está siendo más importante, por lo que se recomienda a las autoridades competentes establecer canales de comunicación eficaces para intercambiar información ambiental.

- **Incorporación de las actividades industriales no DEI en inventarios de emisiones industriales:** A pesar de las medidas adoptadas en los últimos años para el control de la contaminación industrial, la notificación y el monitoreo de las emisiones procedentes de las actividades industriales incluidas en el alcance de la normativa sobre emisiones industriales (Directiva DEI 2.0), aún existen muchas actividades industriales que quedan fuera del alcance de dicha Directiva que siguen representando un desafío importante, sobre todo en zonas urbanas o industriales con elevada concentración de actividades de tamaño medio y pequeño. Por lo tanto, se debe dedicar un mayor esfuerzo a comprender su casuística de cara a mejorar su prevención y control. En este sentido, los inventarios de actividades y emisiones no deben limitarse sólo a las actividades DEI, ya que las actividades no DEI pueden ser ambientalmente relevantes en determinadas zonas. Actualmente, la información disponible y reportada por los organismos competentes sobre esas actividades es muy limitada y/o se encuentra dispersa, por lo que es difícil aplicar una estrategia de control sobre las mismas.
- **Mejora de la transparencia informativa:** Para establecer estrategias realistas de mejora de la calidad del aire, es importante disponer de información pública adecuada, siempre respetando

la información que pueda ser confidencial. Además, para realizar una gestión ambiental adecuada es fundamental, no sólo conocer las emisiones absolutas de los principales contaminantes, sino que sería de gran utilidad ampliar la información técnica en inventarios públicos sobre emisiones de origen industrial, incorporando información sobre los procesos que originan dichas emisiones, el nivel de actividad (producción o consumo energético por ejemplo), el tipo de fuentes de energía (por ej.: combustibles o autogeneración renovable), tipos de materias primas utilizadas, así como los principales incidentes en materia de emisiones, o cualquier otro aspecto que pueda ser ambientalmente relevante. En este sentido, el nuevo Reglamento 2024/1244, sobre la notificación de datos medioambientales procedentes de instalaciones industriales, establece como mínimo incorporar información sobre el uso de recursos, volumen de producción, horas de funcionamiento de la instalación, entre otros aspectos, de forma que se disponga de información que permita mejorar la contextualización de los datos ambientales facilitados y mejore la utilidad de los inventarios, permitiendo el cálculo de otros parámetros claves a considerar en el desarrollo de PMCA o en otras actuaciones relacionadas con su gestión.

- **Establecimiento de sistemas de control administrativo no basados únicamente en un seguimiento documental y burocrático.** El sistema actual de verificación del cumplimiento de las actividades industriales se basa en un control documental de los proyectos presentados para conseguir las autorizaciones ambientales y en un control por empresas colaboradoras con la administración, que siguen un esquema de pasa/no pasa. Este esquema no favorece la interacción directa entre las partes, es decir, entre los promotores de las actividades industriales y las autoridades competentes. La experiencia recogida en proyectos desarrollados en varias regiones europeas indica que cuando se crean sistemas con mayor interacción, con inspecciones y visitas *in situ* por parte de las autoridades competentes, como recomienda la propia legislación europea, se produce una mejor aplicación efectiva de los requisitos ambientales, para lo que es necesario fomentar un sistema con interlocución directa entre las partes para conocer deficiencias y problemas. Obviamente este sistema requiere que las autoridades competentes tengan una asignación adecuada de recursos. Cabe destacar la iniciativa de la Red de la UE para la Aplicación y el Cumplimiento de la Legislación Medioambiental (IMPEL, 2024), cuya misión es garantizar la aplicación y el cumplimiento efectivos de la legislación medioambiental europea fomentando la colaboración profesional, la información y el intercambio de buenas prácticas entre los reguladores medioambientales y que intenta mejorar y armonizar los procedimientos de inspección de actividades industriales incluidas en el alcance de la DEI 2.0.
- **Revisión del sistema de inspección ambiental.** La inspección ambiental está recogida como requisito en la DEI 2.0 y las comunidades autónomas españolas disponen de los preceptivos sistemas de inspección ambiental y cuentan con planes y programas de inspección. Sin embargo, en la práctica la mayor parte de tareas de inspección, por motivos de recursos, no pueden ser llevadas a cabo por la autoridad competente, y son realizadas en nombre de esta por las entidades colaboradoras de la administración. Estas entidades disponen de sistema de gestión de la calidad acreditados que les confieren una competencia técnica adecuada, independencia e imparcialidad. Además, en algunas CCAA se han desarrollado sistemas específicos de habilitación de las entidades y de su personal técnico con el fin de asegurar la calidad de los trabajos realizados. Aunque el sistema de delegación de determinadas tareas específicas en

entidades colaboradoras establecido actualmente dispone de las herramientas de control y auditoría necesarias, existen una serie de puntos de mejora que puede aumentar la confianza en los resultados reportados por las mismas y en la calidad de dichos resultados para el fin requerido, comprobar y fomentar la adecuación de las instalaciones a las condiciones de los permisos y controlar, en caso necesario, su repercusión medioambiental. En este sentido es fundamental revisar el régimen económico de funcionamiento. Actualmente, en la mayoría de las ocasiones, es la propia instalación industrial la que selecciona y contrata a la entidad colaboradora para realizar actividades de supervisión de sus procesos. Esta forma de actuación, si no se acompaña de un control riguroso, es perversa en su concepción dado que dificulta la imparcialidad real de la entidad colaboradora en el desarrollo de sus funciones, al tratarse de una relación cliente-proveedor. El otro punto de mejora es la valoración económica de los trabajos de inspección a realizar, dado que requieren de un conocimiento exhaustivo de la legislación aplicable a la instalación, los procesos industriales que intervienen, los procedimientos de muestreo y toma de muestra de contaminantes en las diferentes matrices existentes y los procedimientos de seguridad y salud aplicables. La libre competencia a la que se someten las entidades colaboradoras las hace en ocasiones trabajar con unos costes sumamente ajustados que comprometen la calidad de los resultados, al tener que abordar con pocos recursos humanos y materiales trabajos que precisan de una elevada especialización en cada uno de los vectores ambientales de interés, como emisiones al aire, al agua, suelos o ruido. Por lo tanto, dada la importancia y el coste que supone este sistema, sería recomendable revisarlo profundamente, e introducir mejoras para que opere de forma más efectiva.

- **Monitorización en continuo de las emisiones.** Actualmente la monitorización en continuo de las emisiones es obligatoria en focos de gran tamaño, pero los avances que se están produciendo en el desarrollo de sensores y sistemas de gestión integrada de datos, con menores costes y gran flexibilidad, deberían integrarse en la gestión ambiental e incrementar las posibilidades de extender la monitorización en continuo a un mayor número de focos, especialmente en zonas con problemas de calidad de aire. El disponer de datos de emisiones en continuo, tanto por parte de las industrias como de la administración, puede ser un elemento fundamental para mejorar los sistemas de gestión y vigilancia de las emisiones. La monitorización de las emisiones permite conocer en tiempo real la existencia de problemas asociados a los procesos de producción o a los sistemas de corrección, pero incluso cuando no sea posible técnica y/o económicamente una monitorización directa de los parámetros ambientales, la monitorización de otros parámetros auxiliares puede ser una herramienta valiosísima para una correcta gestión ambiental (Brinkman et al., 2018), por lo que se recomienda su implantación, siempre que sea viable. La integración de información realista sobre las emisiones en los sistemas de control de la calidad del aire es fundamental para poder implantar modelos predictivos que puedan anticipar la existencia de episodios con elevados niveles de contaminación.
- **Armonización de los parámetros ambientales.** Por ejemplo, en material particulado existen discrepancias entre los parámetros utilizados en calidad del aire (PM10 y PM2.5) y los establecidos como valores límite de emisión atmosférica en actividades industriales, y los que se deben reportar al E-PRTR (PM10). Esta información está disponible en la guía de inventario de emisiones de contaminantes del aire del EMEP/EEA (2023), pero el uso de la guía no está generalizado y además sólo existen datos para unas pocas actividades. Otro ejemplo es en la

regulación de compuestos orgánicos volátiles (COV) donde se utilizan varios parámetros, en ocasiones de forma confusa: COV (compuestos orgánicos totales), COVNM (compuestos orgánicos volátiles no metánicos) o COT (carbono orgánico total), entre otros. Por lo que también se deberían establecer criterios de armonización por defecto para cada sector de actividad.

- **Organización de actividades de concienciación especialmente para los sectores industriales:** A través de talleres en cooperación con asociaciones empresariales o jornadas informativas específicas para diferentes actividades industriales. Se considera esencial explicar a los gestores ambientales de la industria la importancia, en general, de proporcionar información precisa sobre su impacto ambiental (emisiones atmosféricas) y explicar en detalle el uso final de esta información, así como los problemas y consecuencias de no proporcionarla.
- **Dotación adecuada de recursos en los servicios técnicos de las autoridades competentes.** La gran complejidad que están adquiriendo los requisitos establecidos en la DEI 2.0 para las instalaciones industriales, requiere que las autoridades competentes dispongan de los recursos adecuados en forma de departamentos técnicos especializados (con apoyo externo si es necesario y legalmente posible), que permitan abordar con eficacia y sin demoras excesivas las tareas de revisión, evaluación e intervención administrativa, tanto en la fase de tramitación de la AAI, como en la fase de funcionamiento de las actividades. Es habitual encontrar diferentes modelos organizativos entre las administraciones ambientales donde a veces realizan unos controles previos muy intensos en las fases de tramitación y unas posteriores comprobaciones más rutinarias o lo contrario, caracterizado por una mayor laxitud en los procedimientos de intervención previa y una mayor profundidad en los procedimientos inspectores o de control posterior. Es un error considerar que una fase de la intervención administrativa ambiental puede suplir a la otra, estas alternativas vienen usándose como solución para suplir los déficits en medios personales que sufren las administraciones ambientales. Ambas fases son necesarias y deben cubrir todos los aspectos incluidos en la legislación aplicable, por ello se considera como una condición necesaria la dotación suficiente de recursos humanos cualificados. Una propuesta puede ser establecer unas ratios orientativas de carga de trabajo que se puedan tomar como referencia por las autoridades competentes (por ejemplo: 1 instructor cada 25 instalaciones en cada fase, aunque el valor concreto depende de la complejidad, tamaño, variedad de actividades, etc.). Pero, en cualquier caso, establecer unos criterios cuantitativos de dotación de recursos puede ser una herramienta muy útil para introducir mejoras que beneficien a ambas partes, a las autoridades competentes (para que puedan evaluar correctamente los proyectos) y a las empresas solicitantes de instalaciones industriales (para evitarles demoras importantes en las tramitaciones).
- **Establecimiento de incentivos a las empresas industriales con buen comportamiento ambiental.** Las políticas para promocionar el buen comportamiento ambiental a través de la adopción de normativas obligatorias combinadas con esquemas voluntarios han mostrado ser efectivas (Aragón-Correa et al., 2020; Arimura et al., 2019), siempre que estos esquemas incorporen criterios exigentes y su cumplimiento sea verificado por terceras partes (como por ejemplo la etiqueta ecológica europea o el sistema de comunitario de gestión y auditorías ambientales EMAS). No obstante, la implantación de sistemas voluntarios acompañado con

incentivos (financieros, legales, tramitación preferente de expedientes, etc.), debe sistematizarse dentro de programas amplios y ambiciosos, para dotarlos de mecanismos efectivos de aplicación y credibilidad, evitando el denominado *greenwashing* (lavado verde, en español, término que se refiere a utilizar estrategias publicitarias falsas para presentarse como una organización respetuosa con el medioambiente) (Freitas Netto et al., 2020; Inês et al., 2023; Mateo-Márquez et al., 2022).

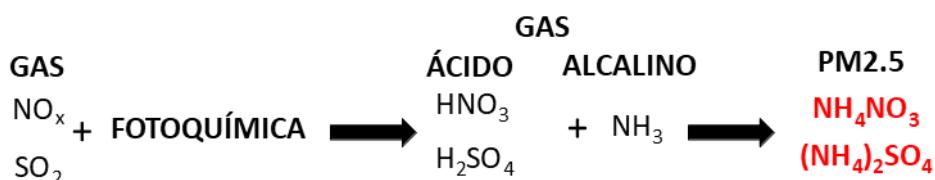
9.4 Agricultura y ganadería

9.4.1 Contaminantes relevantes emitidos por la agricultura y ganadería

Tal y como indica el PE (2023) en su informe sobre la nueva Directiva europea de calidad del aire, “*la agricultura es una importante fuente de contaminación atmosférica: representa alrededor del 93 % del total de las emisiones de amoníaco en la UE, mientras que las emisiones agrícolas de CH₄, precursor de la formación de O₃ en la baja atmósfera, y de partículas como las PM10, representan alrededor del 54 % de las emisiones totales de este gas en la UE*”. Esta nueva Directiva propone que los Estados Miembros adopten las medidas necesarias para reducir las emisiones en la agricultura y las vinculadas a la gestión ganadera, como los sistemas de gestión del nitrógeno y los sistemas de estabulación de animales de bajas emisiones; también propone una mejora de la gestión más sostenible de los residuos agrícolas y de los cultivos, y que se apueste por una agricultura de precisión, el uso eficiente de los recursos y las fuentes de energía alternativas. En España tenemos diferentes Reales Decretos que regulan la actividad ganadera como el **RD 306/2020**, que modifica el **RD 324/2000** de ordenación de las explotaciones de ganado porcino extensivo y establece las bases para la sostenibilidad de la actividad ganadera, y el **RD 1051/2022** que establece limitaciones sobre la aplicación de purines en suelos. Además, la **Decisión de Ejecución (UE) 2017/302** establece las MTD para la reducción de emisiones a la atmósfera en el sector de la ganadería intensiva, especialmente en la cría de aves de corral y cerdos. Estas conclusiones deben aplicarse a las instalaciones sujetas a la Directiva de Emisiones Industriales (Directiva 2010/75/UE) actualmente sustituida por la nueva Directiva (UE) 2024/1785, conocida como DEI 2.0, como se ha comentado anteriormente. Finalmente debe tenerse en cuenta también el **RD 637/2021**, por el que se establecen las normas básicas de ordenación de las granjas avícolas y el **RD 1053/2022**, por el que se establecen normas básicas de ordenación de las granjas bovinas.

Comprender la naturaleza y magnitud de los contaminantes emitidos por los sectores agro-ganaderos, así como las estrategias para mitigar su impacto y avanzar hacia una producción agropecuaria más sostenible es importante para un control a escala nacional de la contaminación del aire. Entre los principales contaminantes destaca el NH₃, así como PM10, PM2.5 y COVs, incluido CH₄.

La importancia del NH₃ radica principalmente en su contribución al PM2.5 secundario. Diversos estudios (Sheinfeld y Pandis, 2016; Gu et al., 2021) han concluido que una contribución de PM importante se debe al PM inorgánico secundario, compuesto de sulfato y nitrato amónico ((NH₄)₂SO₄ y NH₄NO₃) según las siguientes reacciones:



Así, para reducir los niveles de PM secundario es necesario reducir las emisiones de sus precursores gaseosos, principalmente SO₂, NO_x y NH₃. Con presencia de NH₃, el primer componente secundario de PM en formarse es (NH₄)₂SO₄, y cuando el SO₂ y H₂SO₄ de la atmósfera se agotan, comenzará a formarse NH₄NO₃.

Utilizando casi una década de datos de IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*), en Van Damme et al. (2018) se identificaron más de 200 puntos críticos de emisiones de NH₃ en todo el mundo. Estos puntos incluyen principalmente fuentes agrícolas, muchas de ellas no registradas previamente en inventarios de emisiones tradicionales. El estudio subraya que dos tercios de estas fuentes no estaban incluidas en los inventarios *bottom-up* existentes, lo que implica que las emisiones de NH₃ han sido subestimadas significativamente durante años. Se identificaron regiones en España con altas emisiones de NH₃. Entre las áreas más destacadas se encuentran Castilla y León, Aragón y Cataluña. Estas regiones tienen una alta densidad de ganado y uso de fertilizantes nitrogenados. Es de destacar que en regiones de Cataluña se ha reportado recientemente un incremento de niveles de fondo de NH₃ de entre 2,5 y 9,0 %/año (Liu et al., 2024).

PM10, PM2.5 y COVs son emitidos también por el sector agropecuario. Se producen emisiones de PM, NOx y COVs durante la combustión de residuos agrícolas, que pueden tener un impacto apreciable, no solo en los niveles de PM, sino en los de O₃. Por otra parte, la emisión de polvo durante las labores de arado, cosechado y elaboración de piensos y forrajes pueden llegar a ser muy importantes y afectar a los niveles de PM. Además, la combustión, muchas veces rudimentaria y con combustibles de baja calidad, en granjas para caldearlas, son causantes de elevadas emisiones de PM, NOx, y metales. **Las emisiones de combustión se tratarán en el apartado de medidas sobre la quema de biomasa.**

9.4.2. *Medidas eficientes para NH₃*

El ciclo del nitrógeno (N) ha sido alterado por la actividad humana desde el inicio de la agricultura y la ganadería. El uso de fertilizantes nitrogenados ha permitido aumentar la producción de alimentos y piensos, pero también ha generado problemas de contaminación de aguas y del aire (Figura 9.26). Hasta hace poco, los esfuerzos para abordar la contaminación por N estaban fragmentados. Esto ocurría debido a la división en las políticas y la ciencia ambiental entre diferentes medios como la contaminación del aire, del agua, las emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros. La contaminación por N afecta a todos estos problemas, por lo que actúa como un factor de unión entre muchas cuestiones relacionadas con el medio ambiente, la economía, la salud y el bienestar. Ahora se reconoce la necesidad de un enfoque conjunto para abordar la contaminación por N, teniendo también en cuenta las políticas agropecuarias.

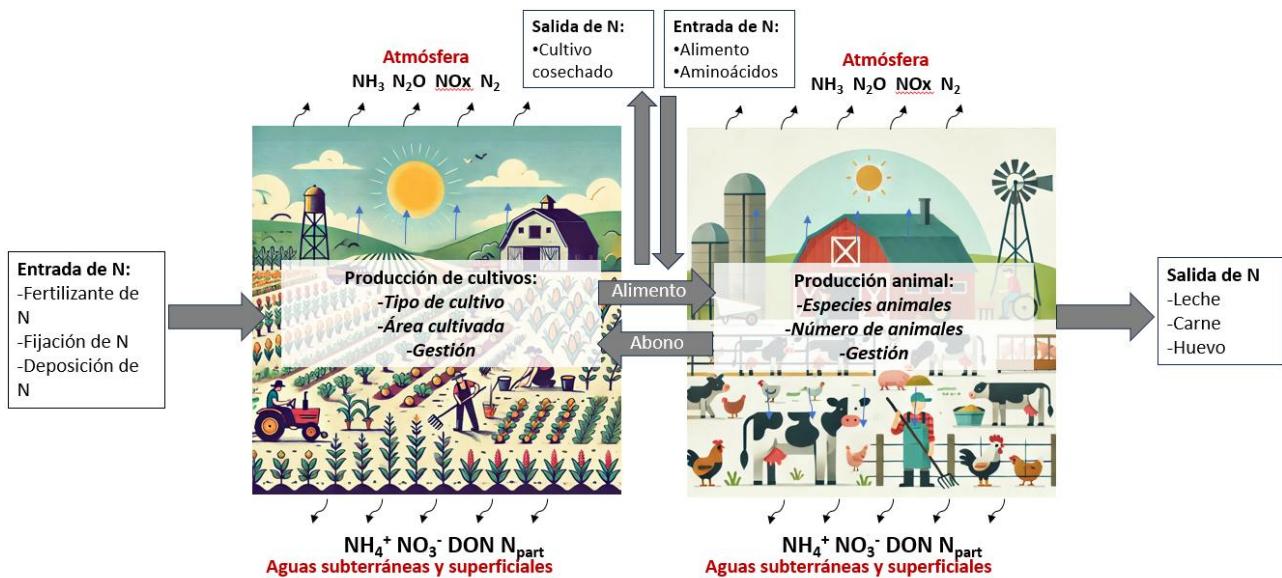


Figura 9.26. Concepto del balance de masa de entrada y salida de nitrógeno en un sistema de producción mixta de cultivos y ganado. Adaptada de Sutton et al. (2022).

Existe el consenso internacional de que, para disminuir las emisiones provenientes de la actividad agrícola y ganadera, es necesario implementar medidas simultáneas en los siguientes ámbitos Sutton et al. (2022):

- La dieta de los animales, que debe ser una dieta baja en nitrógeno.
- El diseño de la granja.
- La manipulación y almacenaje de los estiércoles y/o purines.
- La gestión de los estiércoles y/o purines.
- La aplicación de estiércoles y/o purines como fertilizante y de otro tipo de fertilizantes.

En el RD 306/2020 por el que se establecen normas básicas de ordenación de granjas intensivas, y que modifica el RD 324/2000 de ordenación de las explotaciones de ganado porcino extensivo, se establecen las bases para la sostenibilidad de la actividad ganadera de los próximos años. Por ejemplo, en su artículo 10 se establecen medidas, incluyendo la implantación de MTD, para la reducción de emisiones en la explotación a adoptar desde enero de 2023, siempre que las medidas apliquen una modificación estructural de la instalación.

La Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE) en colaboración con el Convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia (CLRTAP) han publicado diversas guías sobre buenas prácticas agropecuarias, como el Código marco de buenas prácticas agrícolas para reducir las emisiones de amoniaco (UNECE, 2015) y otra guía sobre Gestión Sostenible Integrada del Nitrógeno (Sutton et al., 2022), más elaborada y mencionada en los RRDD anteriormente citados (actualmente está en revisión por la CLRTAP, se espera nueva guía para 2026), que incluye medidas también para reducir las emisiones de N₂O , NO_x, NO₃⁻, N y NH₃. Así mismo, está pendiente de su publicación formal por parte de CLRTAP una guía sobre Mitigación conjunta de las emisiones de metano y amoníaco procedentes de fuentes agrícolas (Dalgaard et al., 2023).

Por su parte, MITECO (2024e) también incorpora en sus recomendaciones las acciones propuestas en PNCCA (MITECO, 2024c) para los sectores de ganadería y agricultura (Figura 9.27), ofreciendo así una síntesis clara y útil de las medidas que deben implementarse (Tabla 9.14).

Asimismo, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) ha publicado un Documento orientativo sobre la prevención y reducción de las emisiones de amoníaco de origen agropecuario (MAPA, 2014) sobre buenas prácticas para la reducción de emisiones (ECE/EB.AIR/120), que se basa en el Protocolo de Gotemburgo y proporciona un marco detallado de medidas para minimizar las pérdidas de N en la producción agropecuaria. Este documento, alineado con las estrategias de la UNECE y las normativas nacionales, recoge recomendaciones sobre gestión del N, estrategias de alimentación animal, técnicas de almacenamiento y aplicación de estiércol, así como mejoras en el alojamiento ganadero, coincidiendo con las propuestas establecidas en los RRDD sectoriales.

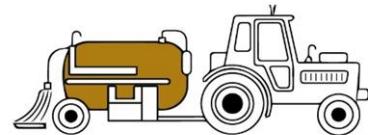
A partir de todos los documentos anteriormente mencionados **se proponen las siguientes medidas** clasificadas en los diferentes ámbitos citados con anterioridad (Figura 9.28). De entre estas se han elegido aquellas que se han considerado más viables y eficientes, aunque las guías contienen muchas más. No obstante, como se ha apuntado, es importante que se consideren en su conjunto, para obtener la máxima eficacia y evitar compensaciones, ya que por ejemplo reducir la pérdida de N en el alojamiento crea oportunidades para aumentar el reciclaje de N o la aplicación directa en el campo. Es importante destacar que, al implementar estas estrategias para reducir emisiones de NH₃, y N₂O en algunos casos, la producción agropecuaria puede minimizar la pérdida de N y contribuir a una economía circular donde el menor impacto ambiental se traduce en una mayor disponibilidad de recursos.

Tabla 9.14. Medidas que propone MITECO (2024e), sin carácter vinculante, según el Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica (PNCC) para ganadería y agricultura.

