



**Universidad  
Zaragoza**

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

---

**Seguimiento de las medidas de gases traza y partículas de los servicios  
municipales del Ayuntamiento de Zaragoza y de otras redes**

---

*Autor:*

Mario del Pozo Oliván

*Director:*

Dr. Amalio Fernández-Pacheco Pérez

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

FACULTAD DE CIENCIAS

25 de junio de 2021

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Principales especies contaminantes</b>	<b>2</b>
2.1. Monóxido de carbono (CO)	2
2.1.1. Determinación del CO por absorción infrarroja	3
2.2. Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	4
2.2.1. Determinación de los óxidos de nitrógeno por quimioluminiscencia	4
2.3. Hidrocarburos y Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC)	6
2.3.1. Determinación de hidrocarburos por ionización de llama	6
2.4. Ozono (O <sub>3</sub> )	7
2.4.1. Determinación de ozono por absorción ultravioleta	10
2.5. Partículas en suspensión y PM <sub>10</sub>	10
2.5.1. Determinación de partículas en suspensión PM <sub>10</sub> por atenuación de la radiación β	12
2.6. Óxidos de azufre	12
2.6.1. Determinación del SO <sub>2</sub> por fluorescencia ultravioleta	13
<b>3. Red de Calidad del Gobierno de Aragón (RCGA)</b>	<b>15</b>
3.1. Huesca	17
3.2. Torrelisa	18
3.3. Monzón Centro	18
3.4. Bujaraloz	19
3.5. Alagón	19
3.6. Teruel	20
<b>4. Red de Calidad del Aire de Zaragoza</b>	<b>21</b>
4.1. Estación de Las Fuentes	21
4.2. Estación de Renovales	21
4.3. Estación Centro	22
4.4. Estación de El Picarral	22
4.5. Estación de Avenida Soria	22
4.6. Estación de Actur	23
4.7. Estación de Roger de Flor	23
4.8. Estación de Jaime Ferrán	23
<b>5. Conclusión</b>	<b>24</b>
<b>6. Referencias</b>	<b>25</b>

# 1. Introducción

La contaminación atmosférica es uno de los problemas medioambientales a los que se lleva enfrentando la sociedad desde hace siglos. Ya en 1307, el rey Eduardo I, prohibió la quema de carbón en los hornos de cal de Londres debido a la contaminación atmosférica que provocaban. En 1952, en la misma ciudad, una semana en la que se acumularon nieblas y humos procedentes de la ciudad, se produjo la muerte de más de 4000 personas. Debido a este incidente y a la, cada vez mayor, preocupación por la calidad del aire, se elaboró el *Air Pollution Control Act* en 1955, al que le siguieron numerosas leyes de control de la calidad del aire en todo el mundo.

Actualmente, la contaminación atmosférica sigue siendo un tema de gran importancia, provocando (según la Agencia Europea del Medio Ambiente, AEMA) más de 31.000 muertes prematuras al año en España y 500.000 en Europa, siendo las partículas en suspensión de tamaño inferior a  $2.5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) las que más muertes prematuras provocan (unas 417.000), seguido del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) con 55.000, y del ozono ( $\text{O}_3$ ) con 20.600 [1]. Sin embargo, la calidad del aire de los distintos países del mundo ha mejorado notablemente en las últimas décadas: respecto a 2009, en el año 2018 se estimaron 60.000 muertes menos en Europa, según la AEMA. Además, al ser cada vez mayores las regulaciones ligadas a las concentraciones de las distintas especies contaminantes, se espera que la calidad del aire de nuestras ciudades continúe mejorando en los próximos años.

Cabe mencionar la importante diferencia entre la *emisión* e *inmisión* de un gas. En este contexto, la emisión hace referencia a la liberación, de cualquier foco, de gases contaminantes a la atmósfera. Las principales fuentes emisoras de gases contaminantes son, como veremos, la industria automovilística y las centrales de generación de energía que utilizan combustibles fósiles para funcionar. Por otro lado, la inmisión hace referencia a los efectos de estos gases contaminantes emitidos sobre el medio ambiente y, en particular, sobre las personas que los respiran.

El objetivo de esta memoria es recoger brevemente la información relacionada sobre las características, los efectos en la salud y la medición de las sustancias contaminantes más representativas de la polución atmosférica. También busca introducir las principales redes de medición de la calidad del aire a nivel europeo y, en particular, las del Gobierno de Aragón y el Ayuntamiento de la ciudad de Zaragoza.