Actividad	Medidas de control	Reducción de Emisiones
Agricultura	Registro de aplicación de fertilizante	Reducción de NH ₃
	Enterrar materia orgánica en las primeras 12h, y preferentemente en menos de 4 horas	Hasta 65% de reducción de NH ₃
	Aplicación eficiente de estiércol	Hasta 90% de reducción de NH ₃
	Evitar la quema de restos de poda	Evitar partículas contaminantes
	Aplicar la cantidad adecuada de fertilizantes	Reducción de NH ₃
Ganadería	Aportar pienso bajo en proteínas	Entre 5% y 15% de reducción de NH ₃
	Manejo adecuado de graneles sólidos	Reducción de partículas en suspensión
	Cubrir las balsas de almacenamiento de purines	Hasta 90% de reducción de NH ₃
	Gestión adecuada de estiércol (compostaje)	Entre 30% y 70% de reducción de NH ₃
	Mejorar las condiciones de alojamiento del ganado	Reducción de partículas y NH ₃
	Uso de depuradoras de aire en instalaciones	Hasta 90% de reducción de partículas



¡Registra tus datos en un cuaderno de explotación!
Tendrás un mejor control de la dosis de fertilizantes y el momento de aplicación



Cuando **aplicas estiércoles mediante tubos colgantes, discos o inyección**, puedes reducir hasta un 90% las emisiones de NH₃

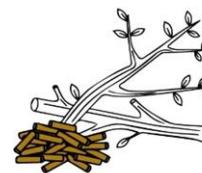


Cuando **aplicas una dosis adecuada de fertilizante**, aumentas la producción, consigues un ahorro económico y reduces las emisiones de NH₃

Agricultura



Cuando **entierras la materia orgánica tras su aplicación en el suelo** en un periodo de 4 h reduce hasta un 65% las emisiones de NH₃



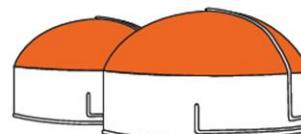
¡Evita la quema de los restos de poda!
Además de mejorar la calidad del aire con ellos se pueden producir biocombustibles para el uso térmico de los hogares



Cuando **incorporas al suelo los restos de poda** evitas las emisiones generadas en la quema a cielo abierto y mejoras las condiciones del suelo



Cuando **aportas a tu ganado un pienso bajo en proteínas** y regulas los niveles de agua de los bebederos, reduces entre un 5-15% las emisiones de NH₃



Cuando **cubres totalmente las balsas de almacenamiento** de los estiércoles y purines de las explotaciones ganaderas, logras una reducción de las emisiones de hasta el 80% de NH₃ y de olores hasta un 90%, además de extraer biogás para usos térmicos



Mejora las condiciones de alojamientos, reduce la temperatura interior, optimiza la ventilación y mantén las superficies limpias



Emplea buenas prácticas de manejo de graneles sólidos y reduce las PM en suspensión derivados del manejo del alimento del ganado



Cuando **realizas una gestión sostenible y adecuada del estiércol**, con evacuaciones frecuentes, sistemas de suelo ranurado o incrementas la cama de los animales, reduces entre un 30-70% las emisiones de NH₃



Cuando **usas depuradoras de aire**, además de reducir hasta en un 90% las emisiones de NH₃, eliminas las PM de polvo finas y el olor de los alojamientos

Ganadería

Figura 9.27. Infografías MITECO (2024e) para Agricultura (izquierda) y Ganadería (derecha).



Figura 9.28. Resumen de las principales medidas según los diferentes ámbitos.

9.4.2.1 Medidas sobre la formulación de dietas

- **Adaptar el consumo de proteínas** de la dieta animal, dependiendo de los diferentes requisitos nutricionales según la etapa productiva. Los RRDD de ordenación ganaderos obligan a tener una dieta baja en N y adaptada a cada ciclo. Formular dietas basadas en nutrientes digeribles/accesibles utilizando suplementos de aminoácidos bajos en proteínas y aditivos. El contenido en proteína de la dieta se puede reducir si se optimiza el suplemento de aminoácidos añadiendo aminoácidos sintéticos. Su viabilidad puede ser limitada en sistemas de producción de rumiantes basados en pastizales, ya que el pasto más viejo puede reducir la calidad de la alimentación. Esta medida consigue reducir las emisiones de N (Sajeev et al., 2018).
- **Incrementar la productividad** del ganado lechero y de carne mediante el aumento de la producción de leche o el aumento de peso diario reduce las emisiones de CH₄ (y potencialmente de NO₂) por kg de producto. La productividad puede incrementarse aumentando la producción de leche por año y aumentando la cantidad de ciclos de producción de leche. Es viable, pero requiere un equilibrio entre la reducción de emisiones a través del aumento de productividad y la capacidad limitada del ganado para manejar concentrados. La capacidad del ganado para convertir la proteína del forraje, no comestible para los humanos, en proteína de alto valor, es valiosa desde una perspectiva de recursos y biodiversidad. Reduce las emisiones de CH₄ (y potencialmente de NO₂).
- **Incrementar la longevidad del ganado lechero.** Una dieta optimizada y condiciones de alojamiento mejoradas permiten una mayor longevidad del ganado lechero, por lo que se necesitan menos animales de reemplazo, reduciendo así las pérdidas de N por producto.

9.4.2.2 Medidas sobre el diseño de los alojamientos de los animales

El catálogo de medidas existentes en estos apartados es variable, dependiendo del tamaño y tipo de cabaña, medidas en el alojamiento y en el almacenamiento de los estiércoles. A nivel estatal está regulado por el RD 988/2022, por el que se regula el Registro General de las Mejores Técnicas Disponibles en Explotaciones y el soporte para el cálculo, seguimiento y notificación de las emisiones en ganadería (sistema informatizado ECOGAN), y se modifican diversas normas en materia agraria, en principio para granjas IPPC.

- **Retirada frecuente de los purines** del espacio de los animales. La elevada frecuencia de la retirada de los purines del espacio del ganado y el almacenaje en depósitos exteriores puede disminuir las emisiones al reducirse la superficie de contacto purín-atmósfera y la temperatura de almacenamiento de los purines. También reducen las emisiones de CH₄ si el almacén exterior no está afectado por calores intensos. El RD 306/2020 recomienda vaciar las fosas de residuos de los alojamientos al menos una vez al mes. Además, estas explotaciones deben implementar al menos una de las siguientes técnicas para reducir las emisiones de gases contaminantes, como el vaciado de las fosas de purines de los alojamientos al menos dos veces por semana, lo que permite reducir en un 30% las emisiones de amoníaco y otros gases, la utilización de sistemas automatizados de limpieza del estiércol, como cintas transportadoras o robots, para mejorar la higiene y minimizar la acumulación de residuos, o el empleo de sistemas de tratamiento de purines que logren una reducción de al menos un 30% en las emisiones de NH₃, optimizando así la gestión de los residuos y su impacto ambiental.
- **Separación física** de las heces y la orina en el sistema de alojamiento, reduciendo así la hidrólisis de la urea, y las emisiones de NH₃ tanto en el alojamiento como en la dispersión del estiércol. La separación sólido-líquido también reduce las emisiones durante la aplicación en el terreno, donde la orina infiltra el suelo más fácilmente que el purín mezclado (Figura 9.29).
- **Acidificar la superficie de residuos** en el espacio de los animales, produciendo una conversión de NH₃ (gas) en NH₄⁺ (ión soluble), y además ayuda a reducir las emisiones durante toda la cadena de procesos de la gestión del purín. No se aconseja acidificar con ácido sulfúrico si se quiere generar biogás a partir de los purines.
- Usar **materiales absorbentes de urea** para las **camas** de los animales reduce la emisión de NH₃ al fijar el N, y también reduce las emisiones de N₂O, otro gas importante de efecto invernadero. Esta medida también afecta para mejorar la calidad de vida de los animales.
- Reducir la superficie de los residuos del suelo de los espacios de los animales mediante **drenajes por vacío** de manera completa y frecuente, aunque otras maneras que favorezcan el drenaje continuo de los residuos también pueden ser útiles para este fin.

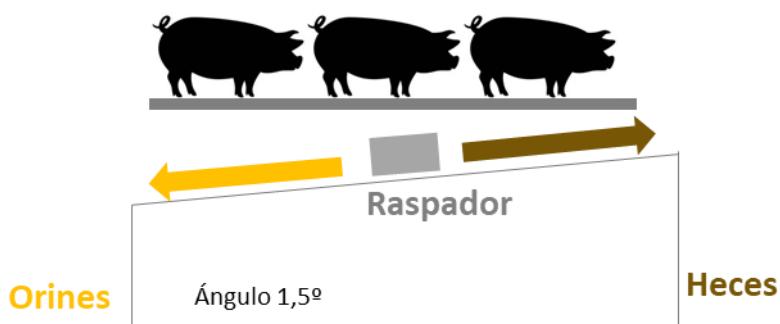


Figura 9.29. Sistema TRAC de separación sólido-líquido del purín mediante raspado mecánico en fosas en V con desnivel. Está reconocido como Mejor Técnica Disponible (MTD). La fase líquida (orines) se separa por gravedad gracias a la leve inclinación de la fosa. La fase sólida (heces) es recogida por un raspador que la arrastra en dirección opuesta a la caída de orines hasta un depósito de almacenaje, mientras éstos se canalizan mediante tubos hacia un colector exterior. Adaptado de Cordero (2021).

- **Ventilar** para refrigerar la superficie de los residuos depositados del espacio animal mediante un sistema cerrado de intercambio de calor reduce las emisiones de NH₃. La climatización del establo con enfriamiento de purines, aislamiento del techo y/o ventilación natural controlada automáticamente puede reducir las emisiones de NH₃ debido a la disminución de la temperatura y las velocidades del aire, y también puede ayudar a reducir las emisiones de CH₄ (VanderZaag et al., 2015).
- Equipar los sistemas de extracción de aire de los espacios de los animales con **lavadores ácidos del aire extraído** se ha comprobado que reduce mucho las emisiones de NH₃, especialmente en grandes instalaciones. Los costes no son elevados cuando se instalan en plantas de nueva construcción. Además, estos sistemas reducen los olores y las emisiones de PM y óxido nitroso (N₂O). Estos sistemas pueden también funcionar con **bio-filtros de bacterias**, que eliminan NH₃ y olores, en lugar de tratar el aire del extractor con lavadores (van Wagenberg & Groot, 2024).

9.4.2.3 Medidas sobre la manipulación y almacenaje de los residuos

- **Cubrir e impermeabilizar** los depósitos de purines y estiércol es necesario para reducir emisiones de NH₃. Cubrir el purín almacenado se puede llevar a cabo construyendo depósitos metálicos o de obra, pero también con bolsas o contenedores textiles. En depósitos abiertos se pueden aplicar colchas flotantes (Figura 9.30). Cuando el residuo sea predominantemente sólido se puede cubrir con arcilla, zeolitas o tiza para reducir emisiones. Almacenar el estiércol sólido en un lugar seco, fuera de la lluvia, también puede reducir las emisiones de N.
- **La acidificación de los purines** durante el almacenaje transforma NH₃ en NH₄⁺ y reduce emisiones del primero. Utilizar ácidos que cumplan con reglamentación REACH. No utilizar ácido sulfúrico si se pretende obtener biogás. La reducción del pH también reduce CH₄ y se espera que disminuya las emisiones de N₂O y N₂.
- La **digestión anaeróbica** asociada a la producción de biogás (CH₄) como fuente de energía eleva el contenido de NH₄⁺ y sube el pH del purín residual de esta digestión. Esta combinación hace que el potencial de emisión de NH₃ sea superior respecto al purín antes de digerir. Así pues, si se aplica esta digestión anaeróbica las MTDs recomiendan el uso de depósitos cubiertos y aplicar el purín residual como fertilizante con métodos de bajas emisiones como la inyección directa. La digestión anaeróbica es un proceso biológico en ausencia de oxígeno, realizado por microorganismos que descomponen la materia orgánica y producen biogás. Las cepas de bacterias metanogénicas como *Methanosaeta* son esenciales en el proceso.



Figura 9.30. Izquierda: Balsa de purines impermeabilizada con cierre perimetral (Miró y Teira, 2010). Derecha: Balsa de purines cubierta (Sidrach, 2020).

9.4.2.4 Medidas sobre la recuperación de nutrientes

En el RD 1051/2022, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios y en el Plan Estratégico de la PAC (Política Agrícola Común) se implementan parte de las medidas relacionadas con nutrientes adecuados, fijación de periodos para nutrientes, rotaciones, entre otros.

- Las **plantas de tratamiento de purines** que evaporan el agua y concentran N (plantas secadoras de purines) son una solución a muchas zonas problemáticas en emisiones de NH₃, ya que al concentrar el fertilizante la comercialización se ve favorecida y puede transportarse el fertilizante de la zona donde hay excedente de purines a otras sin excedente. La aplicación de este fertilizante seco tiene emisiones muy reducidas de NH₃. Además, el flujo de NH₃ por *stripping* (volatilización por incremento del pH) durante el secado del purín puede ser recuperado y convertido en NH₄⁺, mediante lavadores acidificados (con ácidos sulfúrico o nítrico) del flujo. El sulfato o nitrato amónico resultante puede ser comercializado como productos fertilizantes.

9.4.2.5 Medidas sobre la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos

- **Formular las dosis y frecuencia de aplicación** de fertilizantes orgánicos e inorgánicos de acuerdo con las **necesidades de los cultivos**. La sobredosis puede llegar a reducir la producción y ganancias, además de producir emisiones innecesarias. Por otro lado, la aplicación del N en el periodo cuando el cultivo-suelo es más activo favorece el crecimiento del cultivo y reduce la emisión, que además se reduce si se aplica el fertilizante fuera de periodos de calor. Se recomienda un **plan de manejo integrado de nutrientes** donde se cubran todas las necesidades nutricionales de los cultivos herbáceos y forrajeros de la finca, mediante el uso de todas las fuentes disponibles de nutrientes orgánicos e inorgánicos. Se debe priorizar la utilización de las fuentes disponibles de nutrientes orgánicos en primer lugar (por ejemplo, el estiércol del ganado) y el resto se aportará mediante fertilizantes inorgánicos. Permite la optimización de la utilización de nutrientes y reduce las pérdidas por contaminación, mejorando la eficiencia del uso del nitrógeno en el campo.
- **Prohibir la aplicación de purines** en los campos con sistemas de **aspersión** (Figura 9.31) o con bandas anchas (desde el 1 de enero de 2024 está prohibida la aplicación de purines en plato o abanico, según artículo 10 del **RD 1051/2022**, por el que se establecen normas para la nutrición

sostenible en los suelos agrarios). Hay que evitar al máximo el contacto del purín con el aire porque se multiplica la emisión si el contacto es elevado. Por eso es necesario aplicar los purines con inyectores o bien en superficie, pero en bandas muy finas, y evitar períodos y partes del día donde la temperatura elevada favorece la emisión. La comunidad autónoma y/o diputación pueden contribuir a cofinanciar sistemas de inyección de purines o de aplicación superficial en bandas finas. Además, si el purín se coloca bajo el dosel del cultivo, el dosel proporcionará una estructura física para reducir todavía más la tasa de pérdida de amoníaco.



Figura 9.31. Izquierda: Aplicación de purines mediante sistema en abanico (Foto: [Roi Fernández, La Voz de Galicia](#)). Derecha: Aplicación de purines mediante sistema de inyectores (Imagen cedida por [Rigual](#)).

- **Evitar aplicar purines de alta densidad.** Estos favorecen las emisiones de NH_3 porque al ser densos se infiltran peor y tienen más tiempo para emitir este contaminante. Si en estos casos se diluye el purín con agua freática no potable, este se infiltra más rápido y reduce emisiones (en un 30% para una dilución 1:1 de purín en agua).
- **Acidificar** (con pequeñas dosis de ácido sulfúrico) el **purín** antes de aplicarlo como fertilizante, favorece la formación de NH_4^+ que se infiltra y es aprovechado por el cultivo. Es aconsejable utilizar **inhibidores de la nitrificación** justo antes de la aplicación del purín al suelo con el objetivo de retrasar la conversión del contenido de NH_4^+ del purín en nitrato, que es más susceptible a las pérdidas de nitrógeno por desnitrificación, escorrentía y lixiviación (van Wagenberg y Groot, 2024).
- Cuando el purín se aplica antes de la siembra, es muy conveniente incorporar el purín al suelo (labrar) lo mejor y más rápidamente posible para que quede enterrado y así se **reduce el contacto con el aire** y las emisiones de NH_3 .
- El uso de los **inhibidores de ureasa** ralentiza la hidrólisis de la urea al inhibir la enzima ureasa en el suelo, lo que permite que la urea se incorpore al suelo y sea absorbido por las plantas, reduciendo emisiones de NH_3 , N_2O y NO_x del suelo.

9.4.2.6 Medidas sobre el uso de la tierra

- Introducir **cultivos perennes** que aumenten la cobertura de la tierra (pastizales, mezclas de pasto o pasto-trébol), puede reducir el riesgo de pérdidas ambientales de nitrógeno reactivo debido a su inmovilización en la biomasa de las plantas y la hojarasca.
- Usar **cultivos de cobertura en rotaciones** de cultivos arables (Figura 9.32) puede ayudar a reducir los niveles de N del suelo disponibles durante los períodos de alto riesgo de lixiviación de nitratos al absorber el N que se origina en la descomposición y mineralización postcosecha.

La inclusión de plantas que fijan N₂ atmosférico para producir formas de nitrógeno orgánico reduce la necesidad de aplicar N (como fertilizantes o estiércol) y las pérdidas de N asociadas con dichas aplicaciones.

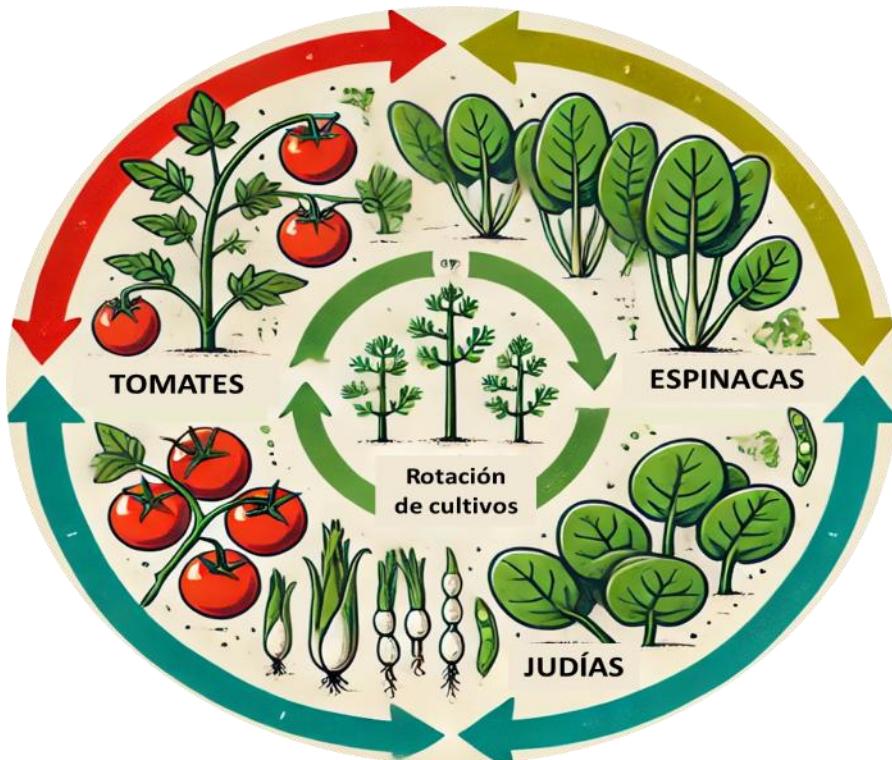


Figura 9.32. La importancia de la rotación de cultivos radica en la consecución de reponer los nutrientes que faltan en el suelo de forma natural, sin productos artificiales. Los tipos de rotación de cultivos más eficaces combinan plantas con diferentes tipos de crecimiento, como: sistema radicular profundo contra sistema radicular superficial, extracción de nutrientes contra acumulación o extracción de agua contra acumulación. Imagen adaptada de Cherlinka (2022) mediante IA (software DALL-E™).

- La introducción de **usos agroforestales**, con filas alternas de árboles y cultivos anuales o bloques de árboles en el paisaje, puede ayudar a eliminar el exceso de nitrógeno reactivo de los campos arables vecinos, minimizar la erosión, proporcionar protección contra el viento y apoyar la biodiversidad. La forestación y la preservación y plantación de franjas de árboles **alrededor de los campos** agrícolas pueden reducir la lixiviación de NO₃⁻ y tienen efectos muy positivos en la biodiversidad, y en la mitigación de NH₃.
- Los **pastizales sin fertilizar** tienen el potencial de eliminar NO₃⁻ de los flujos de agua lateral del suelo y pueden usarse como barreras para proteger la tierra natural o los arroyos adyacentes, mejora la calidad del agua al reducir la lixiviación de NO₃⁻ y protege la tierra natural y los cuerpos de agua adyacentes.
- La **planificación del uso de la tierra** y de las explotaciones agrícolas **basada en mapas digitales 3D** de precisión sobre la retención de N en el suelo puede ayudar a optimizar el uso de fertilizantes y reducir la lixiviación de N, mejora la retención de nutrientes a escala del paisaje, la calidad de aguas superficiales y subterráneas y reduce las pérdidas gaseosas de nitrógeno reactivo.
- La integración de cultivos y ganadería (**agricultura mixta**) ofrece oportunidades para conectar las entradas y excedentes de N, reduciendo los niveles generales de contaminación por éste y

aumentando la eficiencia en el uso del mismo a nivel de finca y paisaje. Se reducen las emisiones asociadas al transporte de alimentos y estiércol a larga distancia, y aumenta la eficiencia en el uso del N.

9.4.3. Medidas eficientes para la reducción de las emisiones de PM primario

Como se ha citado en capítulos anteriores el PM primario es aquel emitido directamente a la atmósfera como sólido/líquido. En el sector agropecuario estas emisiones se producen tanto en la agricultura (labrado, resuspensión polvo de las vías no asfaltadas y de acopios de materiales) y ganadería (emisiones de fabricación de piensos y forrajes, resuspensión de residuos y materias primas, entre otras).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en connivencia con la Federación Internacional de la Industria de Piensos (IFIF), elaboraron una guía de buenas prácticas en la elaboración de piensos (FAO, 2014), donde, entre otras, trata sobre las buenas prácticas de producción. Sin embargo, estas buenas prácticas están orientadas a evitar la contaminación de los piensos por microorganismos u otros compuestos químicos nocivos para la salud animal, y no la contaminación que su producción está generando. Así, estaciones de medición cercanas a granjas avícolas han registrado valores altos de contaminación del aire por valores elevados de PM10 y PM2.5 causados por la distribución de alimento y los vientos externos que ingresan al galpón, entre otros (Neusa et al, 2019). Por su parte, MAPA (2010) especifica en su “Guía de mejores técnicas disponibles del sector de la avicultura de puesta” de 2010 cuáles son los contaminantes específicos a considerar, conforme al Real Decreto Legislativo 1/2016, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación de la Ley 16/2002, que obliga a “*evaluar los índices de emisión de los principales contaminantes a la atmósfera, al agua y al suelo de las actividades e instalaciones afectadas*”, en cumplimiento de la Decisión 2000/479/CE relativa a la realización del inventario europeo de emisiones contaminantes. Se fijaron en total 26 compuestos en el caso de las emisiones al agua y 36 para las emisiones a la atmósfera, que serán objeto de comunicación obligatoria cuando superen ciertos umbrales (Tabla 9.15).

Tabla 9.15. Compuestos a notificar por el sector ganadero, conforme al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2010). Los valores se deben expresar en kg/año.

Contaminantes a la atmósfera	Contaminantes al agua
CH ₄	N
NH ₃	P
N ₂ O	Cu
PM10	Zn
	COT (Carbono orgánico total)

Por otra parte, la Confederación Española de Fabricantes de Alimentos Compuestos para animales (CESFAC) ha publicado la “Guía aplicación Atex en el sector de la alimentación animal” (CESFAC, 2019), donde se establece una clasificación de zonas que producen polvo, como las tolvas de recepción, transportadores de cadena, molino de martillos y los silos, entre otras, donde sería recomendable instalar **sistemas de aspiración localizada**, para disminuir las emisiones.

En USA Environmental Protection Agency (EPA, 2012) y Maffia et al. (2020) se describen medidas para reducir las emisiones primarias de PM en actividades agrícolas. Aquí hay algunas medidas comúnmente recomendadas para reducir las emisiones primarias de PM según las guías y prácticas de conservación de la calidad del aire. Estas medidas buscan reducir las emisiones de PM en diferentes etapas de la producción agrícola, desde la preparación del suelo hasta la gestión de residuos post-cosecha.

A continuación, basándonos en las guías citadas, se resumen medidas a implementar en el ámbito agropecuario para reducir PM primario:

- Control de erosión del suelo.
 - Cobertura del suelo: Mantener la tierra cubierta con vegetación o residuos de cultivos para evitar la erosión causada por el viento y las actividades mecánicas.
 - Cultivos de cobertura: Plantar cultivos de cobertura durante los períodos de barbecho para proteger el suelo de la erosión y mejorar su estructura.
 - Barreras contra el viento: Utilizar cortinas rompe-vientos naturales o artificiales para reducir la velocidad del viento y, por ende, la erosión del suelo.
- Reducción de polvo en carreteras y vías de acceso.
 - Pavimentación: Pavimentar las vías de acceso principales y las áreas de alto tráfico en las granjas para reducir la generación de polvo.
 - Riego de caminos: Aplicar agua (no potable) en caminos no pavimentados para reducir la emisión de partículas.
- Prácticas de labranza.
 - Labranza de conservación: Implementar prácticas de labranza mínima o cero labranzas para reducir la perturbación del suelo y la generación de polvo.
 - Labranza en condiciones óptimas: Realizar labores de labranza cuando el suelo esté húmedo para minimizar la generación de polvo, evitando trabajar en condiciones de viento fuerte.
- Manejo de residuos de cultivos.
 - Incorporación de residuos: Incorporar los residuos de cultivos al suelo en lugar de quemarlos para evitar la liberación de partículas.
 - Compostaje: Utilizar el compostaje como una alternativa a la quema de residuos agrícolas.

En lo referente a la producción de alimentos, algunas plantas (como las orujeras, producción de forrajes y piensos, entre otros) pueden generar emisiones importantes de PM (Figura 9.33).



Figura 9.33. Emisiones de planta de orujo.

Algunas medidas para reducirlas son:

- Tecnología y equipos en producción de piensos y forrajes.
 - Uso de equipos modernos: Emplear maquinaria y equipos modernos equipados con tecnologías de reducción de emisiones de PM, como filtros y sistemas de escape mejorados. Como, por ejemplo, utilizar secadores de granos de última generación diseñados para reducir las emisiones de PM. Estos secadores pueden incluir sistemas de recirculación de aire y tecnologías de combustión más limpias.
 - Mantenimiento de equipos: Realizar un mantenimiento regular de los equipos agrícolas para asegurar su eficiencia y reducir las emisiones no controladas.
- Almacenamiento y manejo de granos y piensos.
 - Almacenamiento cerrado: Utilizar sistemas de almacenamiento cerrados para granos y piensos para reducir la liberación de partículas durante el almacenamiento con sistemas de aspiración localizada.
 - Sistemas de transporte: Implementar sistemas de transporte cerrados para mover granos y piensos dentro de las instalaciones agrícolas y ganaderas.

Las grandes granjas pueden ocasionar emisiones importantes de PM, por la resuspensión de PM de residuos y alimentos y en algunos casos del uso de procesos de combustión para calefactar los establos.

En general, las explotaciones intensivas agropecuarias son más susceptibles a producir impactos en la calidad del aire que las extensivas, y es sobre las primeras en donde debe incidirse más sobre la implementación de las mejores técnicas disponibles.

9.5 Quema de biomasa

9.5.1 Contaminantes relevantes emitidos por la quema de biomasa

Las emisiones de contaminantes atmosféricos por quema de biomasa varían, en tipo y volumen, según sean de origen doméstico, agrícola o industrial, dado que tanto las condiciones de combustión (controlada en ámbitos industriales, muy variables en ámbitos domésticos, y no controlada en agrícolas) como el tipo de biomasa (madera, pastos, pellets, astillas, residuos) varían muy ampliamente.

Entre los principales contaminantes emitidos por la quema de biomasa cabe destacar **PM2.5** y **PM10**, hidrocarburos aromáticos policíclicos (**HAP**, como **BaP**), **CO**, **NOx**, **SO₂** y **COVs**. Además, las emisiones de la quema de biomasa pueden tener un gran impacto en los niveles de PM y O₃ en aire ambiente (in't Veld et al., 2022). De hecho, la Agencia Europea de Medio Ambiente EEA (2023a) muestra que el sector doméstico, residencial y comercial aportan las mayores contribuciones al inventario de emisión de UE-27 de 2021 para PM10 y PM2.5 (ambos primarios), CO, BC, y más del 80% de BaP. Tanto la proporción como el volumen de cada uno de estos contaminantes varía en función del combustible, su contenido en cenizas y humedad, y las condiciones de combustión. Así una combustión en una caldera eco-eficiente, con combustión homogénea e inyección de aire para aumentar el nivel de oxígeno (O₂), producirá bajos niveles de emisión PM, CO, BC y BaP, mientras que una caldera rústica para quemar troncos puede producir elevados niveles. Cabe puntualizar que, en el caso de España, los datos del **Inventario nacional de emisiones a la atmósfera 2022** (publicado en 2024) reflejan diferencias importantes respecto al contexto europeo. En cuanto a las emisiones de **PM2.5**, la principal fuente en España es la **quema de biomasa** en el sector agrario, específicamente la **quema abierta de restos de poda**, que representa el **41,2%** de las emisiones totales en este sector. A esto se suma la contribución significativa de la **combustión estacionaria pequeña**, principalmente en el sector residencial, que aporta el **25,5%** de las emisiones de PM2.5. Este patrón no solo es característico de las emisiones de **PM2.5**, sino que se observa también en las emisiones de **BC** y **CO**, en las que la quema de biomasa y la combustión residencial son igualmente predominantes. Esta situación subraya la necesidad de adoptar medidas específicas para España, enfocadas en la reducción de emisiones en estos sectores clave.

Además de estos contaminantes, en el caso de quemar madera reciclada (muebles, pallets, postes, vigas, entre otros) se pueden producir importantes emisiones de metales, los cuales se han aplicado/aplican en pinturas, barnices y tratamiento fitosanitario de maderas.

Es importante señalar que desde la caldera a la chimenea se produce una bajada de temperatura muy marcada y en ese tramo condensan muchas PM a partir de los gases (PM condensable). Según, Denier van der Gon (2015) las emisiones reales de PM en chimenea (incluyendo el PM condensable) multiplican por 4 las emisiones certificadas por los fabricantes (medidas en la caldera).

En España la **Ley 7/2022**, de residuos y suelos contaminados, estableció la prohibición a las quemas de restos agrícolas, salvo circunstancias fitosanitarias que la requieran y siempre con autorización previa, según se recoge en el artículo 27.3 de la ley. Sin embargo, una vez aprobada esta ley, una serie de CCAA solicitaron la derogación de este artículo, que finalmente ha sido modificado y desde enero de 2023, “las pequeñas y las microexplotaciones agrarias quedan dispensadas de esta regulación”, lo que supone buena parte de las explotaciones en España.

Entre los diferentes tipos de combustible encontramos biomasa leñosa, herbácea, restos de poda (quemados a veces en verde), y agro-residuos, como cáscaras de almendra, piñón, huesos de aceitunas, entre otros (Figura 9.34).



Figura 9.34. Diferentes tipos de combustible de biomasa utilizados (AIRUSE, 2018).

Además, en la práctica se observa que se queman directamente en campo, como pellets y astillas en calderas domésticas, comerciales o industriales, o como troncos en hogares convencionales.

Así, para la quema de biomasa doméstica, comercial e industrial existe un amplio abanico de calderas con un rango muy amplio de emisiones por kg de combustible (Figura 9.35). Desde las más altas emisiones en hogar de leña tradicional (manual en modo discontinuo y con control manual/pobre del aire de combustión) a las más bajas en una caldera de pellets con etiqueta ecológica (alimentación automática, e inyectores de aire) y las calderas industriales (alimentación automática, inyectores de aire y tecnología para tratar/reducir las emisiones antes de llegar a la chimenea). Las diferencias en la eficiencia de la combustión son evidentes y, en consecuencia, las emisiones resultantes también. Es por ello que lo más conveniente es quemar la biomasa en calderas industriales con las mejores técnicas disponibles aplicadas, no solamente en la combustión sino en el tratamiento de las emisiones. En ningún caso debe utilizarse maderas recicladas sometidas a fito-tratamientos, tanto en las plantas industriales como en la fabricación de pellets y astillas. Estas deberían quemarse siguiendo las directrices de incineración, y no de combustión. Es relevante destacar la disposición adicional primera del Real Decreto 818/2018, que regula consideraciones específicas para el uso de biocombustibles sólidos en calderas de uso no industrial. Entre los aspectos más destacados, se establece que los biocombustibles sólidos comercializados para este propósito no podrán haber recibido tratamiento o proceso químico alguno. Además, dicha regulación subraya la importancia de diferenciar claramente entre los requisitos de biocombustibles destinados al uso industrial y no industrial.

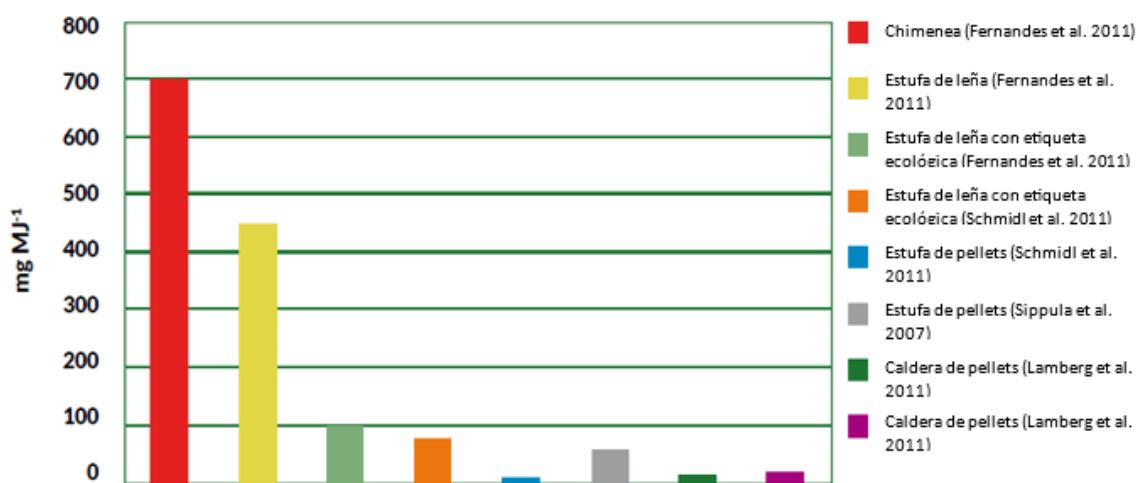


Figura 9.35. Diferentes tipos de calderas de combustión (arriba), y factores de emisión de partículas para diversos aparatos de combustión residenciales (abajo). AIRUSE (2018).

9.5.2 Factores que controlan las emisiones de la quema de biomasa

9.5.2.1 Quema de biomasa doméstica

El proyecto AIRUSE (2018) estudió una amplia combinación de tipo de combustible y de tecnología de combustión para sugerir estrategias de reducción de PM y BaP en la quema doméstica de biomasa (ver Figuras 9.34 y 9.35).

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

- Las emisiones de PM son extremadamente finas, con una alta proporción de partículas en la fracción ultrafina (concentración en número) y PM2.5 (concentración en masa) (Figura 9.36).

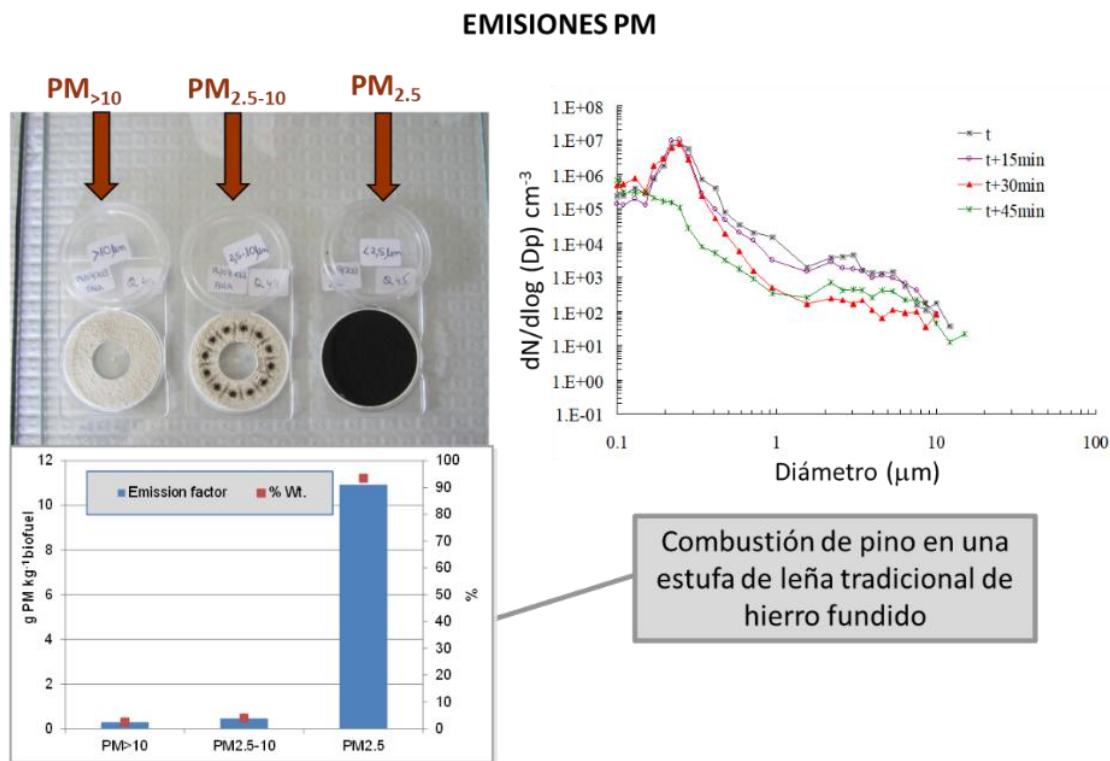


Figura 9.36. Detalles de los filtros del impactador en cascada para la medida de $>\text{PM}10$, $\text{PM}2.5-10$ y $\text{PM}2.5$ (superior izquierda), de los factores de emisión en g de PM por kg de combustible (inferior izquierda) y concentración en número de partículas desde 0.1 a 10 μm (superior derecha). Todo ello en medidas de combustión de madera de pino en estufa tradicional (AIRUSE, 2018). $dN/d\log(Dp) \text{ cm}^{-3}$, es el logaritmo de la concentración en número de partículas para cada rango de tamaño.

- Una caldera de pellets eco-certificada (de bajas emisiones) emite 15 veces menos, y una similar de astilla 12 veces menos. Una caldera de leña de hierro convencional emite 6 veces más que una de pellets certificada y 3 menos que un hogar abierto para leña (Figura 9.37). Estos resultados son similares a los presentados como revisión de diversos trabajos en la Figura 9.35.

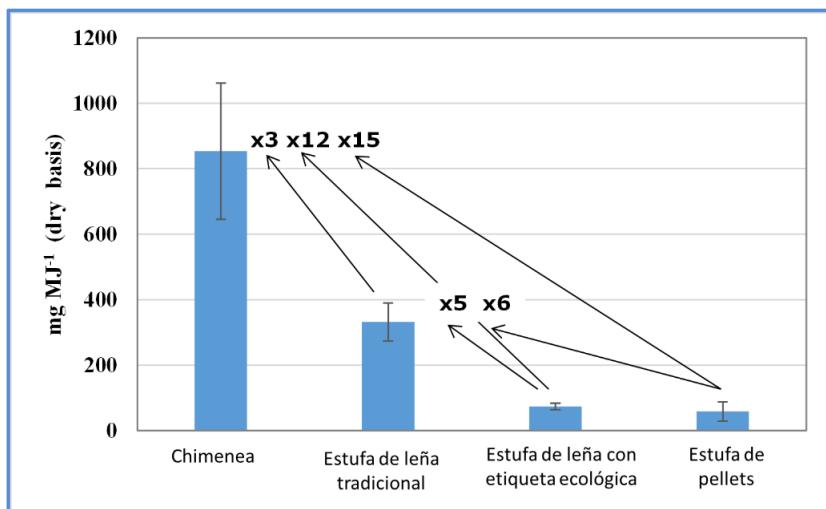
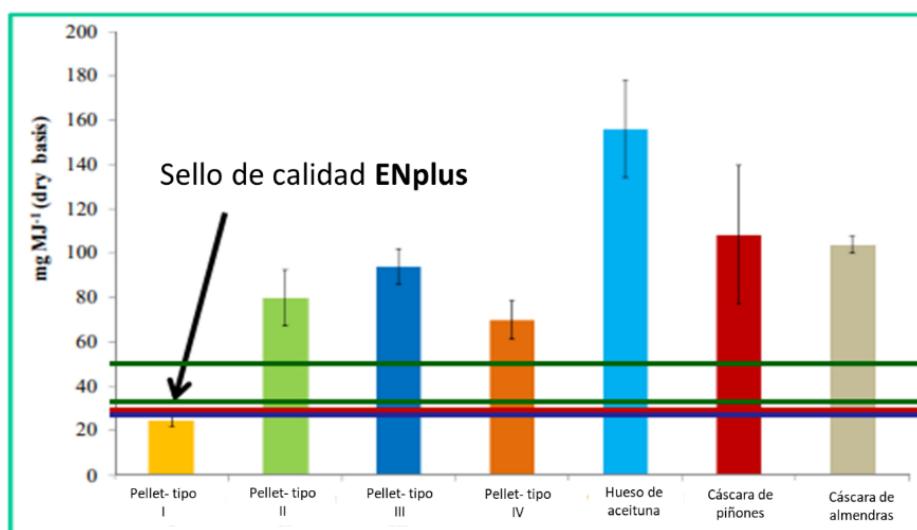


Figura 9.37. Resultados experimentales de AIRUSE (2018) sobre los factores de emisión de PM (en base seca) para la combustión de leña, astilla y pellets en diferentes tecnologías de combustión. Aproximadamente 1 kg de biomasa corresponde aproximadamente a 18 MJ.

- Los resultados mostraron también que no solamente es importante la tecnología de combustión sino el combustible y sus propiedades físico-químicas (humedad, cenizas, metales, entre otros). Así, la Figura 9.38 muestra los factores de emisión para diferentes biocombustibles quemados en una caldera de pellet eco-certificada. Estos incluyen 4 tipos de pellets comprados en comercios locales, y 3 tipos de agro-fueles, incluyendo cáscaras de almendra y piñón y hueso de aceituna. Como puede verse en la figura, solamente el pellet de tipo I (con la certificación ENplus) cumpliría con los valores de emisión para calderas de pellets de países que los han establecido, como Alemania, Austria, Dinamarca y Suiza. Tanto es así, que este pellet emite 4.5 veces menos que el pellet tipo III, 4 veces menos que el tipo II y 3 veces menos que el tipo IV. Así mismo, los agro-fueles emiten entre 5 (cáscara de piñón y almendra) y 8 (hueso de aceituna) veces más que el pellet tipo I. Estas elevadas diferencias pueden deberse a la variación en el valor calorífico, el contenido en ceniza y humedad, o al contenido de impurezas.
- El análisis de las cenizas de los 7 bio-combustibles mostraron altas concentraciones de varios metales en los pellets tipo II a IV. Aunque existe una normativa europea sobre la certificación de pellets de madera, con humedad y cenizas limitadas y origen natural de la madera, no hay en España una obligatoriedad de utilizar pellets certificados. Así, las cenizas de los pellets de tipo II a IV contienen altas concentraciones de metales, entre ellos Zn, Pb, Fe y As (Figura 9.39). Ello se debe sin duda al **uso, para fabricar esos pellets, de madera reciclada de origen industrial que contiene pinturas y productos fitosanitarios para el tratamiento de madera en exteriores e interiores**. Además de estos metales, las cenizas de los agro-fueles presentan altos contenidos en NO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ y Cl^- . **Tanto el alto contenido de estas especies solubles, como de los metales, no pueden calificar a estos residuos como inertes y mezclarse con los residuos sólidos urbanos (RSU).**



50 mg MJ⁻¹ en Dinamarca y Suiza

35 mg MJ⁻¹ combustibles de madera & 25 mg MJ⁻¹ para pellets en Austria

27 mg MJ⁻¹ en Alemania

Figura 9.38. Resultados experimentales de AIRUSE (2018) sobre los factores de emisión de PM (en base seca) para la combustión de diferentes biocombustibles en una estufa de pellets. La etiqueta de calidad ENplus existe desde 2010. Confirma el cumplimiento de los requisitos de calidad estipulados por la norma EN 1461-2. Los pellets para estufas y calderas pequeñas deben cumplir la clase ENplus A1. Las líneas horizontales indican los valores límite de emisión para calderas de biomasa en diferentes países, donde la línea verde hace referencia a Dinamarca y Suiza, la roja a Alemania y la azul a Austria.

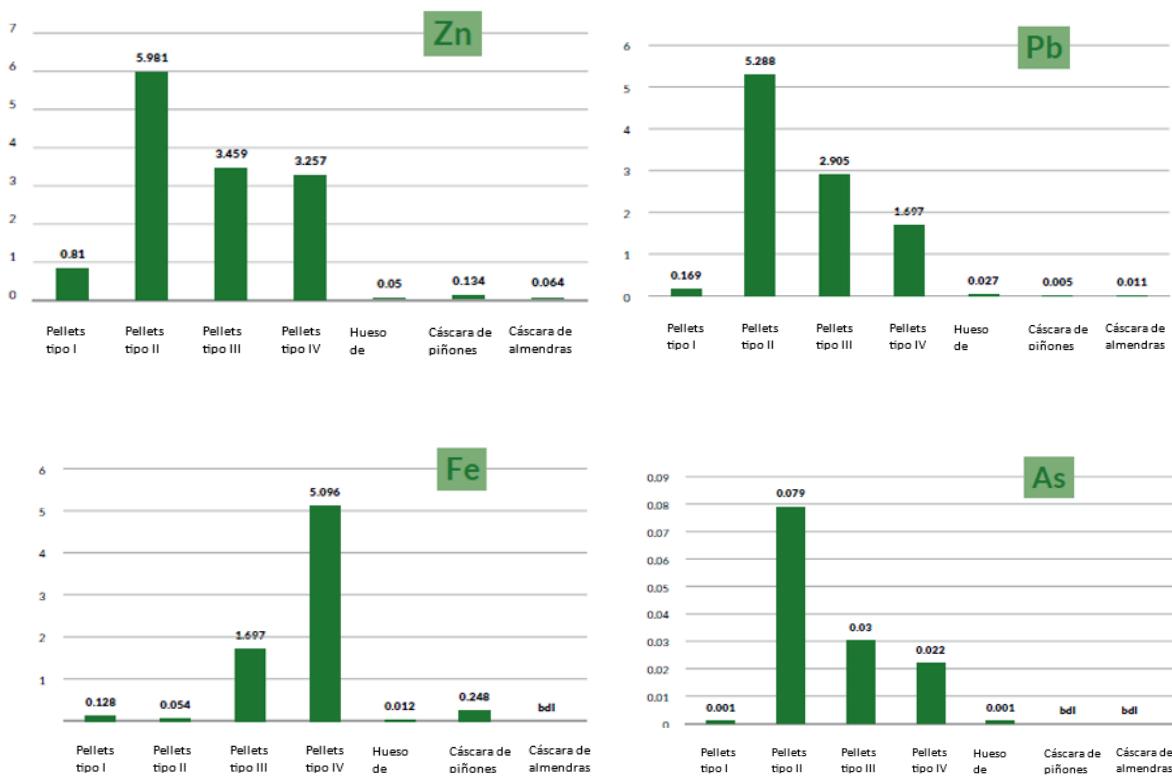


Figura 9.39. Fracciones básicas de PM10 de algunos elementos (% en peso); bdl - por debajo del límite de detección (AIRUSE, 2018). Es necesario establecer normas en la UE sobre la composición elemental de los pellets y astillas de madera comerciales para evitar la inclusión de materiales extraños. Sólo Alemania dispone de normas con amplios límites de oligoelementos.

- Además, aunque las nuevas tecnologías de combustión contribuyen a la reducción de las emisiones totales de PM en comparación con los aparatos de combustión más antiguos, las temperaturas de combustión más elevadas de las modernas estufas de leña pueden dar lugar a emisiones más elevadas de HAP (AIRUSE, 2018). Es importante que haya una normativa sobre emisiones para poder reducirlas mejorando el diseño de los aparatos. La reciente norma UNE-EN 16510-2-6:2023, para aparatos residenciales de combustión de combustibles sólidos, impone un límite medio de emisión de PM a todos los productos nuevos.
- Aun existiendo normativa europea para la certificación de calderas de biomasa en cuanto a emisiones, muchos países siguen desarrollando su propia normativa, dado que en muchos casos las emisiones de certificación se realizan a altas temperaturas y no incluyen las PM condensables (que puede incrementar hasta 4-5 veces las emisiones de PM).
- La Figura 9.40 muestra como las emisiones de PM en quema de biomasa incrementan con el contenido en humedad y cenizas del combustible. Es por ello que, **aunque se compre pellets ENPlus, estos deben conservarse en condiciones secas y libres de polvo.**
- AIRUSE (2018) también evaluó el potencial de aplicar filtros de mangas, precipitadores electrostáticos y conversores catalíticos a chimeneas domésticas de quema de biomasa. **Los resultados mostraron que estos no son aplicables a estas escalas dado que la condensación de alquitranes sobre estos impide su correcto funcionamiento a las pocas horas de su aplicación.** Es por ello que estas tecnologías de abatimiento de emisiones son útiles en grandes plantas de combustión e incineración, pero no a nivel doméstico/residencial.