## 2. Principales especies contaminantes

### 2.1. Monóxido de carbono (CO)

El *CO* es el gas contaminante que se encuentra en mayor cantidad en el aire (más de la mitad). Al ser un gas inodoro, incoloro e insípido, resulta un gas peligroso, ya que no se puede detectar sin aparatos externos.

Se produce en la quema deficiente de sustancias como la gasolina, el carbón, el petróleo, u otros materiales carbonáceos, dando lugar a *CO* en vez de *CO*<sub>2</sub>. Esta combustión incompleta puede darse cuando no hay suficiente suministro de oxígeno, cuando la temperatura de combustión es baja, cuando el gas permanece mucho tiempo en entornos a altas temperaturas, o debido a turbulencias en las cámaras de combustión.

Debido a la dificultad de mantener en orden estos parámetros en los vehículos, la mayor cantidad de *CO* proviene del sector automovilístico. Es por ello que las mayores concentraciones de *CO* se encuentran en los momentos del día donde hay mayor tráfico; esto es, durante la mañana y al final de la tarde.

A pesar de que se ha visto que los niveles de *CO* típicos en el aire urbano no afectan al estado de los materiales o de las plantas, sí tienen un gran impacto en la salud de las personas, actuando como asfixiante. Esto se debe a que el monóxido de carbono tiene una mayor afinidad con la hemoglobina de la sangre (formando carboxihemoglobina, COHb) que la del propio oxígeno, de forma que reduce la circulación de sangre oxigenada a los pulmones y al resto de tejidos, aumentando el ritmo cardíaco con el fin de suplir este déficit, lo que puede ralentizar las funciones cerebrales.

La forma típica de expresar la cantidad de carboxihemoglobina en la sangre es en forma de porcentaje de COHb (*%COHb*) en la misma. Este depende de la concentración de monóxido de carbono [*CO*] en el aire y del tiempo *t* de exposición, de acuerdo a la siguiente ecuación (simplificada de *Ott and Mage, 1978*):

$$\%COHb = \beta \cdot (1 - e^{-\gamma t}) \cdot [CO] \quad (1)$$

Donde  $\beta = 0,15$  (*%/ppm CO*) y  $\gamma = 0,402$  (*horas*<sup>-1</sup>) son dos constantes.

Esta ecuación nos dice que a mayor concentración de *CO*, mayor será la concentración en sangre. Además, cuanto más tiempo estemos expuestos al gas, mayor será también esta concentración relativa, saturando al cabo de ciertas horas.

A medida que aumenta el *%COHb*, los síntomas se vuelven cada vez más perjudiciales para la salud, desde un simple dolor de cabeza y ralentización psicomotriz a partir del 10 *%COHb*, hasta la muerte por asfixia (60 *%COHb*) si la exposición es prolongada. Para personas con dificultades para respirar o con problemas relacionados con el corazón, estos problemas pueden producirse para concentraciones relativas del 5 *%COHb*.

La figura 1 resume los efectos en la salud a partir del porcentaje en sangre de COHb en función de las concentraciones de *CO* y del tiempo de exposición.

Hay que tener en cuenta que, a pesar de que el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico sitúa el límite de exposición en 8 horas del *CO* en 10 (*mg/cm*<sup>3</sup>) (unos 9 ppm), las concentraciones que se alcanzan puntualmente en carreteras congestionadas pueden llegar a ser mucho mayores (del orden de 5-50 ppm).