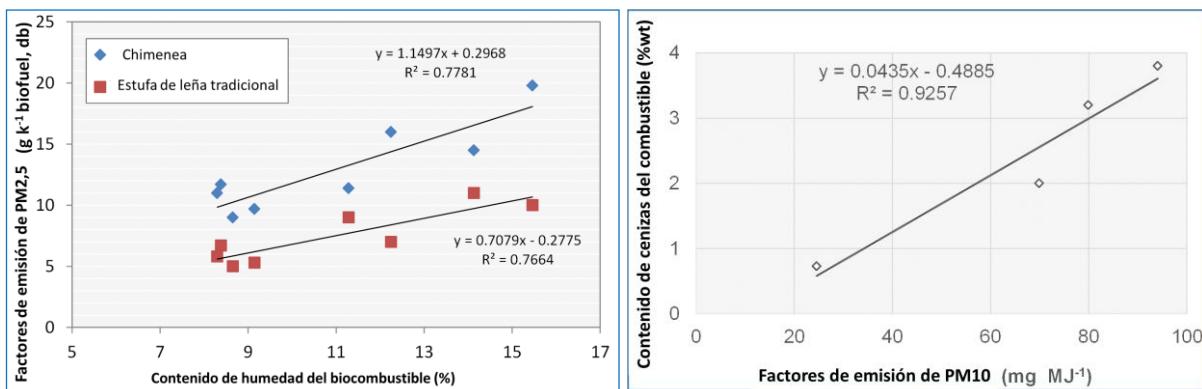


Figura 9.40. Correlación entre los factores de emisión de PM2.5 y PM10 y el contenido en humedad (izquierda) y cenizas (derecha), respectivamente (AIRUSE, 2018).

En conclusión, para conseguir una combustión eficiente y de bajas emisiones de la quema de biomasa, es necesario (i) usar **biocombustibles de calidad** definida y certificada, según normativa vigente, así como su almacenamiento en ambientes de baja humedad, (ii) usar **equipos** de tecnología **certificada** según especificaciones normativas, o al menos garantizada por el fabricante para los biocombustibles empleados, y (iii) tener un **control** eficaz de las **condiciones** operativas y del mantenimiento de los equipos de combustión (CLRTAP, 2019).

En el marco de las acciones del PNCCA dirigidas a la concienciación e información de la ciudadanía, se han desarrollado herramientas y recursos que promueven buenas prácticas en el sector residencial. Entre estas iniciativas, destaca la elaboración de una infografía educativa (MITECO, 2024f) que recoge recomendaciones para un uso más sostenible de la energía en los hogares, incluyendo consejos específicos sobre la quema de leña y otros biocombustibles. Asimismo, conscientes de que la quema de leña en los hogares representa una fuente significativa de emisiones de contaminantes que impactan tanto en el medio ambiente como en la salud pública, el PNCCA ha adaptado el documento **Code of Good Practice for Wood-Burning and Small Combustion Installations** (UNECE, 2021), de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas. Este documento contiene orientaciones clave para reducir las emisiones derivadas del uso de leña, pellets y otros combustibles derivados de la madera en calefacción doméstica. Entre las principales recomendaciones destacan:

- **Selección del combustible adecuado:**
 - Usar leña seca con un contenido de humedad inferior al 20%. La leña húmeda genera más humo y emisiones de partículas contaminantes.
 - Evitar la quema de materiales tratados, pintados o barnizados, que liberan compuestos tóxicos al quemarse.
- **Almacenamiento del combustible:**
 - Guardar la leña en lugares ventilados y protegidos de la humedad para asegurar su secado adecuado antes de su uso.
- **Uso eficiente de los equipos de combustión:**
 - Optar por estufas y calderas modernas y certificadas que cumplan con los estándares de eficiencia energética y bajas emisiones.

- Asegurar el mantenimiento regular de las instalaciones y la limpieza de chimeneas para evitar obstrucciones y mejorar la combustión.
- **Prácticas de encendido y combustión:**
 - Utilizar el método de encendido "de arriba hacia abajo", que genera menos humo al permitir que el fuego se alimente gradualmente desde la parte superior.
 - No sofocar el fuego ni quemar grandes cantidades de combustible de una sola vez.
- **Contribución al medio ambiente y la salud pública:**
 - Reducir la frecuencia de uso de calefacciones basadas en leña, complementándolas con sistemas de calefacción más limpios cuando sea posible.

9.5.2.2 Quema de biomasa agrícola y ganadera

Estas quemas se refieren tanto a las quemas agrícolas de restos de podas, pastos y matorrales, residuos vegetales generados en el entorno agrario o silvícola, como los procedentes de cultivos (como arrozales), entre otros (Figura 9.41), y a la combustión para el acondicionamiento térmico en instalaciones ganaderas.



Figura 9.41. Quema de restos agrícolas en arrozales (izquierda) y a las orillas del río Guadalquivir (derecha).

La **quema agrícola** se produce con malas condiciones de combustión generando altas emisiones tanto de PM como de COVs. Como se ha expuesto anteriormente, estas quemas están prohibidas en las grandes instalaciones, mayoritarias en buena parte de la Unión Europea. Sin embargo, en España la mayor parte de las explotaciones son pequeñas instalaciones y micro-explotaciones agrarias, por lo que quedan fuera de esta prohibición. Concretamente, el artículo 27.3 de la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, establece que, con carácter general, no está permitida la quema de residuos vegetales generados en el entorno agrario o silvícola. Sin embargo, se contemplan excepciones específicas en determinados casos. Por un lado, las pequeñas y micro-explotaciones agrarias quedan exentas de esta regulación, de acuerdo con lo dispuesto en la Directiva (UE) 2016/2284 del Parlamento Europeo y del Consejo. Por otro lado, se permite la quema de estos residuos, siempre que se cuente con la autorización expresa del órgano competente de la Comunidad Autónoma correspondiente, cuando existan razones de carácter fitosanitario que no puedan abordarse con otros tratamientos y se justifique adecuadamente que no existen alternativas para evitar la propagación de plagas, o bien con el objetivo de prevenir incendios forestales. Estas excepciones reflejan un esfuerzo por equilibrar la protección del medio ambiente y la salud pública con la necesidad de gestionar adecuadamente los residuos vegetales en contextos específicos. Las quemas se suelen realizar durante épocas de

estabilidad meteorológica (baja dispersión), con lo cual su impacto en la calidad del aire es mayor. Afectan tanto a los niveles de PM como a los de O₃ por los elevados COVs emitidos. In't Veld et al. (2022) demostró que en las zonas donde se quemaba biomasa agrícola en los márgenes del Guadalquivir (Figura 9.41), los niveles de O₃ incrementaban marcadamente. Además, en algunas ciudades, como Valencia, la quema de residuos agrícolas en arrozales ha llegado a producir niveles de contaminación por PM que no se alcanzan por otros tipos de contaminación. Además, aunque cualquier quema de biomasa pueda generar emisiones de dioxinas por su contenido en Cl, estas emisiones pueden ser especialmente importantes en la quema en arrozales dado el elevado contenido en Cl de las aguas, suelos y paja (Shih et al, 2008).

Aunque el marco normativo lo permita, **se recomienda no realizar quemas agrícolas**. En su lugar se recomienda triturar la biomasa *in situ* para utilizarla como fertilizante; o bien recolectarla y quemarla en calderas industriales que tengan tecnologías adecuadas para el control de emisiones, y que, además, permiten su aprovechamiento energético. En el caso de los arrozales, dado el alto contenido en SiO₂ de las cenizas de la quema de paja, dichas cenizas pueden utilizarse para el cemento o la síntesis de zeolitas, entre otras aplicaciones (Ali et al, 2012, El-Sayed y El-Samni, 2006).

Las **quemas** de combustibles **en ganadería** para mantenimiento de las instalaciones se realizan muchas veces con combustibles contaminantes como carbón, coque de petróleo, o madera reciclada, entre otros, que no solo emiten una elevada cantidad de PM, sino también otros compuestos químicos, como metales pesados, en el caso de madera reciclada sometida a fito-tratamientos, del carbono o del coque de petróleo. Es por este motivo que en granjas se recomienda la instalación de calderas de biomasa de tipo industrial, ya que son más eficientes y producen menos emisiones, así como usar biomasa certificada y de calidad, para así reducir costes energéticos en el sector agro-ganadero. Un ejemplo es la Asociación Española de la Biomasa (AveBiom), que presentó en 2020 ante agricultores y ganaderos de Castilla y León soluciones para reducir costes energéticos en sus explotaciones aprovechando las podas de cultivos leñosos (AveBiom, 2020). En estos casos, es importante que las calderas no solamente tengan una buena combustión, sino que dispongan de tratamiento de las emisiones. Por otro lado, la quema de residuos orgánicos en granjas avícolas y ganaderas se utiliza comúnmente para eliminar patógenos y plagas que pueden afectar a la salud del ganado y las aves. Esto incluye la quema de camas de pollos usadas, paja contaminada y otros materiales orgánicos. En Europa y también en España, esta práctica se realiza bajo estrictas regulaciones.

9.5.2.3 Quema de biomasa industrial

Algunas industrias utilizan quema de combustibles, entre ellos de biomasa, para producir energía necesaria para sus procesos, o bien para calentar espacios dentro de la propia industria. El proyecto RE4INDUSTRY (2024) tiene como objetivo “apoyar a las industrias con uso intensivo de energía (EII) (Figura 9.42) en la identificación e integración de soluciones de energía renovable (ER), junto con la definición de planes de acción para la descarbonización, y transformar el panorama industrial de la UE en un gran nicho de mercado para la adopción de energías renovables, al tiempo que se definen las condiciones marco apropiadas para escenarios de corto y largo plazo”, tomando la quema de biomasa como una alternativa para la descarbonización del sector.

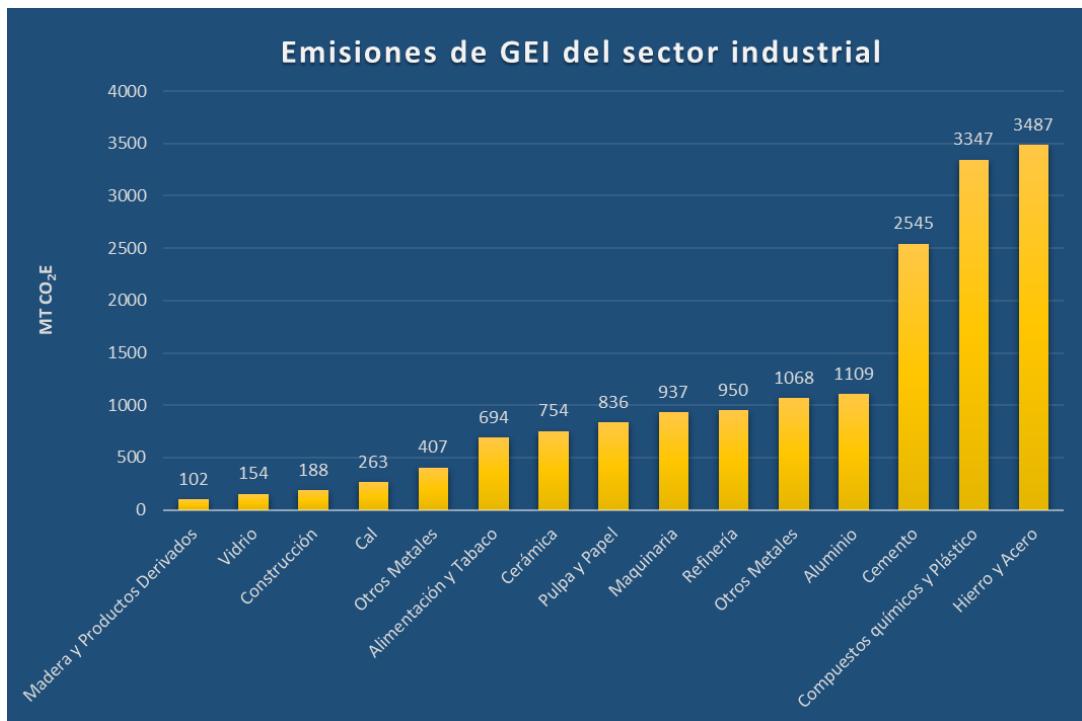


Figura 9.42. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por las EII. (Adaptado de Rissman et al., 2020)

Tanto los equipos de combustión como los de gasificación de biomasa pueden proporcionar toda la gama de temperaturas que requieren los procesos industriales (Malico et al., 2019).

La sustitución de combustibles fósiles (principalmente gas natural y carbón) por biomasa dependen de procesos termoquímicos de conversión y de procesos biológicos de valorización. La tecnología de gasificación tiene el mejor rendimiento y las emisiones más bajas, pero aún presenta retos importantes para aumentar su viabilidad económica, así como nichos de oportunidad y costes de inversión (Islas, 2019). La cogeneración, que produce simultáneamente electricidad y calor a partir de biomasa, maximiza la utilización de la energía liberada, alcanzando eficiencias muy elevadas.

Las calderas de biomasa industriales pueden controlar más eficientemente las emisiones de PM, NO_x y SO₂, entre otros, asegurando unos niveles de emisión significativamente inferiores a los indicados en la normativa vigente. No obstante, la composición del combustible, el contenido de humedad, y las condiciones de operación de la caldera son factores críticos que afectan las emisiones. La quema de residuos de madera muestra una alta variabilidad en los factores de emisión debido a la heterogeneidad del combustible (Bhatt et al., 2023).

Es importante resaltar que la quema de biomasa produce elevadas emisiones de COVs, que son precursores, tanto de O₃, como de PM secundario orgánico. Sin embargo, la aplicación de control de emisiones para COVs no es obligatoria en estas instalaciones. Estas emisiones son muy relevantes en España. Se prevé que en el periodo 2020-2030 se produzca un incremento muy importante de las calderas de biomasa industriales y de generación eléctrica. Así, Oliveira et al. (2023) muestra unas proyecciones de emisiones de COVs para el 2030 que alcanzan un aumento significativo (+37%) del potencial máximo de formación de O₃ del sector de la generación de electricidad (Figura 9.43), debido principalmente al aumento previsto en el uso de biomasa para la generación de electricidad.

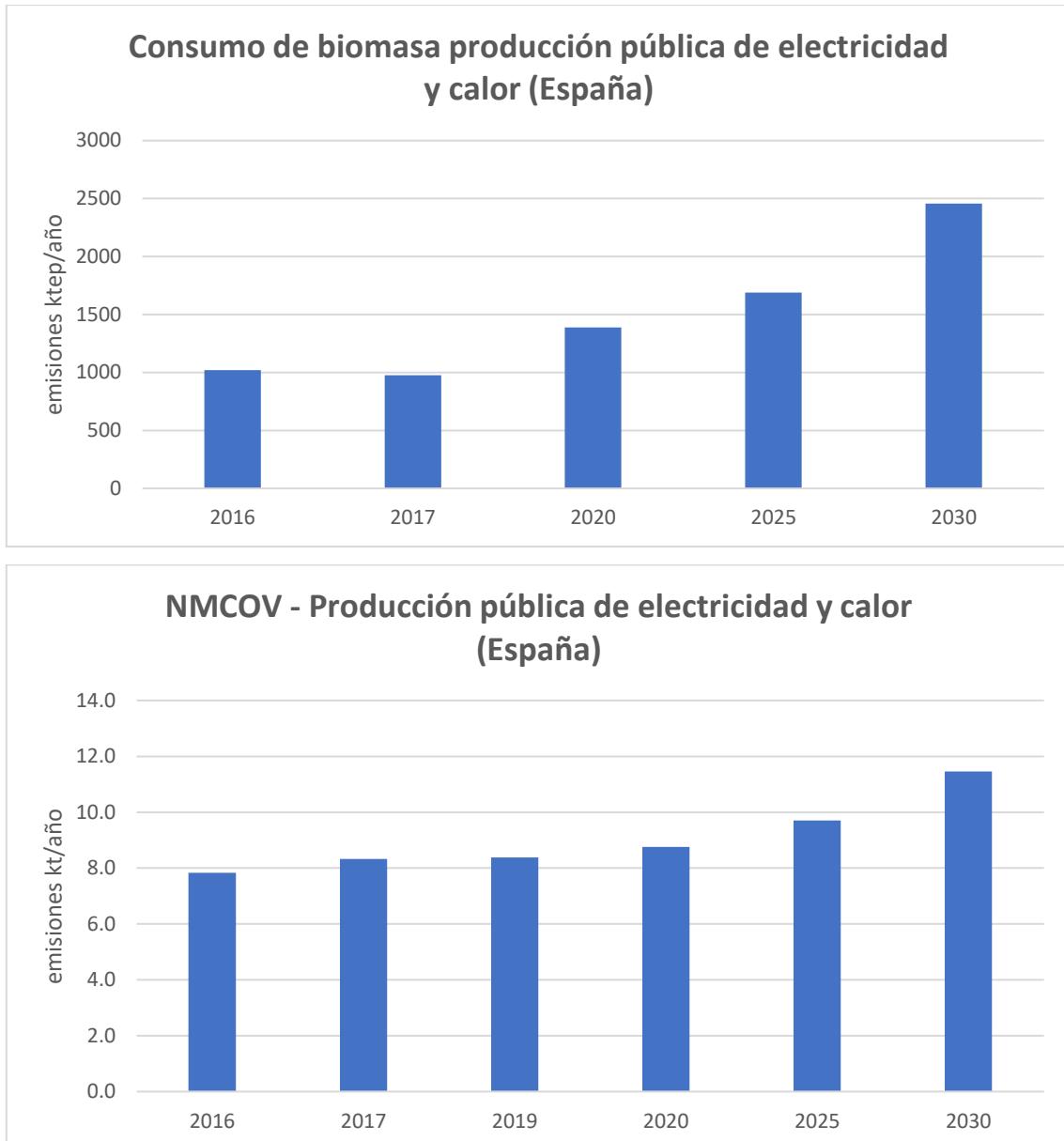


Figura 9.43. Proyecciones de MITECO del año 2022. Se ve (abajo) la proyección de las emisiones de NMCOV procedentes del sector de generación de energía eléctrica (incremento de 37% entre 2019 y 2030). No se especifican tipo de combustibles, pero de acuerdo con el PNIEC, este incremento viene principalmente del incremento que se espera en lo de biomasa (aumento de más del 50%) (arriba). (Datos facilitados por M. Guevara, BSC, comunicación personal, 1 de agosto de 2024).

Por todo lo comentado en este punto de la biomasa industrial, tanto en las Grandes Instalaciones de Combustión (GIC) como en las Medianas Instalaciones de Combustión (MIC), se incluyen valores límite de emisión a los contaminantes atmosféricos emitidos en su quema.

9.5.3 Medidas eficientes

9.5.3.1 Medidas para la quema de biomasa doméstica

Medidas propuestas en el PNCCA

En el marco del PNCCA, se ha desarrollado un conjunto de medidas específicas para reducir las emisiones de las pequeñas instalaciones de combustión (apartado 4.1.10; MITECO, 2024c). Estas acciones buscan minimizar el impacto ambiental de la combustión de biomasa y otros combustibles utilizados en sistemas térmicos de pequeña escala.

Entre las acciones contempladas se incluyen estrategias de información y comunicación, iniciativas para la caracterización del parque de calderas de biomasa, así como la incorporación de requisitos específicos en las ayudas públicas destinadas a la instalación de equipos térmicos de biomasa, con el fin de evitar un aumento descontrolado de las emisiones.

En este sentido, los requisitos exigidos para las ayudas concedidas en el marco de la promoción de energías renovables y biomasa se han diseñado para garantizar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes en aparatos de calefacción local y calderas de menos de 1 MW. Estos requisitos incluyen:

- Acreditación del cumplimiento de requisitos de eficiencia energética y emisiones: Los equipos deben contar con una certificación del fabricante que garantice que cumplen con los estándares de eficiencia energética estacional y límites de emisiones establecidos en los Reglamentos (UE) 2015/1185 y 2015/1189, incluso si están fuera del ámbito de aplicación de dichos reglamentos.
- Certificación del combustible empleado: Se exige que el combustible utilizado cuente con un certificado de calidad de clase A1, otorgado por una entidad independiente, conforme a las normas UNE-EN-ISO 17225-2, 17225-3, 17225-4, UNE-164003 y UNE-164004, garantizando así un menor impacto ambiental.
- Limitaciones en la subvención de equipos alimentados con leña de madera: Solo podrán ser subvencionadas aquellas instalaciones que utilicen leña con un contenido de humedad inferior al 20% (clase M20, según la norma UNE-EN-ISO 17225-5) y que no se ubiquen en municipios de más de 50.000 habitantes o en capitales de provincia.

Medidas adicionales propuestas

Para reducir las emisiones de la quema de biomasa doméstica se aconsejan, además de lo ya expuesto, las siguientes medidas:

- **Clasificar las calderas** de biomasa doméstica que se vendan o instalen en las poblaciones afectadas. Catalogarlas con diferentes **grados de eco-eficiencia** (la directiva de eco-eficiencia no es válida para este fin según muchos estados o regiones que han tenido que desarrollar su clasificación, como ahora la Región de Lombardía). Éstas incluyen calderas de astilla y pellet. También cámaras de combustión con una recirculación dividida de los gases de escape que alimentan el aire primario en la zona inferior y se inyectan en la zona superior de quemado a alta temperatura, logrando así un fuego sin llama y una mínima emisión de partículas.

- Los ayuntamientos deben obligar a que las **nuevas calderas** que se instalen sean **del grupo de más bajas emisiones**.
- Generar un programa de **subvenciones, u otros incentivos** (por ejemplo, en Lombardía se cofinancia un 60% del coste de cambiar un sistema de calefacción de biomasa viejo por uno nuevo que pertenezca al grupo de bajas emisiones).
- Aconsejar o hacer obligatorio el uso de **biomasa certificada tipo ENPLUS** (origen natural, baja en cenizas y humedad) y prohibir la quema de madera de muebles viejos, palets, construcción, entre otros.

Estas medidas se han aplicado en la Región de Lombardía al norte de Italia desde hace años, así como en Austria, Dinamarca, Alemania y Reino Unido entre otros. El proyecto AIRUSE ha demostrado (Querol y Amato, 2017) que una **caldera eco-eficiente** de pellets o de astilla reducen las emisiones de PM respecto a un hogar de madera convencional en un factor de 15-16, y respecto a un hogar con puerta alrededor de 6 veces, pero también que, si el pellet no es certificado, las emisiones pueden incrementar en un factor de 4 respecto al certificado. También recomendó que, una vez comprado el pellet o astilla certificados, estos se han de guardar en un lugar con baja humedad para impedir que la biomasa coja humedad y las emisiones incrementen.

9.5.3.2 Medidas para la quema de biomasa agrícola

La quema de biomasa agrícola se suele permitir en condiciones de viento reducido para no provocar incendios, pero es en estas condiciones cuando el impacto en los niveles de PM es más elevado por las bajas condiciones de dispersión. Esta quema causa emisiones muy elevadas de PM y de COVs que son precursores de O₃ troposférico (MITECO, 2022)

Para reducir las emisiones de la quema de biomasa agrícola se aconsejan las siguientes medidas:

- **Prohibir la quema** de biomasa agrícola *in situ*, y reducirla a un límite de toneladas por hectárea para zonas a alturas superiores a 1000 m s.n.m. (que emitan por encima de la inversión térmica en invierno), como se está haciendo en el Valle del Po al norte de Italia.
- Crear (**desde la Administración**) un **sistema de trituración** *in situ* para aplicar como fertilizante, o de recogida para quemar en calderas industriales de emisiones controladas. En algunas zonas de cultivo de naranjos en la Comunidad Valenciana se realiza esta práctica, y en silvicultura también.
- Recoger la biomasa en centros logísticos y transformarla en pellets válidos para uso industrial.
- Valorizar la biomasa, teniendo en cuenta la jerarquía de tratamiento de residuos establecida en la Ley de residuos, librándola de los improprios inorgánicos como piedras, metales, plásticos, entre otros.

9.5.3.3 Medidas para la quema de biomasa y otros combustibles en granjas

En algunas granjas se queman combustibles diversos para calentar a los animales en invierno con sistemas rudimentarios que producen elevadas emisiones de contaminantes. Dependiendo del volumen de las instalaciones se puede exigir instalación de calderas industriales equipadas con filtros de mangas u otros sistemas de control de emisiones (en el caso de grandes volúmenes). Para las instalaciones pequeñas se puede exigir **sistemas de bajas emisiones** y **prohibir** la quema de

combustibles más contaminantes como, carbón, coque de petróleo, o madera reciclada, entre otros. Para reducir las emisiones de este tipo se aconseja:

- Llevar a cabo un **inventario a nivel local (ayuntamientos, comunidades autónomas, según competencias)** de este tipo de foco, el consumo y tipo de combustible, y diseñar actuaciones para la reducción de emisiones basándose en las expuestas en el anterior párrafo.
- Usar **calderas** de tipo industrial, cuya combustión es más eficiente.
- Aprovechar la **agro-biomasa** disponible en el entorno.

9.5.3.4 Medidas para la quema de biomasa y otros combustibles en industria

Para reducir las emisiones de una caldera industrial de biomasa, esta ha de contar con:

- Una tecnología adecuada que favorezca una combustión completa con altas concentraciones de O₂.
- Uso de biomasa natural con bajos contenidos de ceniza y humedad.
- Unos controles adecuados de las emisiones (filtros, precipitadores electrostáticos, ...).

El quemar la biomasa en una caldera industrial no tiene que ser equivalente a generar bajas emisiones, si lo anterior no se cumple. Aun así, es importante resaltar que la quema de biomasa produce elevadas emisiones de COVs, que son precursores, tanto de O₃, como de PM secundario orgánico. Sin embargo, la aplicación de control de emisiones para COVs no es obligatoria en estas instalaciones. Sería muy conveniente que se obligara a retener COVs en las emisiones de estas plantas mediante tecnologías como convertidores catalíticos y carbono activo.