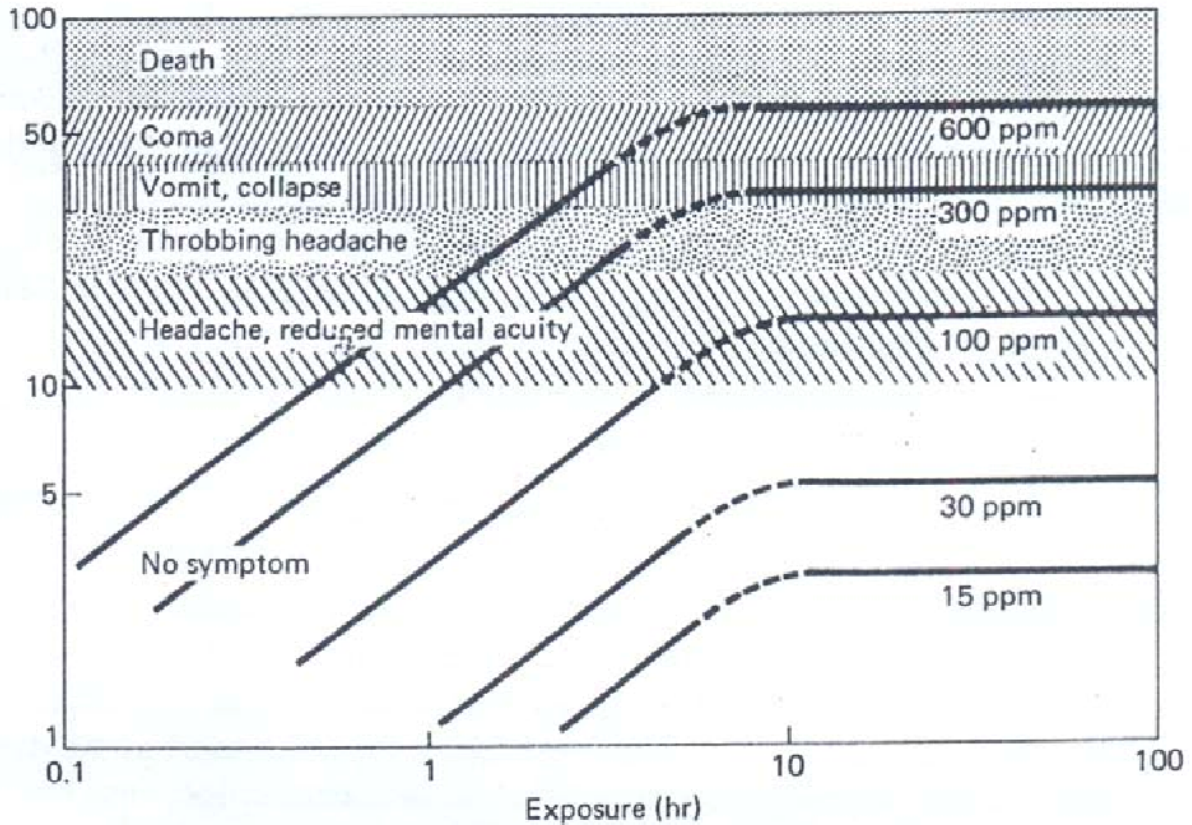


Figura 1: Efectos de la exposición al monóxido de carbono sobre la salud. (Fuente: Seinfeld, 1986)

### 2.1.1. Determinación del CO por absorción infrarroja

El monóxido de carbono ( $CO$ ) en fase gaseosa presenta una serie de líneas espectrales de absorción entre los 2 y 15  $\mu m$  que caracterizan a la molécula frente a otras sustancias interferentes en la muestra de aire ( $CO_2$ , vapor de agua,  $SO_2$  y  $NO_2$ ), con energías netas absorbidas distintas a las de  $CO$ .

Para la medida de la concentración de  $CO$  en la muestra de aire se hace uso del siguiente sistema: Un filamento calentado actúa como fuente de radiación, la cual es dirigida alternativamente a la célula de muestra (que contiene el aire con  $CO$  a estudiar) y a la célula de referencia (que contiene los gases interferentes), ambas del mismo material (suele ser cobre o latón) y, posteriormente, este aire pasa a una unidad de detección.

La irradiación de ambas células produce calor en proporción al número de moléculas de  $CO$ , las cuales absorben energía. Esto produce un cambio de presión en el material, que puede traducirse en señales eléctricas. A su vez, la energía absorbida por el  $CO$  produce una disminución de la misma en la unidad del detector, contrayéndose proporcionalmente a la concentración de  $CO$ .

La ley empírica de Lambert-Beer nos permite conocer la absorción debida a una determinada radiación monocromática en su recorrido a través de un material:

$$I = I_0 e^{-Kcl} \quad (2)$$

Donde  $I$  e  $I_0$  son las intensidades saliente y entrante, respectivamente;  $K$  es el coeficiente de absorción característico del  $SO_2$ ,  $c$  es la concentración en volumen del absorbente en el medio,  $l$  es la longitud del

camino óptico recorrido.

Haciendo uso de esta ley, se puede obtener la concentración buscada, todo ello con el sistema debidamente calibrado por medio de concentraciones conocidas.

## 2.2. Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ )

De los siete distintos óxidos de nitrógeno que se conocen, solo el  $NO$  y el  $NO_2$  tienen importancia en la contaminación del aire.

Hay dos fuentes principales de  $NO_x$ : el  $NO_x$  térmico, formado cuando el nitrógeno y el oxígeno del aire de combustión es calentado a unos 1000 K, provocando la oxidación del nitrógeno; y el  $NO_x$  de combustible, procedente de la oxidación de componentes nitrogenadas ligadas químicamente al combustible en sí. Aunque ambas fuentes pueden ser significativas, tiende a serlo en mayor medida el  $NO_x$  de combustible.

De todas las emisiones de  $NO_x$ , la mayor parte es en forma de  $NO$ , un gas incoloro que no muestra efectos en la salud a concentraciones atmosféricas. Sin embargo, el óxido de nitrógeno puede oxidarse en  $NO_2$ , que sí es peligroso para la salud. Puede producir irritación pulmonar, bronquitis, neumonía, y una mayor susceptibilidad a infecciones respiratorias en general.

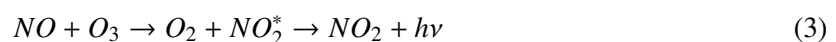
Otra consecuencia del dióxido de nitrógeno es el daño que ocasiona en las plantas terrestres, y su contribución a la lluvia ácida por medio de la formación (junto con el hidróxido  $OH^-$  presente en la atmósfera) de ácido nítrico ( $HNO_3$ ).

Pero la mayor consecuencia de la presencia de  $NO_2$  en el aire es que reacciona con los llamados Compuestos Orgánicos Volátiles para dar lugar al ozono troposférico, uno de los principales componentes del smog. En particular, el dióxido de nitrógeno es el responsable del tono marrón que presenta el smog de algunas ciudades como Los Angeles, como puede verse en la siguiente imagen:

A pesar de que se han realizado numerosos estudios de exposiciones agudas controladas de dióxido de nitrógeno en humanos (y exposiciones prolongadas en animales), no hay una clara relación entre la magnitud de la exposición de  $NO_2$  y su respuesta en las personas. Aun así, se ha podido concluir que solo concentraciones elevadas ( $1990 \mu g/m^3$ ;  $> 1 ppm$ ) afectan a la población sana, mientras que para aquellas personas con problemas respiratorios, las incidencias se producen a partir de los  $375 - 565 \mu g/m^3$ , es decir, entre 0,2 y 0,3 ppm [3]. Todo esto para exposiciones agudas, es decir, aquellas que tienen una duración reducida, de hasta 24 horas.

### 2.2.1. Determinación de los óxidos de nitrógeno por quimioluminiscencia

El monóxido de nitrógeno ( $NO$ ) reacciona con el ozono ( $O_3$ ), resultando en moléculas de oxígeno ( $O_2$ ) y de dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ). Hay una cierta probabilidad de que, debido a la reacción, se produzcan estados excitados del  $NO_2$  que, para volver a su estado fundamental, emiten un fotón característico del proceso en el rango del infrarrojo, en torno a los 1100 nm:



A este tipo de procesos, en los que se emiten fotones como consecuencia de moléculas excitadas formadas en una reacción química, se les conoce como *quimioluminiscencia*.



Figura 2: Vista aérea del *Dodger Stadium* en un atardecer en Los Angeles, oscurecido por el humo, el polvo y el smog. [2]

Para la determinación de las concentraciones de  $NO$  y de  $NO_2$ , se hace uso de un aparato que funciona de la siguiente forma:

La muestra de aire ambiente, de la que se extraerán las concentraciones, pasa primeramente por un filtro en el que se eliminan impurezas. A continuación, el flujo de aire se divide en dos líneas. Por la primera línea pasa el aire sin tratar, mientras que por la segunda línea la muestra de aire se hace pasar por un convertidor catalítico con el fin de transformar el  $NO_2$  del aire en  $NO$ . Por medio de válvulas solenoides, se introduce secuencialmente en la cámara de reacción el gas procedente de la primera línea (que contiene aire con  $NO + NO_2$ ) o de la segunda línea (que contiene aire con  $NO$ ).

Es en esta cámara donde se introduce, con caudal constante, el  $O_3$  necesario para que tenga lugar la quimioluminiscencia. Entonces tiene lugar la reacción descrita anteriormente, y la radiación resultante es pasada por un filtro óptico para evitar longitudes de onda parásitas. Utilizando un fotomultiplicador, podemos medir la corriente generada por esta radiación, la cual será proporcional a la concentración de  $NO$ .

La concentración de  $NO_2$  se obtiene de la diferencia entre la concentración de  $NO$  obtenida cuando pasaba aire de la segunda línea (solo con  $NO$ ), y la concentración de  $NO$  obtenida de la primera línea (con  $NO + NO_2$ ), todas estas obtenidas comparando con gases con concentraciones conocidas.