Según Malico et al. (2019), en 2017, en España, el uso de la biomasa con fines industriales no llegaba al 25%, mientras que el uso residencial era ligeramente inferior al 50%. Dado que las plantas industriales pueden tratar las emisiones y reducirlas mucho más que en el sector residencial, se aconseja establecer **redes de calor y frío** (Figura 9.44) entre las industrias y los edificios públicos (escuelas, hospitales, pabellones deportivos, entre otros) y/o privados (hoteles, residencias, entre otros), para abastecer con calefacción y agua caliente las instalaciones, y garantizar así una fuente de climatización de bajo coste que permite, además, el aprovechamiento de los recursos locales con la valorización de la biomasa.

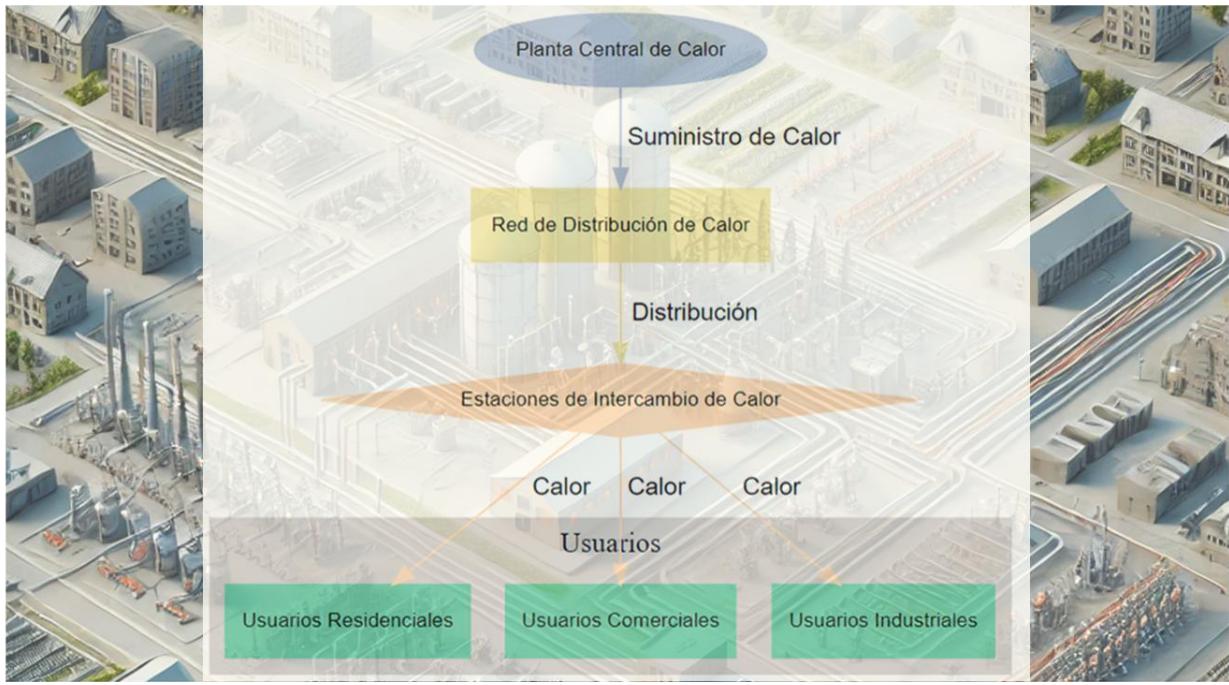


Figura 9.44. Esquema del funcionamiento de una red de calor (Imagen creada mediante IA, software DALL-E™).

9.6 Zonas portuarias y aeropuertos

9.6.1 Contaminantes relevantes emitidos por puertos y aeropuertos

El transporte marítimo y aéreo es fuente también de contaminación atmosférica, tanto en lo referente a calidad del aire como a contaminantes climáticos. Así en 2021, el transporte marítimo aportaba el 2% de las emisiones de gases de efecto invernadero, el 1% en el caso del aéreo, y un 12% el transporte en superficie (Rivera et al., 2023).

Las actividades generadoras de contaminantes atmosféricos en puertos y aeropuertos están ampliamente documentadas en la literatura (Riley et al., 2021, Umweltbundesamt, 2021; Sorte et al., 2020; Ducruet et al., 2023). Así, entre las principales actividades encontramos las siguientes (Figuras 9.45 y 9.46):

- **Maniobras de buques y aeronaves:** Las emisiones provienen del uso de combustibles fósiles en los motores de los buques durante las maniobras de llegada y salida, así como de las aeronaves durante el despegue, aterrizaje y rodaje en pista.
- **Emisiones de los buques amarrados (Figura 9.47):** Las emisiones provienen de la quema de combustibles para generar suministro de electricidad. Estas pueden ser muy importantes en el caso de los cruceros, que mantienen numerosos espacios climatizados durante períodos relativamente largos.
- **Equipos de manipulación de carga o de apoyo en tierra:** Incluye el uso de grúas, montacargas y otros equipos de manipulación de carga que funcionan con diésel en puertos, y el manejo de equipajes y cargas en aeropuertos.
- **Transporte vehicular interno y de acceso:** Los vehículos de carga, como camiones y trenes en puertos, y autobuses de transporte, taxis y vehículos personales en aeropuertos, contribuyen significativamente a las emisiones.
- **Mantenimiento y abastecimiento:** Las actividades de mantenimiento de buques y aeronaves, así como el abastecimiento de combustible, son fuentes importantes de contaminación en ambos entornos.
- **Infraestructura de almacenamiento y servicios:** La emisión de gases volátiles de materiales almacenados y el uso de generadores y equipos estacionarios contribuyen a la contaminación atmosférica.
- **Actividades de construcción y expansión:** Estas obras civiles, incluido el dragado en el caso de los puertos, tienen un impacto ambiental considerable.
- **Manejo de graneles pulverulentos en puertos:** Las operaciones de carga y descarga de graneles pulverulentos generan importantes cantidades de polvo. Para su minimización se pueden aplicar diferentes medidas: establecer protocolos de carga-descarga adaptados a la capacidad de emisión de polvo de los materiales, descarga sobre tolvas dotadas de aspiración, limitar operaciones cuando el viento supere una velocidad umbral, protección de las zonas con pantallas cortaviento y atrapa polvo, etc.
- **Almacenamiento de graneles en espera de carga a barco o camión:** El almacenamiento debe realizarse, siempre que sea posible en lugares confinados para evitar la resuspensión por el viento, bien parcialmente (con pantallas o paredes laterales) o totalmente (naves cerradas). Como ejemplo cabe destacar el puerto de Alicante, en el que las 4 estaciones de control de la

contaminación atmosférica del puerto, ubicado muy cerca de zonas habitadas, que están integradas en la Red Valenciana desde 2017, se ha constatado un decrecimiento del número de superaciones anuales del valor límite diario de PM10 ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$), especialmente desde la construcción de las naves cerradas puestas en marcha a lo largo de 2023 (Figura 9.48). De acuerdo con la normativa española el almacenamiento de productos químicos orgánicos o inorgánicos sólidos a granel en instalaciones industriales, puertos o centros logísticos, se encuentra incluida en el “Catálogo de Instalaciones Potencialmente Contaminadoras de la Atmósfera”, publicado como RD 100/2011, de 28 de enero. En función de su capacidad o distancia a población la actividad podría pertenecer a los grupos A, B o C y, por tanto, de acuerdo con lo dispuesto en la Ley 34/2007, Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de “Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera”, sujetas a autorización de emisiones a la atmósfera o notificación en su caso. Las autorizaciones de emisiones a la atmósfera establecen medidas preventivas para evitar la emisión de contaminantes, valores límite de emisión y controles periódicos. Para este control es especialmente útil el uso de sensores de bajo coste, que permiten disponer de información espacial de forma relativamente sencilla y establecer un sistema de alarmas para activar protocolos (Lopez et al., 2024). Constituyen una herramienta eficaz para las autoridades competentes de las CCAA para hacer que se respeten las condiciones establecidas en la autorización y reducir las emisiones a la atmósfera en este tipo de instalaciones.



Figura 9.45. La Figura ilustra las principales actividades contaminantes en los puertos y los contaminantes atmosféricos asociados a cada una de ellas. (Imágenes creadas mediante IA, software DALL-E™ y Canvas Multimedia Mágico™).



Figura 9.46. Se muestran las actividades aeroportuarias y los contaminantes asociados, destacando la complejidad de las fuentes de contaminación en estos entornos y subrayando la necesidad de estrategias de mitigación desde diversos enfoques. (Imágenes creadas mediante IA, software DALL-E™).



Figura 9.47. Emisiones de buques amarrados en puerto (Foto: [Marta de Mingo, La Vanguardia](#)).

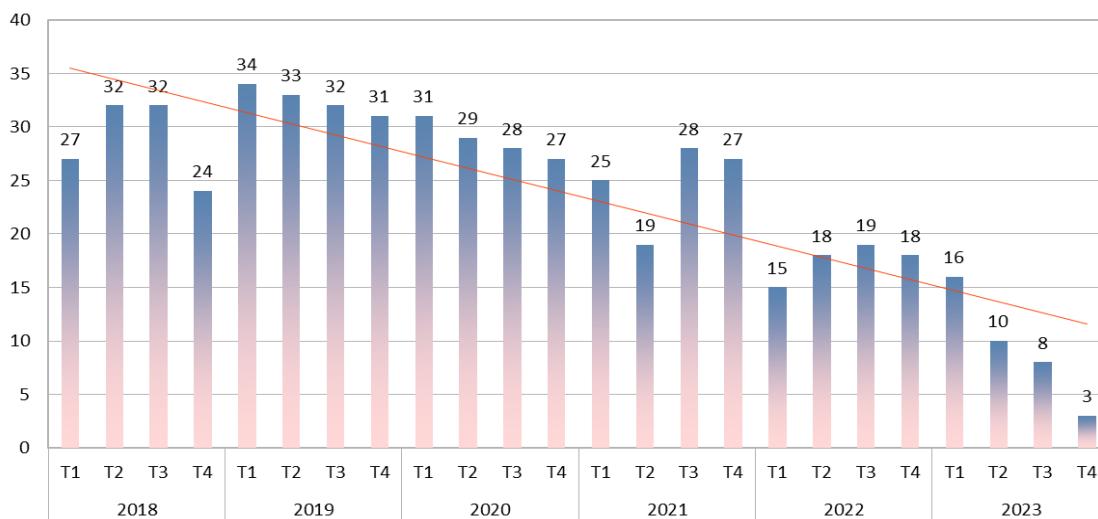


Figura 9.48. Número de superaciones anuales (2018-2023) del valor límite diario de PM10 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en 4 estaciones del puerto de Alicante, ubicado muy cerca de zonas habitadas, que están integradas en la Red Valenciana desde 2017 (Fuente: Generalitat de la Comunitat Valenciana).

Según Mueller et al. (2023) la contaminación atmosférica generada por el **transporte marítimo** ocasionaría por sí sola más de 250,000 muertes prematuras anuales a nivel global. Entre los principales contaminantes emitidos por el transporte marítimo destaca el SO₂, así como NO_x, PM, y las partículas ultrafinas (UFP) (Kuenen et al., 2022):

- **SO_x, NO_x, PM, BC y UFP** emitidos por los motores de combustión interna de barcos.
- **PM10 y PM2.5** de las cargas y descargas de graneles.
- **NO_x, BC, PM, UFP** de la maquinaria pesada portuaria y del tráfico rodado asociado.
- **COVs** de maquinaria, buques y depósitos (por ejemplo, de tanques de hidrocarburos).

En 2017, y solo en Europa, 203 cruceros emitieron alrededor de 62 kt de SO_x, 155 kt de NO_x, 10 kt de PM y más de 10 Mt de CO₂ según Transport & Environment (2023), quienes también indican que las emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes de los cruceros en los puertos superan los niveles anteriores a la pandemia. A pesar de la introducción del límite máximo de azufre en 2020, durante el año 2022 la emisión de SO_x de 218 cruceros europeos fue la equivalente a la de 1.000 millones de coches (Figura 9.49). No obstante, es esencial aquí destacar el papel del Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL), adoptado en 1973. Particular relevancia tiene su Anexo VI de 1997, que regula las emisiones atmosféricas de los buques, limitando los SO_x y NO_x y prohibiendo las sustancias que agotan el O₃. Entre las medidas más significativas, en 2020 se redujo el contenido de azufre en los combustibles marítimos al 0,5 % en masa, y en 2023 se aprobó la designación del Mediterráneo como Zona de Control de Emisiones (ECA). Esta designación, que entró en vigor en mayo de 2024, establecerá un límite de contenido de azufre del 0,1 % en masa a partir de 2025. Según estudios del UNEP/MAP, esta medida reducirá las emisiones de SO_x en el Mediterráneo en cerca del 78,7 %.

En comparación con 2019, el número de cruceros, el tiempo que pasan en los puertos y el combustible que consumen aumentaron en torno a una cuarta parte (23%-24%). Esto se tradujo en un aumento del 9% en las emisiones de SO_x, del 18% en las de NO_x y del 25% en las de PM2.5.

Dado que la mayoría de los puertos están muy integrados en las ciudades, la calidad del aire de estas últimas se ve con frecuencia alterada por las emisiones portuarias.

Por otro lado, la contaminación atmosférica generada por el **transporte aéreo** es una preocupación creciente en la actualidad por el incremento de sus actividades y el crecimiento de muchos aeropuertos. Entre los principales contaminantes que emiten los aeropuertos cabe destacar:

- **NO_x, COVs y UFP** emitidos por las aeronaves
- **PM10 y PM2.5** del desgaste de ruedas y frenos del aterrizaje.
- **NO_x, BC, PM, UFP** de la maquinaria pesada aeroportuaria y del tráfico rodado asociado.

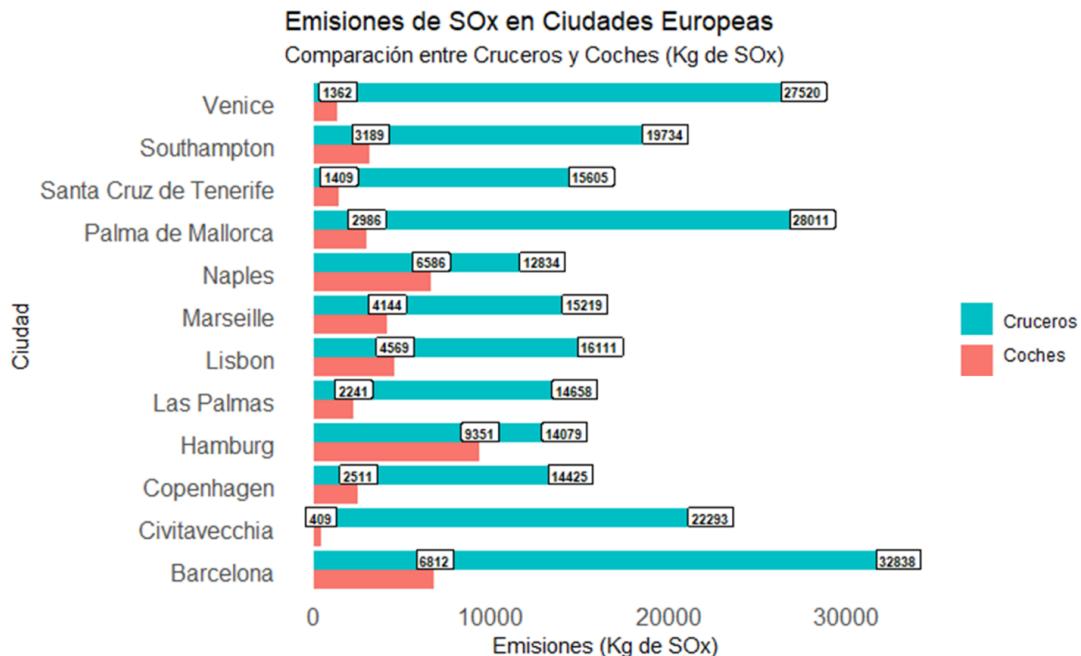


Figura 9.49. Comparación entre la contaminación de los cruceros y la de los coches. Emisiones de SO_x de los cruceros y los automóviles en las ciudades portuarias europeas en 2017 (kg). Adaptado de Transport & Environment (2023).

Cabe también mencionar la generación secundaria de O₃, cuando los COVs se oxidan en presencia de NOx y luz solar.

Diversos estudios han señalado a los aeropuertos como una fuente significativa de UFP, ya que pueden causar aumentos en las concentraciones a nivel del suelo en grandes áreas a sotavento de los aeropuertos (Riley et al., 2021; Stacey, 2019; Hudda et al., 2018). Si bien puede resultar difícil distinguir la exposición a las UFP relacionadas con la aviación de otras fuentes urbanas, especialmente en zonas con densas redes de carreteras, existen diferencias clave en la distribución de tamaños de estas partículas (Austin et al., 2021). Mueller et al. (2022) estudiaron los cambios en las concentraciones de UFP cerca del aeropuerto de Boston (EEUU) tras la reducción de la actividad del transporte durante la pandemia COVID-19, y observaron una clara disminución de las UFP al inicio de la pandemia, e incluso un año más tarde los valores eran más bajos que antes de la pandemia.

Hay que resaltar que las UFP no tienen valores límite en la nueva Directiva europea de calidad del aire. Sin embargo, requiere de su medición en zonas definidas como *hotspots*, o zonas de alta

contaminación, entre las que incluye los puertos y aeropuertos, además de zonas de tráfico intenso e industriales.

9.6.2 Medidas eficientes

Los Planes de Aire Limpio o los Códigos de Buenas Prácticas que desarrollan algunos puertos o aeropuertos pueden ser una medida eficaz, pero es conveniente que se incluyan en los PMCA aprobados por las CCAA, porque de esta forma pasan de ser un instrumento voluntario a una norma de obligado cumplimiento para todas las actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y su incumplimiento puede dar lugar a infracciones persegibles.

Dentro del Plan de Acción hacia la Contaminación Cero de la UE se publicaron las propuestas legislativas "*Objetivo 55*" (CUE, 2023b) (Figura 9.50) donde se exponen las formas en que la UE alcanzará la reducción de las emisiones en al menos el 55% para 2030. Algunos propósitos y actuaciones afectan al sector marítimo y de la aviación como, por ejemplo, promover la utilización de combustibles más ecológicos, la revisión de la Directiva sobre el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la UE Relativa a la Aviación, la iniciativa *ReFuelEU Aviation*, la revisión de la Directiva sobre Energías Renovables, *FuelEU Maritime Directive* y la revisión de la Directiva sobre Fiscalidad de la Energía.

Es importante destacar la existencia del Reglamento (UE) 2023/1804, que establece obligaciones específicas para la implantación de infraestructuras destinadas a combustibles alternativos. Este reglamento fija, como meta para 2030, el suministro obligatorio de electricidad a buques contenedores y de pasajeros durante su atraque en los puertos pertenecientes a la Red Transeuropea de Transporte. En línea con esta normativa, Puertos del Estado ha desarrollado el proyecto *OPS (On-shore Power Supply) Master Plan for Spanish Ports*, un Plan Director que detalla las estrategias para el suministro eléctrico a buques en puerto. La última modificación de este plan ha sido en junio de 2024 para alinearse con los requerimientos establecidos en el citado reglamento.

Revisión del ETS de la UE	Actualización del régimen de comercio de derechos de emisión
Revisión de la Directiva del Impuesto Energético	Ajustar la fiscalidad energética para incentivar el uso de energías limpias
Reglamento de reparto de esfuerzos	Distribución de objetivos de reducción de emisiones entre los Estados miembros
ReFuelEU aviación	Promover el uso de combustibles sostenibles en la aviación
Mecanismo de ajuste en frontera por carbono	Impuestos sobre importaciones de productos de alto contenido de carbono
Fundación Social del Clima	Proporcionar apoyo financiero a los ciudadanos
FuelEU marítimo	Incentivar el uso de combustibles sostenibles en el transporte marítimo
Estrategia forestal de la UE	Implementar políticas para la gestión sostenible de los bosques
Directiva Energía Renovables	Fomentar el uso de energías renovables en todos los sectores
Directiva Eficiencia Energética	Mejorar la eficiencia energética en la construcción y la industria

Figura 9.50. Propuestas de “Objetivo 55”, medidas para alcanzar los objetivos climáticos de la UE. Adaptado de EASA (2022).

Si bien tanto la iniciativa *ReFuelEU Aviation* como la *FuelEU Maritime* tienen por objeto aumentar la utilización de combustibles sostenibles en las aeronaves y los buques a fin de reducir los contaminantes de efecto invernadero, pueden tener también efectos (indeterminados) sobre la calidad del aire.

Es importante implementar estrategias de colaboración y planificación comunitaria que incluyan los siguientes aspectos:

- Planes de aire limpio: Desarrollar y mantener planes integrales de reducción de emisiones que incluyan metas específicas y fechas de implementación. Estos planes deben ser comunicados y actualizados regularmente para reflejar los avances y adaptarse a nuevas tecnologías y estrategias. La participación de la comunidad y la colaboración con las autoridades locales son fundamentales para el éxito de estas iniciativas (EPA, 2024 y CE, 2018). En España, varios puertos han implementado planes de aire limpio para mejorar la calidad del aire, como el de Barcelona, el de Valencia y el de Algeciras.
- Investigación y monitoreo:
 - Evaluación continua: Realizar estudios de impacto y monitoreo continuo de la calidad del aire para ajustar las estrategias de mitigación según sea necesario. Esta práctica asegura que las medidas implementadas sean efectivas y permite realizar mejoras continuas basadas en datos actualizados y evidencia científica (EPA, 2024 y EMSA, 2024).
 - Programas de incentivos: Ofrecer incentivos financieros y regulatorios para fomentar la adopción de tecnologías limpias y prácticas sostenibles entre los operadores portuarios. Estos programas pueden incluir subsidios, créditos fiscales y asistencia técnica (EPA, 2024 y CE, 2018).

Finalmente, el público también puede efectuar su aportación apostando por desplazamientos más sostenibles, por lo que sería importante fomentar estas actitudes desde la Administración, ya que puede ayudar a cambiar el estilo de vida y los hábitos de transporte.

9.6.2.1 Medidas eficientes en aeropuertos

Las medidas propuestas a continuación son útiles pero la mayoría no pueden ser incluidas en un PMCA porque su adopción depende de normas europeas o internacionales. A nivel nacional habría que suscribir un convenio con AENA para instaurar determinadas buenas prácticas, que sí pudieran ser incluidas en un PMCA.

En la Asamblea General de la OACI celebrada en Montreal en septiembre de 2016, se pidió a los Estados Miembros que desarrollaran acciones para, entre otras cosas, limitar o reducir el impacto de las emisiones de la aviación en la calidad del aire local. Siguiendo esta directriz, EASA (2022) demostró que las medidas introducidas por la mayoría de los países europeos en respuesta a COVID-19 condujeron a reducciones significativas de las emisiones de contaminantes atmosféricos, especialmente en el sector del transporte. Por ejemplo, el aeropuerto de Zúrich realizó un análisis comparativo del tráfico aéreo y por carretera, así como de las emisiones y las concentraciones medidas de diversos contaminantes durante un período anterior al COVID en 2019 y un período durante 2020 (Fleuti, 2020). El estudio concluyó que la reducción del 91% en el tráfico aéreo provocó una disminución del 87% en las emisiones de NO_x en el aeropuerto, pero solo una reducción del 44% en las concentraciones de NO₂. Estos resultados se atribuyen también a la influencia de otras fuentes distintas de los aviones, como el tráfico regional por carretera, que contribuye significativamente a las concentraciones de emisiones en el aeropuerto. Además, se observó que los efectos de las emisiones procedentes de fuentes aeroportuarias disminuyen significativamente a distancias cortas del aeropuerto y que una disminución de las concentraciones en el aeropuerto no se traduce en una reducción a nivel regional al mismo ritmo, confirmando una influencia rápidamente decreciente del aeropuerto fuera de su perímetro.

Por otro lado, en el acuerdo alcanzado entre el PE y el CE para descarbonizar el sector de la aviación (CUE, 2023b) se incluyeron, entre otros, los siguientes pasos:

- Obligación de que las aeronaves en los aeropuertos de la UE contengan un porcentaje mínimo de **combustible de aviación sostenible** (SAF) a partir de 2025 y, a partir de 2030, un porcentaje mínimo de combustible sintético. Tanto los SAF como los combustibles sintéticos han de cumplir los criterios de **sostenibilidad y reducción de emisiones** de la Directiva (UE) 2023/2413 sobre fuentes de energía renovables. Si bien los SAF reducen las emisiones de CO₂ en un 80%, no se sabe aún cómo afectan a las emisiones de UFP y NO₂, aunque se sabe que reducen las emisiones de PM no volátiles (nvPM) (Zhang et al., 2022), que consiguen reducir hasta el 70% en la emisión de PM en comparación con un combustible fósil, y se observaron tendencias de hollín similares para un SAF y un combustible fósil con un contenido similar de hidrógeno combustible (Schripp et al., 2022).
- **Promoción del hidrógeno** en los aeropuertos de la UE, que también pueden usarse para producir SAF (eFuel o Power-to-Liquid (PtL)).