Alternativamente, hay aparatos que incluyen una segunda cámara de reacción con el fin de evitar el funcionamiento secuencial, ofreciendo una mayor precisión en las medidas al resolver problemas de asimetría en la medición.

### 2.3. Hidrocarburos y Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC)

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados principalmente por átomos de carbono e hidrógeno. Muchos de estos compuestos son volátiles y tienden a vaporizarse a temperatura ambiente: son los llamados compuestos orgánicos volátiles o, por sus siglas en inglés, VOC.

Los VOC son, junto con los óxidos de nitrógeno y la luz solar, el principal culpable de la formación de los contaminantes secundarios (como el ozono). Son también conocidos como oxidantes fotoquímicos y, junto a los contaminantes primarios, forman el smog.

En exteriores, los compuestos orgánicos volátiles provienen de la combustión incompleta de hidrocarburos. Una tercera parte de dichos compuestos se emiten vía sector transporte, y las otras dos terceras partes a través del sector industrial. En interiores, sin embargo, los VOC provienen de fuentes como materiales de construcción y productos del hogar o personales.

En cuanto a los riesgos que puede conllevar la exposición a hidrocarburos y VOC, se han detectado una gran variedad de efectos sobre la salud, entre los cuales destacan efectos alérgicos, de irritación (ocular, pulmonar, de nariz y de garganta) y sensoriales, problemas respiratorios y efectos cancerígenos [4].

En las últimas décadas, se ha llegado a la conclusión de que, en la mayoría de los casos, las concentraciones de estas sustancias en el interior de los edificios puede llegar a ser más perjudicial que las encontradas en el exterior. Por ello, para estudiar los riesgos en la salud, se han investigado los efectos de ciertas concentraciones en el interior de las estructuras, principalmente hogares y oficinas. Entre estos resultados, cabe destacar que los síntomas se encontraron para concentraciones límite de entre 1,7 y 25  $mg/m^3$ , concentraciones mucho mayores que las que suele haber de promedio en este tipo de edificios, que no suelen superar los 0,2  $mg/m^3$ .

Por otro lado, dentro de todos los VOC que contribuyen a estas concentraciones (interiores y exteriores), destacan el formaldehído y la acroleína, a los cuales suelen atribuirse los síntomas relacionados con la irritación que induce el smog. [4]

En cuanto a los límites de exposición, no hay una normativa general para la mayoría de compuestos orgánicos volátiles, y los que sí están regulados, tienen cifras ligadas muy distintas según el país. Por ejemplo, para el caso del Tolueno, Alemania sostiene un límite de exposición de 1,9  $mg/m^3$ , mientras que Francia y California coinciden en un límite de 0,3  $mg/m^3$  [5].

#### 2.3.1. Determinación de hidrocarburos por ionización de llama

El detector por ionización de llama (FID) permite medir de forma precisa concentraciones de compuestos orgánicos en estado gaseoso; en particular, el metano ( $CH_4$ ) y los hidrocarburos excluyentes de metano.

Para ello, se parte del hecho de que en una llama de hidrógeno puro (o diluido con un gas noble) hay muy pocos iones en el medio. Al introducir en este medio elementos orgánicos, se produce una gran cantidad de iones, dando lugar a una corriente que puede ser amplificada y medida. Esta respuesta es proporcional al contenido en carbono de la solución, de manera que la señal del metano es la más pequeña respecto a otros hidrocarburos, como el propano  $C_3H_{12}$ .

El aparato de medida parte de una muestra de aire externa, la cual es filtrada y llevada por dos



canales: por el primer canal, la muestra de aire es catalizada para eliminar todos los hidrocarburos a excepción del metano y, posteriormente, dirigida a la celda de detección de ionización de llama de  $CH_4$  (FID de  $CH_4$ ); por el segundo canal, la muestra pasa directamente a la celda de ionización de llama de los hidrocarburos totales (FID de HCT).

En cada una de las celdas, se introduce el aire por medio de un difusor y se mezcla con el hidrógeno el cual, con la ayuda de un generador de aire de combustión, formará la llama que dará lugar a los iones carbono. Esto produce un potencial eléctrico entre el difusor que mantiene la llama y el colector de iones del interior de la celda, dando lugar a una corriente proporcional al contenido en hidrocarburos, que es amplificada y medida por un circuito electrónico.