Finalmente, en ICAO (2022) se proporciona una guía exhaustiva sobre cómo los aeropuertos pueden implementar medidas efectivas para gestionar y mitigar las emisiones contaminantes atmosféricas.

Aunque esta guía se enfoca en los gases de efecto invernadero, estas medidas también pueden ser eficaces para partículas (PM2.5 y UFP). Así, el aeropuerto de Schiphol (2024) ha implementado muchas de estas estrategias, sirviendo como un ejemplo de sostenibilidad, elaborando también su propio protocolo, centrado en las UFP. A continuación, se detallan las **principales medidas de mitigación** basadas en las dos fuentes referidas, clasificadas en varios enfoques:

- Eficiencia energética y uso de energías renovables:
 - Mejoras en la eficiencia energética: Sellado de ventanas y puertas, aislamiento de paredes y techos, iluminación LED para pistas y caminos de rodaje, y sistemas HVAC más eficientes. Por ejemplo, el aeropuerto Internacional El Dorado, en Bogotá, Colombia, logró la certificación *LEED Platinum* por sus mejoras en eficiencia energética, como la instalación de paneles solares y sistemas de iluminación eficientes.
 - Instalación de energías renovables: Sistemas de energía renovable *in situ*, como paneles solares, sistemas geotérmicos, biomasa y turbinas eólicas montadas en edificios. Por ejemplo, el aeropuerto de Stuttgart, en Alemania, utiliza electricidad 100% renovable y opera con plantas solares.
- Tecnologías de calefacción y refrigeración:
 - Sistemas de control de aire acondicionado: Implementación de sistemas de control de aire acondicionado basados en pronósticos meteorológicos y flujos de pasajeros para optimizar el uso de energía y reducir el consumo innecesario. Por ejemplo, el aeropuerto Internacional de Hong Kong implementó un sistema predictivo para el control del aire acondicionado que ahorra energía y reduce las emisiones de carbono.
- Modernización y electrificación de flotas de apoyo en tierra:
 - Modernización de vehículos y equipos: Uso de combustibles alternativos y vehículos eléctricos o híbridos en las flotas de vehículos del aeropuerto y equipos de apoyo en tierra. Por ejemplo, el aeropuerto Internacional de Gimpo, en Corea, reemplazó autobuses de gas natural comprimido por autobuses eléctricos, reduciendo significativamente las emisiones.
 - Vehículos eléctricos en la plataforma, como tractores de equipaje y autobuses de hotel. Por ejemplo, Schiphol cuenta con 750 estaciones de carga y está invirtiendo en más para apoyar esta transición. Todos los autobuses en el área de la pista son eléctricos.
- Optimización de operaciones en tierra y gestión del tráfico aéreo (ATM):
 - Optimización de movimientos en tierra: Reducción de los tiempos de rodaje para aviones mediante el uso de vehículos de remolque y aire acondicionado pre-acondicionado en las puertas de embarque. Se fomenta la sustitución de vehículos de apoyo en tierra (GSE) para reemplazar aquellos vehículos más contaminantes por otros de tecnología alternativa o eco-limpios. Por ejemplo, el aeropuerto de Ámsterdam-Schiphol probó el uso de *Taxibot*, un vehículo de remolque que reduce las emisiones al permitir que los aviones mantengan sus motores apagados mientras se transportan.

- Procedimientos de salida mejorados: Cambios en los procedimientos de salida para aumentar la distancia entre empleados y motores a reacción en funcionamiento.
- Energía de tierra y e-GPUs: La energía de tierra disponible en varias puertas permite conectar las aeronaves a la electricidad, reduciendo el uso de la unidad de potencia auxiliar (APU). También se están probando Unidades de Energía de Tierra eléctricas para reemplazar las variantes diésel. El suministro de energía eléctrica a 400 Hz desde un sistema incorporado a la pasarela tiene la ventaja de hacer innecesaria la utilización APU, que además de ser fuente de emisiones, dado que consume combustible, es generadora de ruido.
- Gestión de residuos:
 - Reducción de Residuos a Vertederos: Reciclaje, compostaje y conversión de residuos en energía. Como, por ejemplo, el aeropuerto de Gatwick, en Inglaterra, que tiene un incinerador en el lugar que convierte los residuos en energía utilizable.
- Fomento del uso de SAFs, citado anteriormente:
 - Crear una norma comunitaria para el combustible de aviación con la que se consiga reducir progresivamente el contenido de aromáticos y azufre hasta conseguir SAF libres de ellos.
- Vuelos más eficientes y reducción del número de vuelos:
 - Rediseño del espacio aéreo y optimización de las rutas de vuelo para reducir las emisiones.
 - Introducción de límites máximos de vuelos, fomentando el cambio al ferrocarril para vuelos que tengan una alternativa en tren a 3h de distancia o menos (Ejemplo: ruta Barcelona-Madrid, puede hacerse en AVE en 2h 30min, y la de Sevilla-Madrid en 2h 40min).
- Medidas de transporte sostenible:
 - Uso de transporte público: Fomento del uso de transporte público para llegar al aeropuerto. Por ejemplo, Schiphol fomenta que los viajeros lleguen al aeropuerto en transporte público en lugar de en coche con la extensión de la línea de metro *Noord/Zuid*.
 - Autobuses y taxis eléctricos. Por ejemplo, más de 200 autobuses eléctricos y 145 taxis eléctricos circulan en y alrededor de Schiphol.
- Infraestructuras aeroportuarias:
 - Limitación de ampliaciones de infraestructuras aeroportuarias. En su lugar, se puede buscar una coordinación más eficiente con aeropuertos cercanos (Coco, 2020).
- Instalar estaciones de medidas de UFP en los aeropuertos y sus alrededores:
 - Cuantificar los niveles de concentración de UFP con vistas a introducir valores objetivo para las concentraciones de UFP en la próxima revisión de la Directiva sobre calidad del aire ambiente.
- Tener en cuenta la meteorología a la hora de seleccionar emplazamientos de aeropuertos y pistas:

- Dado que los aeropuertos están localizados próximos a ciudades, se debería tener en cuenta los vientos predominantes a la hora de ubicarlos o diseñar pistas.

Así, vemos que muchas de las medidas propuestas no son tecnológicas (cambios en los aviones), sino que pasan por una mejora en el diseño de los aeropuertos, cambios en los vehículos auxiliares de tierra o en la generación de energía, entre otras, evitando que la contaminación atmosférica producida por los aeropuertos afecte a las ciudades circundantes.

9.6.2.2 Medidas eficientes en puertos

El impacto del transporte marítimo en el medio ambiente y las comunidades costeras, tanto en términos de daños a los ecosistemas como de salud pública, puede mitigarse con una **electrificación** del transporte marítimo, además de los requisitos de cero emisiones e infraestructuras en el muelle. Además, incluir el conjunto del espacio marítimo de la UE en la zona de control de las emisiones de SO_x y la zona de control de las emisiones de NO_x contribuiría significativamente a reducir la contaminación atmosférica en los puertos y las ciudades portuarias, así como en las aguas de la UE.

En el puerto de Venecia los contaminantes atmosféricos procedentes de los cruceros disminuyeron un 80% tras la prohibición impuesta por la ciudad a los grandes cruceros (Figura 9.51).

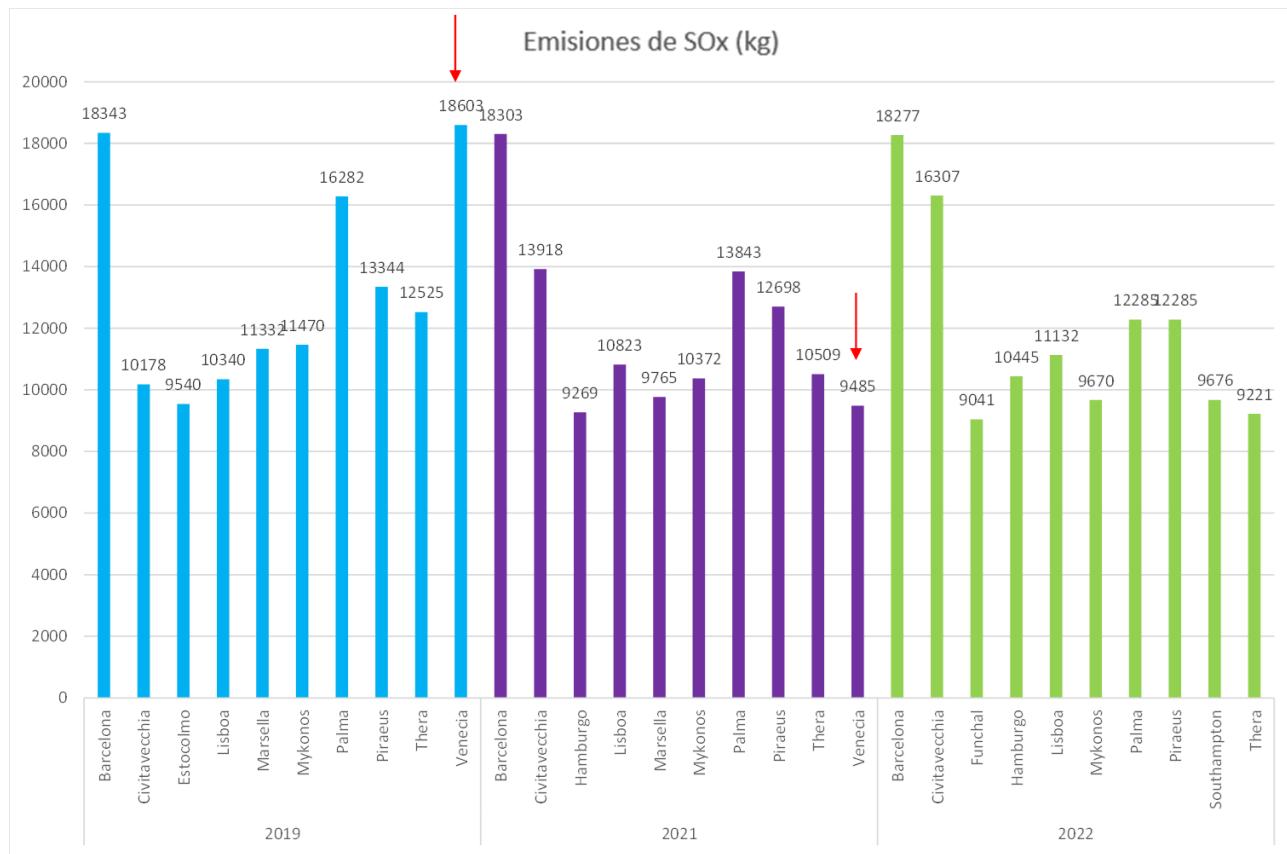


Figura 9.51. Los puertos de cruceros más contaminados de Europa. Barcelona sufre los niveles más altos de contaminación atmosférica tóxica por cruceros, mientras que Venecia sale de la lista en 2022 tras la prohibición de los cruceros. (Adaptado de Transport & Environment, 2023).

En los últimos años, se han implementado diversas **medidas de mitigación** basadas en regulaciones, tecnologías limpias, mejoras operacionales y colaboraciones comunitarias para mitigar la emisión

de contaminantes durante las operaciones portuarias, que incluyen la manipulación de carga, el tránsito de vehículos y las emisiones de los barcos. Estas medidas se han probado eficaces en diversos grandes puertos a nivel mundial. Se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Reducción de emisiones de combustibles marinos:
 - Combustibles de bajo azufre: La implementación de combustibles con bajo contenido de azufre ha sido clave en la reducción de las emisiones de SO_x y PM. Las ECA en Europa y EEUU han establecido límites estrictos para el contenido de azufre en los combustibles marinos (EPA, 2024 y CE, 2018). Las ECA son zonas marítimas donde se aplican normas más estrictas para las emisiones de SO_x, NO_x y PM de los buques. En estas áreas, el contenido de azufre en los combustibles marinos se ha limitado significativamente. Por ejemplo, las regulaciones de la UE establecen que, desde 2015, los combustibles marinos utilizados en las SECA del Mar Báltico y el Mar del Norte no pueden contener más de 0.1% de azufre. Esta normativa es parte de la Directiva 2012/33/UE, que enmienda la Directiva 1999/32/CE. Fuera de estas áreas, el contenido de azufre no debe superar el 0.5% (CE, 2022b). Otros ejemplos son los buques portuarios que integran el sistema de transporte público de Copenhague, que se propulsan mediante biocarburantes. Estudios recientes para la elaboración de un Plan Nacional de Ozono en España (MITECO, 2022) indican que la reducción de NO_x del tráfico rodado y del transporte marítimo son las dos medidas con mayor efecto en la reducción de las concentraciones de este contaminante. Por tanto, se recomienda implementar SECAs y NECAs en las regiones del Mediterráneo y en el Atlántico que afecten a España.
- Energías renovables y eficiencia energética:
 - Mejora de la eficiencia energética: Reducir el consumo de energía (como, por ejemplo, uso de sistemas LED, con regulación en función del nivel de actividad, en viales públicos y edificios), y de las emisiones ligadas a su producción, en edificios y servicios prestados por la Autoridad Portuaria, y en las actividades desarrolladas por empresas portuarias. Mejora también de la climatización, mediante un aislamiento más eficiente de los edificios de las Autoridades Portuarias, por bomba de calor, o explorándose en algunos puertos el uso de geotermia, energía solar, eólica o basada en el hidrógeno (Puertos del Estado, 2024).
 - Impulso al uso de energías renovables: Instalación de paneles solares, energía eólica o geotermia. La generación de energía renovable en los puertos, como la instalación de paneles solares, ayuda a reducir emisiones. Puertos como los de Seattle, Los Ángeles y Long Beach han implementado sistemas solares, logrando una significativa reducción de sus huellas de carbono y costos energéticos (EPA, 2024 y Munim y Saha, 2021).
 - Certificación LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) para nuevas construcciones y obras de mejora: Aplicar estándares de construcción sostenible, como la certificación LEED, mejora la eficiencia energética y reduce el impacto ambiental de las infraestructuras portuarias (EPA, 2024 y CE, 2018). La certificación LEED proporciona un marco para la construcción de edificios sostenibles y eficientes en el uso de recursos, promoviendo el ahorro de energía, la gestión eficiente del agua, la mejora de la calidad ambiental interior, y la utilización de materiales y recursos sostenibles. El Puerto de Barcelona ha obtenido la estrella de la iniciativa *Lean&Green*, promovida por la Asociación de Fabricantes y Distribuidores (AECOC), por alcanzar objetivos destacables en un máximo de cinco años. Entre las medidas implementadas se incluyen la optimización de las

operaciones portuarias, el uso de energía renovable y la modernización de infraestructuras para hacerlas más sostenibles.

- Uso de energía de tierra (*Shore Power*):
 - Conexión eléctrica en muelle: Permitir que los barcos apaguen sus motores auxiliares mientras están atracados al conectarse a la red eléctrica del puerto reduce significativamente las emisiones de NO_x y PM. Este método, también conocido como *cold ironing*, ha sido implementado con éxito en puertos como Los Ángeles y Long Beach, donde se han visto reducciones considerables en las emisiones gracias a esta práctica (EPA, 2024 y EMSA, 2024). De esta forma, las ciudades proporcionan una infraestructura a los buques atracados en puerto en la que puedan conectarse a la red eléctrica terrestre y no tener así que mantener sus motores al ralentí. Según el informe de Safety4Sea (2021) los puertos de Amberes, Bremerhaven, Hamburgo, Haropa y Rotterdam han firmado un Memorando de Entendimiento (MoU) para aumentar el uso de *shore power* para los grandes buques portacontenedores (ULCV) para 2028. Esta colaboración busca establecer un marco regulatorio claro y asegurar la disponibilidad de fondos públicos para implementar estos proyectos.
- Mejoras operacionales:
 - Optimización de operaciones: Reducir la marcha en vacío y optimizar las rutas de transporte interno son estrategias clave para minimizar el consumo de combustible y las emisiones. Implementar límites estrictos para el tiempo que los vehículos y equipos pueden permanecer inactivos y utilizar sistemas que apaguen automáticamente los motores después de un período de inactividad puede minimizar considerablemente el uso de combustible. El puerto de Los Ángeles, por ejemplo, ha implementado límites de inactividad de diez minutos, logrando reducciones significativas en las emisiones de NO_x y mejorando la eficiencia operativa (EPA, 2024 y Munim y Saha, 2021). En el puerto de Valencia, se ha trabajado en la mejora de la sincronización entre el puerto y los buques para implementar el concepto de *just-in-time (JIT) arrivals*. Este enfoque permite que los buques ajusten su velocidad de navegación para llegar justo a tiempo, minimizando el tiempo de espera y, por ende, las emisiones generadas durante el anclaje o la espera en el puerto. En un ejercicio conjunto con la Organización Marítima Internacional (IMO) y las empresas navieras Maersk y MSC, se demostró que optimizar la velocidad en las últimas 12 horas del viaje puede reducir el consumo de combustible en un 9%.
 - Tecnologías de cero emisiones: Desplegar tecnologías eléctricas y de cero emisiones para el manejo de carga y otros equipos portuarios. Estas tecnologías no solo reducen las emisiones, sino que también reducen los costos operativos a largo plazo (EPA, 2024 y EMSA, 2024). Por ejemplo, ciertos transbordadores en Noruega y en otros países, están recurriendo al uso de baterías para reducir su huella ambiental.
 - Control de emisiones difusas en la manipulación de graneles sólidos y líquidos: La manipulación y almacenamiento de material transportado a granel puede implicar un incremento del nivel de PM en suspensión, siendo una de las principales causas de emisiones a la atmósfera en los puertos de España (Puertos del Estado, 2015). Desde Puertos del Estado (2015) se propone una “Guía de Buenas Prácticas en la Manipulación y Almacenamiento de Graneles Sólidos en Instalaciones Portuarias” que incluye algunas medidas (Figura 9.52) como, entre otras:

- Limitar la altura de caída en la manipulación de la mercancía.
- Controlar cambios bruscos de dirección y velocidad en equipos de manipulación.
- No sobrecargar equipos, controlando los niveles de carga o flujo en equipos de manipulación y acarreo.
- Mantener el ritmo y frecuencia de las operaciones compatible con un adecuado control de derrames y emisiones.
- Mantener el orden y la limpieza dentro de la zona de operaciones.
- Realizar buenas prácticas de mantenimiento (vigilar buen estado de cierres y ajustes, de sistemas de apantallamiento o carenado, de equipos de control de emisiones como son sistemas de aspersión, inyectores nebulizadores o equipos de aspiración, entre otros).
- Implantar las medidas preventivas y complementarias recomendadas para cada tipo de operación (barreras y muros móviles, toldado de camiones, rampas antiderrames, pantallas corta vientos, carenado y apantallamiento de equipos, mangas y tolvas telescopicas, lava-ruedas, aspiración, entre otros).

	Objetivo de la medida	Medidas	
Medidas técnicas preventivas	Evitar derrames en operación normal de la maquinaria	Optimizar cucharas, Cazos de alto voldeo, Optimizar tolvas, Rampas atrapa derrames	
	Evitar dispersión y resuspensión por tráfico rodado	Barreras y muros móviles, Toldado de camiones	
	Evitar derrames por sobrecargas	Pesado a bordo en camiones o palas, Sensores de carga en cintas	
	Detectar atascos o fallos de los equipos	Sensores de elevación y atascos en mangas y tolvas telescopicas, Sensores de centrado en cintas	
	Optimizar descensos y trasferencias para reducir emisiones	Toboganes, Cono concentrador, Mangas y tovas telescopicas, Optimizar cintas	
	Apantallar la acción del viento sobre equipos de manipulación	Carenado y apantallamiento de equipos: pantallas en tolvas, carenado de cintas, carenado de trasferencias, etc	
	Incrementar la cohesión de la mercancía para prevenir formación de polvo	Aspersión y pulverización de agua en acopios, Sellado de acopios, Pulverización de agua en zonas de operación	
	Objetivo de la medida	Medidas	
Medidas técnicas atenuantes y complementarias	Evitar emisiones en descensos controlando la velocidad de caída y la mezcla de aire y mercancía	Tolvas telescopicas de cascada	
	Capturar el polvo en suspensión	Captación de polvo por aspiración, Captación y precipitación del polvo por atomización de agua mediante inyectores o turbinas	
	Evitar dispersión y resuspensión por tráfico rodado fuera de la zona de operación	Sistemas lavarruedas	

Figura 9.52. Algunos objetivos y medidas para evitar emisiones durante la manipulación de graneles (adaptado de Puertos del Estado, 2015).

- Transporte (Puertos del Estado, 2024):
 - Impulso al transporte ferroviario con origen y destino en puertos: Reducir las emisiones a la atmósfera ligadas al transporte terrestre con origen y destino en puertos, posibilitando y promoviendo el empleo del ferrocarril como alternativa al transporte por carretera.
 - Mejora de la movilidad de vehículos pesados en el entorno portuario: Reducir las emisiones de PM10, NO_x y SO_x ligadas al tránsito de camiones por núcleos urbanos, y espera en accesos portuarios, resultante de la circulación y estancia de camiones en el puerto y su entorno, mediante el desarrollo de nuevos accesos que conecten directamente con el puerto evitando circulación por núcleos urbanos.

- Modernización de flotas y equipos:
 - Reemplazo de equipos: La modernización de camiones y equipos antiguos con modelos más nuevos y eficientes es crucial. Esto incluye la adopción de vehículos eléctricos y de bajas emisiones. Por ejemplo, el puerto de Oakland ha liderado proyectos piloto que han introducido camiones eléctricos, reduciendo las emisiones y mejorando la eficiencia operativa (EPA, 2024 y CE, 2018). El Puerto de Rotterdam ha sido líder en la implementación de tecnologías más limpias y eficientes. Han reemplazado motores diésel por motores eléctricos y pequeños motores diésel de bajas emisiones. Además, han mejorado sus instalaciones intermodales para fomentar el uso de modos de transporte más sostenibles, como el transporte ferroviario y por vías naveables interiores (UNEP, 2024).
- Obras:
 - Valorización de residuos de construcción: Estimular, en aquellos casos en los que sea técnicamente viable, el uso de residuos de construcción y demolición en rellenos portuarios.
 - Seguir las indicaciones expuestas en el punto sobre Obras/Construcciones/Demoliciones (sección 9.2).
- Recomendaciones adicionales:
 - Cabe destacar que Puertos del Estado considera que la carga, descarga y almacenamiento de materiales pulverulentos en muelles públicos y zonas de almacenamiento de las que son titulares en el recinto portuario son actividades propias de los puertos, y por tanto no cabe solicitar autorización de emisiones a la atmósfera a los organismos competentes de las CCAA en toda España. Es necesario insistir en que la Ley 34/2007 no distingue entre actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera públicas o privadas, todas están sujetas a las mismas obligaciones y contar con una autorización de emisiones a la atmósfera es un requisito que permitiría controlar las emisiones de la manipulación de graneles pulverulento y su almacenamiento. La Guía de buenas prácticas de Puertos del Estado, que no indica la obligación de obtener autorizaciones de emisiones a la atmósfera, no es suficiente para controlar las emisiones en los puertos.
 - Se recomienda la **integración de las estaciones de control de la calidad del aire de los puertos dentro de las redes autonómicas** o suscribir convenios con dichas redes. Ejemplos: Puertos de Castellón

10. CONSIDERACIONES FINALES

La presente guía para la elaboración de planes de mejora de la calidad del aire contiene un análisis detallado de las políticas y medidas coste-efectivas para continuar avanzando en la reducción de la contaminación atmosférica. Aunque, en España, se han logrado mejoras significativas en la calidad del aire en las últimas décadas, especialmente en la reducción de contaminantes primarios, el camino hacia un aire seguro (que cumpla las guías de la OMS) para todos sigue siendo largo y complejo. La Directiva (UE) 2024/2881 de Calidad del Aire, que introduce valores límite y objetivo más estrictos y ambiciosos, es un avance clave. Esta Directiva alinea los objetivos normativos con las guías de la OMS (mayoritariamente los de 2005 y en algunos casos intermedios entre los de 2005 y 2021), marcando un cambio importante en la legislación. Además, una de las principales innovaciones de la directiva es la introducción de directrices más detalladas para la elaboración y ejecución de PCA, lo que permitirá a las autoridades competentes diseñar estrategias más efectivas y coherentes.

Las nuevas directrices sobre los planes de calidad del aire destacan la importancia de reducir la exposición de la población a los contaminantes, más allá del simple cumplimiento de los valores límite. Este enfoque se centra en proteger a los grupos más vulnerables de la sociedad, como niños, ancianos y personas con enfermedades crónicas. Además, se establecen plazos más estrictos y se promueve la integración de políticas sectoriales, asegurando un enfoque coordinado en la reducción de emisiones en diferentes áreas como transporte, industria, agricultura y construcción (Figura 10.1).

Otro aspecto clave es la necesidad de un monitoreo continuo y la flexibilidad en los planes para adaptarse a nuevas evidencias científicas y condiciones locales (Figura 10.1). La implementación efectiva de estas directrices será fundamental para alcanzar los objetivos de calidad del aire establecidos para 2030, aunque se enfrenta a ciertos retos, como la necesidad de coordinar acciones entre diferentes niveles de gobierno y sectores, y la variabilidad en las condiciones locales que pueden afectar la eficacia de las medidas propuestas. La nueva Directiva sobre calidad de aire presenta la posibilidad de retrasar la fecha límite de cumplimiento de 2030, siempre y cuando, en 2029, se justifique ante la CE que no es posible alcanzarlo con esta fecha, y además se establezca una hoja de ruta que garantice una mejora continua de la calidad del aire durante el periodo de prórroga, especificando medidas y proyecciones, incorpore criterios de transparencia y un plan de financiación, entre otros aspectos.

Se recomienda como esencial que los planes de mejora de la calidad del aire se diseñen y ejecuten teniendo en cuenta la estrategia COM-B (por sus siglas en inglés, Capacidad, Oportunidad, Motivación y Comportamiento), que ayuda a identificar los factores que influyen en la adopción de las medidas correctivas propuestas, y su aceptación, y en definitiva el éxito y eficacia de las mismas. El modelo COM-B es útil porque asegura que las medidas no solo sean técnicamente viables, sino también aceptadas y sostenibles (Figura 10.1). Al diseñar planes de calidad del aire teniendo en cuenta COM-B, se asegura que las políticas se mantengan y adapten con el tiempo, promoviendo cambios de comportamiento a nivel individual y colectivo.

Se recomienda para todos los sectores, en los que sea posible, la acreditación de la implementación de SGA, como por ejemplo la **ISO 14.001:2015/Amd 1:2024** (Sistemas de gestión medioambiental).

Enmienda 1: Cambios en la acción por el clima) o **EMAS**, para proporcionar un marco de referencia para proteger el medio ambiente y responder a las condiciones ambientales cambiantes, en equilibrio con las necesidades socioeconómicas y enfocado a la mejora continua y al desarrollo de una Economía Circular.

Esta guía ofrece, por tanto, un marco detallado para la elaboración de planes de mejora de la calidad del aire, brindando orientaciones claras sobre las medidas correctivas que deben implementarse en sectores clave. Algunas de las principales medidas propuestas por sector son:

- **Tráfico Rodado:** Se recomienda la implementación de ZBE, la mejora del transporte público, la promoción de la movilidad eléctrica y movilidad activa y sostenible, además de medidas para reducir las emisiones de vehículos de reparto de mercancías (con elevado kilometraje diario en zona urbana), medidas de rediseño urbano, así como los peajes urbanos (tasas de congestión).
- **Construcción:** Promover el uso de maquinaria de bajas emisiones y la adopción de técnicas que minimicen la generación de polvo, como la humectación de materiales y el uso de barreras de protección. Medidas sobre transporte y manipulación de material pulverulento, y control de las emisiones del tráfico de vehículos asociado a la obra.
- **Industria:** Modernización de instalaciones para mejorar la eficiencia energética, tratamiento de emisiones y minimizar las emisiones fugitivas. Se indican también cuáles son los retos principales que conlleva la nueva Directiva europea de Emisiones Industriales.
- **Agricultura y Ganadería:** Ajustes en la formulación de dietas animales, diseño de granjas, gestión de residuos, y tecnologías para aplicación de fertilizantes orgánicos para reducir emisiones de amoníaco y otros contaminantes.
- **Quema de Biomasa:** Uso de estufas y calderas de biomasa certificadas, y medidas específicas para quema de biomasa agrícola e industrial. Se argumenta la necesidad del control de emisiones de COVs en las plantas industriales de quema de biomasa.
- **Puertos:** Se sugiere la electrificación de los muelles para permitir que los barcos apaguen sus motores mientras están atracados. Además, se recomienda la modernización de las flotas marítimas con motores más limpios y la optimización de las operaciones portuarias para minimizar los tiempos de espera y las emisiones asociadas.
- **Aeropuertos:** Implementar procedimientos de aterrizaje y despegue optimizados para reducir el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes. Fomentar el uso de vehículos eléctricos en el transporte terrestre dentro de los aeropuertos y mejorar la eficiencia energética de las instalaciones aeroportuarias. Promover el uso del ferrocarril para distancias entre ciudades inferiores a 3h en tren.

Así, las principales reflexiones que hace esta guía se pueden resumir en tres aspectos clave:

- **Flexibilidad y adaptabilidad en la política de calidad del aire:** Dado que las condiciones locales y los avances científicos y tecnológicos son dinámicos, las políticas deben ser adaptables, permitiendo ajustes rápidos en respuesta a nuevas evidencias o circunstancias. Además, dada la complejidad de la reducción de las concentraciones de determinados contaminantes (en especial

los parcial o totalmente secundarios, como O₃ y PM), es necesario el apoyo científico y la modelización para la elaboración de planes. Este enfoque garantiza que las medidas adoptadas sigan siendo relevantes y efectivas a lo largo del tiempo. La flexibilidad también implica la capacidad de aprender de las experiencias previas, adaptando las estrategias para maximizar su impacto.

- **Desafíos en la coordinación:** Uno de los principales desafíos identificados es la necesidad de una coordinación efectiva entre los diferentes niveles de gobierno: local, regional, nacional y supranacional. La implementación de políticas de calidad del aire a menudo requiere un enfoque concertado que trascienda las jurisdicciones individuales, debido a la naturaleza transfronteriza de la contaminación atmosférica. Este enfoque es clave para el O₃ y PM en suspensión, dado que son en su mayoría o totalmente de origen secundario y su formación se produce en gran parte a escalas suprametropolitanas.
- **Tendencias y proyecciones:** Con la implementación de la nueva Directiva, se espera una disminución gradual en los niveles de contaminación atmosférica. Sin embargo, el éxito en su implementación requerirá un esfuerzo acordado y continuo de todos los niveles de gobierno, junto con la colaboración activa de la sociedad civil.

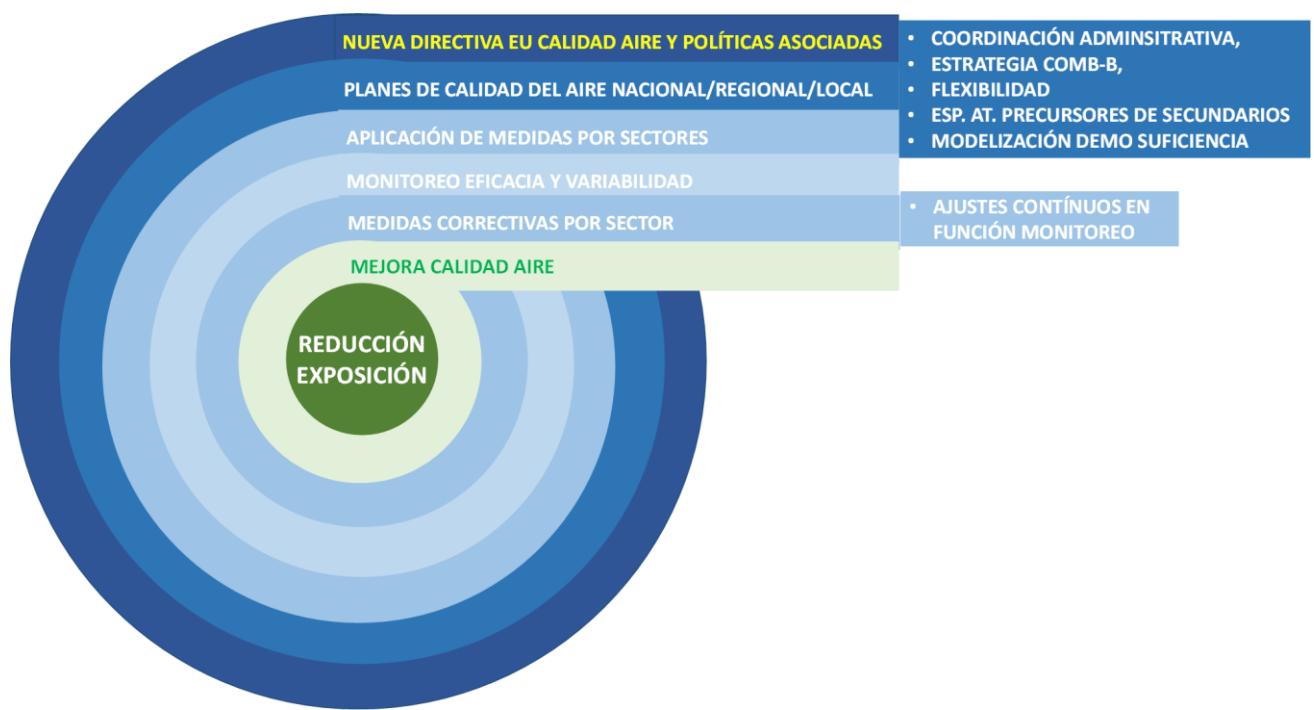


Figura 10.1. Estrategias a tener en cuenta a la hora de diseñar, aplicar y corregir planes de calidad del aire y sus medidas (ESP. AT. = Especial atención).

11. REFERENCIAS

- AIRUSE, 2018. GUIDEBOOK: Measures to Improve Urban Air Quality. AIRUSE LIFE+ Project (LIFE 11 ENV/ES/000584), <http://www.cleanaircities.net/>
- Ali, I.O., Thabet, M.S., El-Nasser, K.S., Hassan, A.M., Salama, T.M., 2012. Synthesis of nanosized ZSM-5 zeolite from rice straw using lignin as a template: Surface-modified zeolite with quaternary ammonium cation for removal of chromium from aqueous solution, *Microporous and Mesoporous Materials*, 160, 97-105, ISSN 1387-1811, <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.04.020>
- Amato, F., Schaap, M., Denier van der Gon, H.A.C., Pandolfi, M., Alastuey, A., Keuken, M., Querol, X., 2012. Effect of rain events on the mobility of road dust load in two Dutch and Spanish roads. *Atmospheric Environment*, 62, 52-358, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.042>
- Amato, F., Karanasiou, A., Cordoba, P., Alastuey, A., Moreno, T., Lucarelli, F., Nava, S., Calzolai, G., Querol, X., 2014. Effects of Road Dust Suppressants on PM Levels in a Mediterranean Urban Area. *Environmental Science and Technology*, 48, 14, 8069-77, <https://doi.org/10.1021/es502496s>
- Amato, F., Alastuey, A., Karanasiou, A., Lucarelli, F., Nava, S., Calzolai, G., Severi, M., Becagli, S., Gianelle, V. L., Colombi, C., Alves, C., Custódio, D., Nunes, T., Cerqueira, M., Pio, C., Eleftheriadis, K., Diapouli, E., Reche, C., Minguillón, M. C., Manousakas, M.-I., Maggos, T., Vratolis, S., Harrison, R. M., and Querol, X., 2016. AIRUSE-LIFE+: a harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3289–3309, <https://doi.org/10.5194/acp-16-3289-2016>
- Amato, F. (Ed.), 2018. Non-Exhaust Emissions: An Urban Air Quality Problem for Public Health; Impact and Mitigation Measures. Academic Press, ISBN-13 978-0128117705.
- Amato, F., Pérez, N., López, M., Ripoll, A., Alastuey, A., Pandolfi, M., Karanasiou, A., Salmatondis, A., Padoan, E., Frasca, D., Marcoccia, M., Viana, M., Moreno, T., Reche, C., Martins, V., Brines, M., Minguillón, M.C., Ealo, M., Rivas, I., van Drooge, B., Benavides, J., Craviotto, J.M., Querol, X., 2019. Vertical and horizontal fall-off of black carbon and NO₂ within urban blocks, *Science of The Total Environment*, 686, 236-245, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.434>
- AMB, 2016. Bones pràctiques per a la prevenció de la contaminació atmosfèrica en les obres dels municipis metropolitans, <https://docs.amb.cat/alfresco/api/-default-/public/alfresco/versions/1/nodes/4594c921-9c9a-4ca9-8746-54465b061224/content/Guia+contaminacio+obres.pdf?attachment=false&mimeType=application/pdf&sizeInBytes=537405>
- Aragón-Correa, J.A.; Marcus, A.A.; Vogel, D. 2020. The Effects of Mandatory and Voluntary Regulatory Pressures on Firms' Environmental Strategies: A Review and Recommendations for Future Research, *Academy of Management Annals*, 14, 1, <https://doi.org/10.5465/annals.2018.0014>
- Arimura, T.H.; Kaneko, S.; Managi, S.; Shinkuma, T.; Yamamoto, M.; Yoshida, Y., 2019. Political economy of voluntary approaches: A lesson from environmental policies in Japan, *Economic Analysis and Policy*, 64, 41-53, ISSN 0313-5926, <https://doi.org/10.1016/j.eap.2019.07.003>

- Austin, E., Xlang, J., GOuold, T.R., Shirai, J.H., Yun, S., Yost, M. G., Larson, T.V., Seto, E., 2021. Distinct ultrafine particle profiles associated with aircraft and roadway traffic, *Environmental Science&Technology*, 55, 5, 2847–2858, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05933>
- Avebiom, 2020. Biomasa para reducir costes energéticos en el sector agropecuario, *Biomasa News*, 1, 24, https://www.avebiom.org/sites/default/files/biomasanews/biomasa_news-1.pdf
- AveBiom, 2022. Soluciones basadas en el uso de biomasa para descarbonizar el sector industrial, <https://www.avebiom.org/biomasanews/calefaccion-industrial-y-district-heating/soluciones-con-biomasa-para-descarbonizar-industria>
- Badia, A., Langemeyer, J., Codina, X., Gilabert, J., Guilera, N., Vidal, V., Segura, R., Vives, M., Villalba, G., 2021. A take-home message from COVID-19 on urban air pollution reduction through mobility limitations and teleworking. *npj Urban Sustainability*, 1, 35, <https://doi.org/10.1038/s42949-021-00037-7>
- Baron, P., Wileke, K., 2008. *Aerosol Technology: Properties behaviour and measurement of airborne particle*, 2nd ED., New York: John Wiley & Sons
- Baskaran, D., Dhamodharan, D., Sankar Behera, U., Byun, H., 2014. A comprehensive review and perspective research in technology integration for the treatment of gaseous volatile organic compounds, *Environmental Research*, 251 (Part 1), 118472, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118472>
- Bhatt, A., Ravi, V., Zhang, Y., Heath, G., Davis, R., Tan, E. C. D., 2023. Emission factors of industrial boilers burning biomass-derived fuels, *Journal of the air & waste management association*, 73, 4, 241–257, <https://doi.org/10.1080/10962247.2023.2166158>
- Brandt, J., Silver, J.D., Frohn, L.M., 2011. Assessment of health-cost externalities of air pollution at the national level using the EVA model system. CEEH scientific report no. 3, <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/1024922>
- Brinkmann, T., Both, R., Scalet, B. M., Roudier, S., Delgado Sancho, L., 2018. JRC Reference Report on Monitoring of Emissions to Air and Water from IED Installations, https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-12/ROM_2018_08_20.pdf (consultado el 24/09/2024).
- CE, 2018. Concerted EU action reduces air pollution from shipping in European coastlines and ports, https://commission.europa.eu/news/concerted-eu-action-reduces-air-pollution-shipping-european-coastlines-and-ports-2018-04-16_en
- CE, 2022a. Proposal for a revision of the Ambient Air Quality Directives, https://environment.ec.europa.eu/publications/revision-eu-ambient-air-quality-legislation_en
- CE, 2022b. New shipping fuel standards to reduce sulphur oxides in the Mediterranean by 80%, https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/new-shipping-fuel-standards-reduce-sulphur-oxides-mediterranean-80-2022-12-16_en

CE, 2024. Documentos de referencia sobre las mejores técnicas disponibles, Oficina Europea de Investigación sobre la Transformación Industrial y las Emisiones, <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/es/reference>

Celades, I., 2013. Caracterización física, química, mineralógica y morfológica del material particulado emitido por focos canalizados de la industria de baldosas y fritas cerámicas [Ph.D.] Universitat Jaume I de Castellón, Castellón, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=249007>

CESFAC, 2019. Guía aplicación Atex en el sector de la alimentación animal, Editorial Agrícola Española S.A., DEPÓSITO LEGAL: M-23856-2010, <https://cesfac.es/media/attachments/2019/08/08/gua-aplicacin-atex.pdf>

Chen, Y., Lu, C., Lu, S., Lee, D., 2023. Electrostatic Precipitator Design Optimization for the Removal of Aerosol and Airborne Viruses, Sustainability, 15(10), 8432, <https://doi.org/10.3390/su15108432>

Cherlinka, V., 2022, Rotación de cultivos: Tipos y ejemplos prácticos, <https://eos.com/es/blog/rotacion-de-cultivos/>

CLRTAP, 2019. Code of good practice for wood-burning and small combustion installations, https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/ece_ebair_2019_5-1916518ebpquemabiomasa_tcm30-523610.pdf

Coco, I.M., 2020. Coordinación de franjas horarias en varios aeropuertos. TFG Grado en Ingeniería en Organización Industrial, Universidad de Valladolid escuela de Ingenierías Industriales, <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/40512/TFG-I-1448.pdf?sequence=5>

Cordero, A., 2021. Visita a una granja con sistema TRAC: una opción factible para la reducción de emisiones, https://www.3tres3.com/articulos/el-sistema-trac-una-opcion-para-reducir-las-emisiones-de-amoniaco_47127/

CUE, 2023a. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast) - Mandate for negotiations with the European Parliament, <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-15236-2023-INIT/en/pdf>

CUE, 2023b. «Objetivo 55»: promover la utilización de combustibles más ecológicos en los sectores marítimo y de la aviación, <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/fit-for-55-refueleu-and-fueleu/>

CUE, 2024. Air quality: Council and Parliament strike deal to strengthen standards in the EU, https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/02/20/air-quality-council-and-parliament-strike-deal-to-strengthen-standards-in-the-eu/?utm_source=dsms-auto&utm_medium=email&utm_campaign=Air+quality%3a+Council+and+Parliament+strike+deal+to+strengthen+standards+in+the+EU

Dalgaard, T., Groenestein, K., Pedersen, J., Adamsen, A.P.S., Hicks, K., Winiwarter, W., Sefeedpari, P., Einarsson, R., Sanz-Cobena, A., Borghardt, G., Amon, B., Bittman, S., Drury, C.F., Kamp, J.N.,

- Dalby, F.R., Care, S., Falconi, I., Hutchings, N., Baklanov, A., Marques-dos-Santos, C., Sutton, M., 2023. Co-mitigation of methane and ammonia emissions from agricultural sources: Policy Brief and Guidance, <https://pure.au.dk/portal/en/publications/co-mitigation-of-methane-and-ammonia-emissions-from-agricultural->
- Das, S., Wiseman, C.L.S., 2024. Examining the effectiveness of municipal street sweeping in removing road-deposited particles and metal(loid)s of respiratory health concern, *Environment International*, 187, 108697, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108697>
- Denier van der Gon, H. A. C., Bergström, R., Fountoukis, C., Johansson, C., Pandis, S. N., Simpson, D., Visschedijk, A. J. H., 2015. Particulate emissions from residential wood combustion in Europe—revised estimates and an evaluation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 6503–6519, <https://doi.org/10.5194/acp-15-6503-2015>
- Ducruet, C., Polo, B., Astou Séne, M., Lo Prete, M., Sun, L., Itoh, H., Pigné, Y., 2023. Ports and their influence on local air pollution and public health: a global analysis, Hal-04313152, <https://hal.science/hal-04313152>
- EEA, 2018. Air quality in Europe — 2018 report, <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2018>
- Estrada, M., Campos-Cacheda, J.M., Robusté, F., 2018. Night deliveries and carrier-led consolidation strategies to improve urban goods distribution, *Collaboration and Urban Transport*, 33, 4: 930–947, <https://doi.org/10.3846/transport.2018.6058>
- EEA, 2018. Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe, <https://www.eea.europa.eu/publications/unequal-exposure-and-unequal-impacts>
- EEA, 2019. Air Quality in Europe—2019 Report, <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>
- EEA, 2022. Portal de Emisiones Industriales de la Agencia Europea de Medioambiente, <https://industry.eea.europa.eu/pollutants/pollutant-index>
- EEA, 2023a. Impacts of Air Pollution on ecosystems. Report from the European Environmental Agency, *Air Quality in Europe*, 2022. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/impacts-of-air-pollution-on-ecosystems>
- EEA, 2023b. Air quality in Europe 2022. Health impacts of air pollution in Europe, 2022, <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>
- El-Sayed, M.A., El-Samni, T.M., 2006. Physical and Chemical Properties of Rice Straw Ash and Its Effect on the Cement Paste Produced from Different Cement Types, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 19, 1, 21-29, ISSN 1018-3639, [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30845-6](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30845-6)
- EMAS, 2009. REGLAMENTO (CE) No 1221/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, relativo a la participación voluntaria de organizaciones en un sistema comunitario de gestión y

auditoría medioambientales (EMAS), y por el que se derogan el Reglamento (CE) no 761/2001 y las Decisiones 2001/681/CE y 2006/193/CE de la Comisión,
<https://www.boe.es/doue/2009/342/L00001-00045.pdf>

EMEP/EEA, 2023. Air pollutant emission inventory guidebook 2023, Technical guidance to prepare national emission inventories, <https://www.eea.europa.eu/publications/emeep-eea-guidebook-2023>.

EMSA, 2024. Prevention of Pollution by Ships, <https://www.emsa.europa.eu/we-do/sustainability/environment.html>

EPA, 2012. Agricultural Air Quality Conservation Measures. Reference Guide for Cropping Systems and General Land Management, <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-06/documents/agaqconsmeasures.pdf>

EPA, 2024. Best Clean Air Practices for Port Operations, <https://www.epa.gov/ports-initiative/best-clean-air-practices-port-operations>

EU-BRITE (s.f.). Documentos de referencia de las Mejores Técnicas Disponibles (BREFs) <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/es/reference>

FAO, 2014. Buenas prácticas para la industria de piensos, ISBN 978-92-5-306487-8, <https://www.fao.org/4/i1379s/i1379s.pdf>

Flagiello, D., Di Natale, F., Erto, A., Lancia, A., 2021. Oxidative Scrubber for NO_x Emission Control Using NaClO₂ Aqueous Solutions, Chemical Engineering Transactions, 86, 397-402, <https://doi.org/10.3303/CET2186067>

Fleuti, E., 2020. Effects of COVID-19 related air traffic restrictions on local air quality at Zurich airport, Journal of airport management, 15, 1, 59–70, <https://doi.org/10.69554/UXAN5301>

Freitas Netto, S.V., Sobral, M.F.F., Bezerra Ribeiro, A.R., Luz Soares, G.R., 2020. Concepts and forms of greenwashing: a systematic review. Environmental Sciences Europe, 32, 19, <https://doi.org/10.1186/s12302-020-0300-3>

Gil, J. (s. f.). Yara–Petro Miljö: reducción de emisiones NOx en la industria cementera, Tests realizados en 15 plantas diferentes, Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN, <https://cemento-hormigon.com/sostenibilidad/yara-petro-miljo-reduccion-de-emisiones-nox-en-la-industria-cementera-tests-realizados-en-15-plantas-diferentes/>

Gu, B., Zhang, L., Van Dingenen, R., Vieno, M., Van Grinsven, H.J.M., Zhang, X., Zhang, S., Chen, Y., Wang, S., Ren, C., Rao, S., Holland, M., Winiwarter, W., Chen, D., Xu, J., Sutton, M.A., 2021. Abating ammonia is more cost-effective than nitrogen oxides for mitigating PM2.5 air pollution, Science 374, 6568, 758-762, <https://doi.org/10.1126/science.abf8623>

Harrison, R.M.; Beddows, D.C., 2017. Efficacy of Recent Emissions Controls on Road Vehicles in Europe and Implications for Public Health, Scientific Report 7, 1152, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01135-2>

Hidalgo-Barquero, J., Flores-Jaramillo, S., Pinilla-González, J.M., 2022. La ciencia ciudadana como herramienta de concienciación y generación de información sobre calidad del aire, Sociedad digital, comunicación y conocimiento: retos para la ciudadanía en un mundo global, Universidad de Extremadura, ISBN 978-84-1122-082-8, pp 715-732.

Hinds, W.C., 1999. Aerosol Technology: Properties behaviour and measurement of airbone particle. 2nd ED. New York: Wiley-Interscience, 504p , ISBN 978-1-118-59197-0

Holguin-Veras, J., Amaya Leal, J., Sánchez-Díaz, I., Browne, M., Wojtowicz, J., 2020. State of the Art and Practice of Urban Freight Management Part II: Financial Approaches, Logistics, and Demand Management, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 137, 383-410, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.036>

Holman, C., Harrison, R., Querol, X., 2015. Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities, Atmospheric Environment, 111, 161-169, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.009>

Hudda, N., Simon, M.C., Zamore, W., Durant, J.L., 2018. Aviation-related impacts on ultrafine particle number concentrations outside and inside residencies near an airport, Environmental Science & Technology, 52, 4, 1765–1772, <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.7b05593>

IAQM, 2014. Guidance on the assessment of dust from demolition and construction, Institute of Air Quality Management, <https://iaqm.co.uk/text/guidance/construction-dust-2014.pdf>

IEA, 2023. International Energy Agency. Global EV Data Explorer, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>

IARC, 2012. Chemical Agents and Related Occupations, Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 100F, ISBN-13 978-92-832-1323-9

ICAO, 2022. Greenhouse gas management and mitigation at airports, Eco airport toolkit, <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/GHG%20Management%20and%20Mitigation%20at%20Airports.pdf>

ICP Vegetation, 2017. Ozone impacts on vegetation, <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/our-science/ozone>

IMPEL, 2024. Página web de la Red de la Unión Europea para la Aplicación y el Cumplimiento de la Legislación Medioambiental (IMPEL), <https://www.impel.eu/es>

In 't Veld, M., Carnerero, C., Massagué, J., Alastuey, A., de la Rosa, J., Sánchez, A.M., Escudero, M., Mantilla, E., Gangoiti, G., Pérez, C. Olid, M., Moreta, J.R., Hernández, J.L., Santamaría, J. Millán, M., Querol, X., 2021. Understanding the local and remote source contributions to ambient O₃ during a pollution episode using a combination of experimental approaches in the Guadalquivir Valley, Southern Spain, Science of The Total Environment 777, 144579, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144579>

INCITE, 2024. Página web del Centro Europeo para la Transformación Industrial y la Emisiones (INCITE), <https://innovation-centre-for-industrial-transformation.ec.europa.eu>

- Inês, A.; Diniz, A.; Moreira, A.C., 2023. A review of greenwashing and supply chain management: Challenges ahead, *Cleaner Environmental Systems*, 11, 100136, ISSN 2666-7894, <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100136>
- Inventario nacional de emisiones a la atmósfera, 2024. Emisiones de contaminantes atmosféricos, <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/Documento-resumen-Inventario-CA-2024.pdf>
- Invernizzi, G.; Ruprecht, A.; Mazza, R.; De Marco, C.; Močnik, G.; Sioutas, C.; Westerdahl, D., 2011. Measurement of black carbon concentration as an indicator of air quality benefits of traffic restriction policies within the ecopass zone in Milan, Italy. *Atmospheric Environment*, 45, 3522–3527, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.008>
- Islas, J., Manzini, F., Masera, O., Vargas, V., 2019. Chapter Four - Solid Biomass to Heat and Power. The Role of Bioenergy in the Emerging Bioeconomy: Resources, Technologies, Sustainability and Policy, Academic Press, 145-177, ISBN 9780128130568, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00004-2>
- ISO 14.001:2015/Amd 1:2024. Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso — MODIFICACIÓN 1: Acciones relativas al cambio climático, <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:amd:1:v1:es>
- Izquierdo, R.; Santos, S.G.; Dos Borge, R.; de la Paz, D.; Sarigiannis, D.; Gotti, A.; Boldo, E., 2020. Health impact assessment by the implementation of Madrid City air-quality plan in 2020, *Environmental Research*, 183, 109021, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109021>
- Karpinski, E., 2021. Estimating the effect of protected bike lanes on bike-share ridership in Boston: A case study on Commonwealth Avenue, *Case Studies on Transport Policy*, 9, 3, 1313-1323, <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.06.015>
- Krecl, P.; Johansson, C.; Targino, C.A.; Ström, J.; Burman, L., 2017. Trends in black carbon and size-resolved particle number concentrations and vehicle emission factors under real-world conditions, *Atmospheric Environment*, 165, 155–168, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.036>
- Kuenen, J., Dellaert, S., Visschedijk, A., Jalkanen, J.-P., Super, I., Denier van der Gon, H., 2022. CAMS-REG-v4: a state-of-the-art high-resolution European emission inventory for air quality modelling, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 491–515, <https://doi.org/10.5194/essd-14-491-2022>
- Larki, I., Zahedi, A., Asadi, M., Mahdi Forootan, M., Farajollahi, M., Ahmadi, R., Ahmadi, A., 2023. Mitigation approaches and techniques for combustion power plants flue gas emissions: A comprehensive review, *Science of The Total Environment*, 903, 166108, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166108>
- Liu, X., Shen, H., Nie, X., 2019. Study on the filtration performance of the baghouse filters for ultra-low emission as a function of filter pore size and fiber diameter, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2), 247, <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph16020247>

- López, M.; Giner-Cifre, C.; López-Lilao, A.; Sanfélix, V.; Monfort, E.; Viana, M., 2024. An integrated strategy for air quality monitoring and management in industrial port areas, *Cleaner Engineering and Technology*, 19, 100729, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100729>
- Maffia J., Dinuccio E., Amon B., Balsari P., 2020. PM emissions from open field crop management: Emission factors, assessment methods and mitigation measures – A review, *Atmospheric Environment* 226, 117381, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117381>
- Malico, I., Nepomuceno Pereira, R., Gonçalves, A.C., Sousa, A.M.O., 2019. Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 960-977, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.022>
- MAPA, 2010. Ministerio de Agricultura y Pesca: Guía de mejores técnicas disponibles del sector de la avicultura de puesta, https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/ganaderia-y-medio-ambiente/82guia_mtd_sector_avicultura_puesta_tcm30-108198.pdf
- MAPA, 2014. Documento orientativo sobre la prevención y reducción de las emisiones de amoníaco de origen agropecuario, https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/ganaderia-y-medio-ambiente/ece-b-air120_tcm30-617457.pdf
- Mateo-Márquez, A.J.; González-González, J.M.; Zamora-Ramírez, C., 2022. An international empirical study of greenwashing and voluntary carbon disclosure, *Journal of Cleaner Production*, 363, 132567, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132567>
- McKenna, J.D., Turner, J.H., McKenna, J. P., 2008. Fine particle (2.5 microns) emissions: regulations, measurement, and control. John Wiley & Sons, 272p, ISBN 978-0-470-39131-0
- Noguera, I. B., 2023. Ingeniería química Reviews, <https://ingenieriaquimicareviews.com/>
- Mensing, F., Bideaux, E., Trigui, R., Ribet, J., Jeanneret, B., 2014. Eco-driving: An economic or ecologic driving style?, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 110-121, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.013>
- Michie, S.; van Stralen, M.; West, R., 2011. The behaviour change wheel: a new method for characterising and designing behaviour change interventions, *Implementation Science*, 6:42, <https://doi.org/10.1186/1748-5908-6-42>
- MITECO, 2019. I Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica, https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/primerpncca_2019_tcm30-502010.pdf
- MITECO, 2022. Bases Científico Técnicas para la elaboración de un plan de Ozono 2022, https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgalsi/atm%c3%b3sfера-y-calidad-del-aire/Bases_Cientificas_para_un_Plan_Nacional_del_Ozono_30_03_23.pdf
- MITECO, 2023a. Evaluación de la Calidad del Aire en España, <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion->

- ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-
aire/informeevaluacioncalidadaireespana2022_tcm30-590211.pdf
- MITECO, 2023b. Plan Marco de Acción a corto plazo en caso de episodios de alta contaminación, https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/09072021planepisodios_tcm30-529218.pdf
- MITECO, 2024a. Normativa europea de Calidad del Aire, <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/normativa/normativa-europea.html>
- MITECO, 2024b. Planes de calidad del aire, <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/planes-mejora.html>
- MITECO, 2024c. Actualización del Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica 2023-2030 2023-2030, https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgalsi/atm%C3%B3sfera-y-calidad-del-aire/emisiones/pol-med/actualizacion_pncca2023_240115.pdf
- MITECO, 2024d. Las zonas de bajas emisiones en España, https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/movilidad/zonas_de_bajas_emisiones_en_espana.html
- MITECO, 2024e. Buenas prácticas de manejo útiles de los sectores Agricultura y Ganadería, <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/pol-med/informes.html>
- MITECO, 2024f. Infografía sector Residencial 1er Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/cartel_a4_residencial_tcm30-561017.jpg
- Moreno, C.; Allam, Z.; Chabaud, D.; Gall, C.; Pratlong, F., 2021. Introducing the “15-Minute City”: Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities, *Smart Cities*, 4, 93–111, <https://doi.org/10.3390/smartcities4010006>
- Mueller, N., Rojas-Rueda, D., Khreis, H., Cirach, M., Andrés, D., Ballester, J., Bartoll, X., Daher, C., Deluca, A., Echave, C., Milà, C., Márquez, S., Palou, J., Pérez, K., Tonne, C., Stevenson, M., Rueda, S., Nieuwenhuijsen, M., 2020. Changing the urban design of cities for health: The superblock model, *Environment International*, 134, 105132, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105132>
- Mueller, S. C., Hudda, N., Levy, J. I., Durant, J. L., Patil, P., Lee, N. F., Weiss, I., Tatro, T., Duhl, T., Lane, K., 2022. Changes in Ultrafine Particle Concentrations near a Major Airport Following Reduced Transportation Activity during the COVID-19 Pandemic, *Environmental Science & Technology Letters*, 9, 9, 706–711, <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00>
- Mueller, N., Westerby, M, Nieuwenhuijsen, M., 2023. Health impact assessments of shipping and port-sourced air pollution on a global scale: A scoping literature review, *Environmental Research*, 216, 1, 114460, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114460>
- Munim, Z.H., y Saha, R., 2021. Green Ports and Sustainable Shipping in the European Context, In: Carpenter, A., Johansson, T.M., Skinner, J.A. (eds) Sustainability in the Maritime Domain.

- Strategies for Sustainability, Springer, Cham, ISBN978-3-030-69324-4,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-69325-1_4,
- Muzio, L. J., Quartucy, G. C., Cichanowicz, J. E., 2002, Overview and status of post-combustion NO_x control: SNCR, SCR and hybrid technologies, International Journal of Environment and Pollution, 17:1-2, 4-30, <https://doi.org/10.1504/IJEP.2002.000655>
- Neusa et al., 2019. Exposición al material particulado PM10 y PM2,5 en galponeros de granjas, Universidad, ciencia y tecnología, 23, 95, 13-24, <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/241/436>
- NEXT, 2023. GUIDEBOOK Measures to Improve Urban Air Quality, <https://www.cleanaircities.net/>
- Noguera, I. B., 2023. Ingeniería química Reviews, <https://ingenieriaquimicareviews.com/>
- Oliveira, K., Guevara, M., Jorba, O., Querol, X., Alonso, M., Pérez-Ilzarbe, J., Alonso, N., Pérez García-Pando, C., 2023. A new NMVOC speciated inventory for a reactivity-based approach to support ozone control strategies in Spain, Science of The Total Environment, 867, 161449, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161449>
- OMM, 2023. Distribución Urbana de Mercancías, III Monografía Observatorio de Movilidad Metropolitana, https://observatoriomovilidad.es/wp-content/uploads/2024/03/Monografia_III_OMM_2023_Distribuci%C3%B3n_Urbana_de_Mercanc%C3%ADAs.pdf
- OMS, 2012. Gases de escape de los motores Diesel son carcinógenos, Nota de prensa 213, https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr213_S-1.pdf
- OMS, 2021. Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: Materia particulada (MP2,5 y MP10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono: Resumen ejecutivo, <https://www.who.int/es/publications/item/9789240034433>
- OMS, 2022. Contaminación del aire ambiente (exterior), [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Panteliadis, P.; Strak, M.; Hoek, G.; Weijers, E., 2014. Implementation of a low emission zone and evaluation of effects on air quality by long-term monitoring, Atmospheric Environment, 86, 113–119, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.12.035>
- PE, 2023. sobre la INFORME propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa (versión refundida), https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0233_ES.html
- PE, 2024a. Parlamento Europeo: Informe sobre la propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa (versión refundida), https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0233_ES.html
- PE, 2024b. Parlamento Europeo: European Parliament legislative resolution of 24 April 2024 on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and

- cleaner air for Europe (recast), https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0319_EN.html
- Puig, J., 1999, La bicicleta: un vehículo para cambiar nuestras ciudades, Ecología Política 17, 37-43, <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/153383.pdf>
- Peters, A., Nawrot, T.S., Baccarelli, A., 2021. Hallmarks of environmental insults, Cell, 184, 6, 1455-1468, ISSN 0092-8674, <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.043>
- Puertos del Estado, 2015. Guía de Buenas Prácticas en la Manipulación y Almacenamiento de Graneles Sólidos en Instalaciones Portuarias, ISBN: 978-84-88740-05-2, https://www.puertos.es/es-es/calidad/Documents/Guia_BP_Graneles_Solidos_Bres.pdf
- Puertos del Estado, 2024. Estrategia de sostenibilidad de puertos del estado, <https://www.puertos.es/es-es/medioambiente/Paginas/Introduccionmedioamb.aspx>
- Qadir,R.M.; Abbaszade, G.; Schnelle-Kreis, J.; Chow, J.C.; Zimmermann, R., 2013. Concentrations and source contributions of particulate organic matter before and after implementation of a low emission zone in Munich, Germany, Environmental Pollution, 175, 158–167, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.002>
- Querol, X., Viana, M., Moreno, T., Alastuey, A., Pey, J., Amato, F., Pandolfi, M., Minguillón, M.C., Reche, C., Pérez, N., González, A., Pallarés, M., Moral, A., Monfort, E., Escrig, A., Cristóbal, A., Hernández, I., Miró, J. V., Jiménez, S., Reina Velázquez, F., Jabato Martín, R., Ballester, F., Boldo, E., Bellido, J., 2012. Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire, Editorial CSIC, ISBN 978-84-00-09475-1, <https://www.csic.es/es/ciencia-y-sociedad/libros-de-divulgacion/coleccion-informes/bases-cientifico-tecnicas-para-un-plan-nacional-de-mejora-de-la-calidad-del-aire>
- Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Moreno, T., Reche, C., Minguillón, M. C., Ripoll, A., Pandolfi, M., Amato, F., Karanasiou, A., Pérez, N., Pey, J., Cusack, M., Vázquez, R., Plana, F., Dall'Osto, M., de la Rosa, J., Sánchez de la Campa, A., Fernández-Camacho, R., Rodríguez, S., Pio, C., Alados-Arboledas, L., Titos, G., Artíñano, B., Salvador, P., García Dos Santos, S., Fernández Patier, R., 2013. Variability of carbonaceous aerosols in remote, rural, urban and industrial environments in Spain: Implications for air quality policy, Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 6185–6206, <https://doi.org/10.5194/acp-13-6185-2013>
- Querol, X.; Amato, F., 2017. Guidebook of measures to improve urban air quality, AIRUSE <https://www.cleanaircities.net/>
- Querol, X., 2018. Alcance y propuestas de actuación de los planes de mejora de la calidad del aire, La calidad del aire en las ciudades: Un reto mundial, Fundación Gas Natural Fenosa, pp. 147-166, ISBN: 978-84-09-01905-2.
- RD102/2011, 2023. Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-1645>
- RE4INDUSTRY, 2024. 100% Renewable Energies for Industries, <https://re4industry.eu/>

- Reche, C.; Querol, X.; Alastuey, A.; Viana, M.; Pey, J.; Moreno, T.; Rodríguez, S.; González, Y.; Fernández-Camacho, R.; de la Rosa, J.; et al., 2011. New considerations for PM, Black Carbon and particle number concentration for air quality monitoring across different European cities, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 6207–6227, <https://doi.org/10.5194/acp-11-6207-2011>
- Reche, C., Viana, M., Pandolfi, M., Alastuey, A., Moreno, T., Amato, F., Ripoll, A., Querol, X., 2012. Urban NH₃ levels and sources in a Mediterranean environment. *Atmospheric Environment*, 57, 153-164, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.04.021>
- Retsoulis, I. Aries, E., Breithaupt, P., Fereres, S., Gutierrez Alonso, Karlis, P., Chronopoulos, G., 2024. The revision of the Industrial Emission Directive: implications for the Sevilla process and promoting innovation in large industrial installations through INCITE, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.28888.71680>
- Riley, K., Cook, R., Carr, E., Manning, B., 2021. A systematic review of the impact of commercial aircraft activity on air quality near airports, *City and Environment Interactions*, 11, 100066, ISSN 2590-2520, <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100066>
- Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow, W.R., Zhou, N., Elliott, N., Dell, R., Heeren, N., Huckestein, B., Cresko, J., Miller, S.A., Roy, J., Fennell, P., Cremmins, B., Blank, T.K., Hone, D., Williams, E.D., de la Rue du Can, S., Sisson, B., Williams, M., Katzenberger, J., Sethi, D.B.G., Ping, H., Danielson, D., Lu, H., Lorber, T., Dinkel, J., Helseth, J., 2020. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070, *Applied Energy*, 266, 114848, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>
- Rivas, I., Viana, M., Moreno, T., Bouso, L., Pandolfi, M., Alvarez-Pedrerol, M., Forns, J., Alastuey, A., Sunyer, J., Querol, X., 2015. Outdoor infiltration and indoor contribution of UFP and BC, OC, secondary inorganic ions and metals in PM2.5 in schools, *Atmospheric Environment*, 106, 129-138, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.055>
- Rivera, A., Movalia, S., Rutkowski, E., Rangel, Y., Pitt, H., Larsen, K., 2023. Global Greenhouse Gas Emissions: 1990-2021 and Preliminary 2022 Estimates, Rhodium Group, <https://rhg.com/research/global-greenhouse-gas-emissions-2022/>
- Rungger, W., Canedo, K.J., 2011. Yara–Petro Miljö: reducción de emisiones NOx en la industria cementera, Tests realizados en 15 plantas diferentes, Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN, <https://emento-hormigon.com/sostenibilidad/yara-petro-miljo-reduccion-de-emisiones-nox-en-la-industria-cementera-tests-realizados-en-15-plantas-diferentes/>
- Sajeev, E.P.M., Amon, B., Ammon, C., Zollitsch, W., Winiwarter, W., 2018. Evaluating the potential of dietary crude protein manipulation in reducing ammonia emissions from cattle and pig manure: A meta-analysis, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110, 161–175, <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9893-3>
- Safety4Sea, 2021. European ports commit to shore power for giant container ships by 2028, <https://safety4sea.com/european-ports-commit-to-shore-power-for-giant-container-ships-by-2028/>

- Sanmiguel-Rodríguez, A., Arufe Giráldez, V., 2021. Active Commuting and Sustainable Mobility in Spanish Cities: Systematic Review, Sport Mont, 19(3), 95-105, <https://doi.org/10.26773/smj.211006>
- Schipol, 2024. Measures against ultrafine particles, <https://www.schiphol.nl/en/schiphol-as-a-neighbour/page/measures-against-ultrafine-particles/>
- Schripp, T., Anderson, B.E., Bauder, U., Rauch, B., Corbin, J.C., Smallwood, G.J., Lobo, P., Crosbie, E.C., Shook, M.A., Miake-Lye, R.C., Yu, Z., Freedman, A., Whitefield, P.D., Robinson, C.E., Achterberg, S.L., Köhler, M., Oßwald, P., Grein, T., Sauer, D., Voigt, C., Schlager, H., LeClercq, P., 2022. Aircraft engine particulate matter emissions from sustainable aviation fuels: Results from ground-based measurements during the NASA/DLR campaign ECLIF2/ND-MAX, Fuel, 325, 124764, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124764>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S. N., 2016. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Ed.Wiley, pp. 1152, ISBN: 978-1-118-94740-1
- Shih, S., Lee, W., Lin, L., Huang, J., Su, J., Chang-Chien, G., 2008. Significance of biomass open burning on the levels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in the ambient air, Journal of Hazardous Materials, 153, 1–2, 276-284, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.08.048>
- Sidrach, F. J., 2020. Requisitos de ordenación y gestión ganadera de la Ley 3/2020 de recuperación y protección del Mar Menor, Ciclo de jornadas web: "Obligaciones para el cumplimiento, por parte de agricultores y ganaderos, de la Ley 3/2020 de recuperación y protección del mar Menor", https://sftt.info/descargas/052020/Presentacion_jornada_2_mar_menor.pdf
- Sorte, S., Rodrigues, V., Borrego, C., Monteiro, A., 2020. Impact of harbour activities on local air quality: A review, Environmental Pollution, 257, 113542, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113542>
- Stacey, B., 2019. Measurement of ultrafine particles at airports: A review, Atmospheric Environment, 198, 463-477, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.041>
- Statista, 2019. How Cruise Ship Pollution Compares To Cars, <https://www.statista.com/chart/18351/emissions-from-cruise-ships-and-cars-in-european-port-cities/>
- Sutton, M. A., Howard, C. M., Mason, K. E., Brownlie, W. J., Cordovil, C. M. d. S. (eds.), 2022. Nitrogen Opportunities for Agriculture, Food & Environment. UNECE Guidance Document on Integrated Sustainable Nitrogen Management, UK Centre for Ecology & Hydrology, Edinburgh, UK, https://unece.org/sites/default/files/2022-11/UNECE_NitroOpps%20red.pdf
- Titos, G.; Lyamani, H.; Drinovec, L.; Olmo, F.J.; Močnik, G.; Alados-Arboledas, L., 2015. Evaluation of the impact of transportation changes on air quality, Atmospheric Environment, 114, 19–31, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.027>
- The Real Urban Emissions Initiative (TRUE), 2021. Evaluation of real-world vehicle emissions in Brussels, <https://www.trueinitiative.org/media/792040/true-brussels-report.pdf>

Transport and Environment, 2023. Europe's luxury cruise ships emit as much toxic sulphur as 1bn cars – study, <https://www.transportenvironment.org/articles/europees-luxury-cruise-ships-emit-as-much-toxic-sulphur-as-1bn-cars-study>

Tribunal de Cuentas Europeo (TCUE), 2019. Respuesta de la UE al escándalo «dieselgate», https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/brp_vehicle_emissions/brp_vehicle_emissions_es.pdf

UAR, 2024. Urban Access Regulations, <https://urbanaccessregulations.eu/>

Ubach, N., Teira, M.R, 2010. Almacenamiento de deyecciones ganaderas, Dossier Técnic 14, 7-10, https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_DT%2FDT_2006_14_7_10.pdf

Umweltbundesamt, 2021. Ground-level engine emissions are greatest source of ultrafine particle pollution at airports, <https://www.umweltbundesamt.de/en/press/pressinformation/ground-level-engine-emissions-are-greatest-source>

UNEP, 2024. Global clean ports, <https://www.unep.org/explore-topics/transport/what-we-do/global-clean-ports>

UNECE, 2015. Framework Code for Good Agricultural Practice for Reducing Ammonia Emissions, <https://unece.org/info/Environment-Policy/Air-Convention/pub/21549>

UNECE, 2020. Effects of air pollution on materials. United Nations Economic Commission for Europe, ICP Materials Report UNECE/EB/AIR.GE.1/2020/13, https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2020/AIR/EMEP_WGE_Joint_Session/ECE_E_B.AIR_GE.1_2020_13-2008940E.pdf

UNECE, 2021. Code of good practice for wood-burning and small combustion installations, <https://unece.org/environment-policy/publications/code-good-practice-wood-burning-and-small-combustion-installations>

Van Caneghem, J., De Greef, J., Block, C., Vandecasteele, C., 2016. NOx reduction in waste incinerators by selective catalytic reduction (SCR) instead of selective non catalytic reduction (SNCR) compared from a life cycle perspective: a case study, Journal of Cleaner Production, 112, 5, 4452-4460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.068>

van Wagenberg, A.V., Groot Koerkamp, P.W.G., 2024. Validation Methods for the Ammonia Removal of an Air Scrubber on a Poultry House Using the Acid Use and the Process Water Nitrogen Balance, Journal of the ASABE, 67(3): 761-774, <https://doi.org/10.13031/ja.15865>

Vanderstraeten, P.; Brasseur, O.; Forton, M.; Cheymol, A.; Squilbin, M., 2010. Particulate Matter and Nitrogen Dioxide in the Brussels Ambient Air, Geographical Forum and Environmental Protection Journal, 9, 75–86, <https://forumgeografic.ro/wp-content/uploads/2010/9/Vanderstrateen.pdf>

VanderZaag, A., Amon, B., Bittman, S., Kuczyński, T., 2015. Ammonia Abatement with Manure Storage and Processing Techniques. In: Reis, S., Howard, C., Sutton, M. (eds) Costs of Ammonia Abatement and the Climate Co-Benefits, Springer, Dordrecht, https://doi.org/10.1007/978-94-017-9722-1_5

Viana, M.; Leeuw, F.; de Bartonova, A.; Castell, N.; Ozturk, E.; González Ortiz, A., 2020. Air quality mitigation in European cities: Status and challenges ahead, *Environment International*, 143, 105907, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105907>

Vivanco, M.G.; Garrido, J.L.; Martín, F.; Theobald, M.R.; Gil, V.; Santiago, J.L.; Lechón, Y.; Gamarra, A.; Sánchez, E.; Alberto, A.; Bailador, A., 2021. Assessment of the Effects of the Spanish National Air Pollution Control Programme on Air Quality, *Atmosphere*, 12, 158. <https://doi.org/10.3390/atmos12020158>

Zhang, C., Chen, L., Ding, S., Zhou, X., Chen, R., Zhang, X., Yu, Z., Wang, J., 2022. Mitigation effects of alternative aviation fuels on non-volatile particulate matter emissions from aircraft gas turbine engines: A review, *Science of the Total Environment*, 820, 153233, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153233>