En el caso de la FID de  $CH_4$ , se genera una corriente proporcional a la concentración del metano, mientras que en el FID de HCT, esta es proporcional a la concentración de todos los hidrocarburos contenidos en la muestra de aire. Un circuito eléctrico permite calcular la diferencia entre ambas concentraciones para ofrecer la de los hidrocarburos sin metano (NMHC).

La calibración de este aparato ha de realizarse a diario a partir de muestras libres de hidrocarburos y de muestras con cantidades concretas conocidas de los mismos.

#### 2.4. Ozono ( $O_3$ )

Como hemos visto, la actuación conjunta de los óxidos de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles y la luz solar da como resultado la generación de contaminantes secundarios: los oxidantes fotoquímicos. De estos, el ozono es el más abundante y por el cual se han hecho estándares de calidad del aire.

Al ser un contaminante secundario, no tiene una fuente de emisión como tal. Sin embargo, estudiando sus precursores, se ha llegado a la conclusión de que gran parte proviene de la industria automovilística, emisora importante de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos.

A continuación, vamos estudiar someramente las reacciones químicas que dan lugar a la formación del  $O_3$ , pues es un proceso extremadamente complejo, en el que intervienen muchas sustancias. Sin embargo, se pueden explicar razonablemente bien las concentraciones medidas de ozono a partir del ciclo fotolítico del  $NO_2$  y del ciclo de los hidrocarburos.

El ciclo fotolítico del  $NO_2$  se inicia con la formación del  $NO$  durante la combustión (reacción de  $NO_x$  térmica):



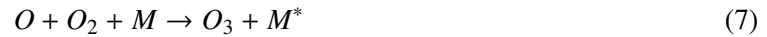
Este óxido de nitrógeno, en contacto con oxígeno molecular, puede oxidarse a dióxido de nitrógeno:



Si hay luz solar disponible, un fotón  $\gamma$  de longitud de onda inferior a  $424 \text{ nm}$  [6] puede descomponer el  $NO_2$  en  $NO$  y oxígeno atómico por fotólisis:



Este oxígeno atómico puede combinarse con oxígeno molecular para dar lugar al ozono:



Donde M es una molécula que actúa como mediador del proceso absorbiendo la energía sobrante de la combinación  $O + O_2$ . Si no pudiera ceder el exceso de energía, la molécula de ozono inestable retornaría a su estado anterior.

El ozono creado por este proceso reacciona rápidamente con el *NO*



Es tan eficaz este proceso que, siempre que haya  $O_3$  presente, las concentraciones de *NO* no aumentarán, aun habiendo emisiones.

El otro proceso principal de formación de ozono es el que implica la participación de hidrocarburos (denotados por RH).

Este ciclo empieza con la reacción de dichos hidrocarburos con el radical hidroxil ( $OH^-$ ) que se encuentra de forma natural en la atmósfera como resultado de la reacción del oxígeno atómico con agua. Así, tenemos la siguiente sucesión de reacciones:



De manera que llegamos a la producción de dióxido de nitrógeno, el cual, por medio de los procesos (6) y (7) dará lugar a ozono. Además, el grupo alcoxi (el  $RO^-$ ), renueva el hidroxil perdido en las reacciones anteriores y produce más  $NO_2$  por medio de los siguientes procesos:



Por lo que, a partir de una molécula de hidrocarburo, se convierten dos moléculas de *NO* a  $NO_2$ . Puesto que el *NO* elimina ozono y el  $NO_2$  lo genera, la actuación de hidrocarburos permite una mayor acumulación de  $O_3$  en el aire.

El siguiente diagrama resume todo este ciclo ligado a los hidrocarburos. [7]

Por tanto, teniendo en cuenta los procesos de formación del ozono, es fácil entender la forma típica que adoptan las concentraciones de *NO*,  $NO_2$  y  $O_3$  en las representaciones: durante la madrugada, la ausencia de luz solar impide que tengan lugar las reacciones comentadas anteriormente y, por tanto, las concentraciones de estos tres gases se mantienen constantes. Durante las primeras horas de la mañana, cuando comienza la circulación de vehículos, las concentraciones tanto de *NO* como de  $NO_2$  aumentan y, una vez que la intensidad de la luz solar es suficiente, se inicia el proceso de formación de ozono. Debido a que la reacción del  $O_3$  con el *NO* es muy eficiente, la concentración de este último decrece rápidamente para dar lugar a más  $NO_2$ . Una vez se reduce el número de vehículos en movimiento, las

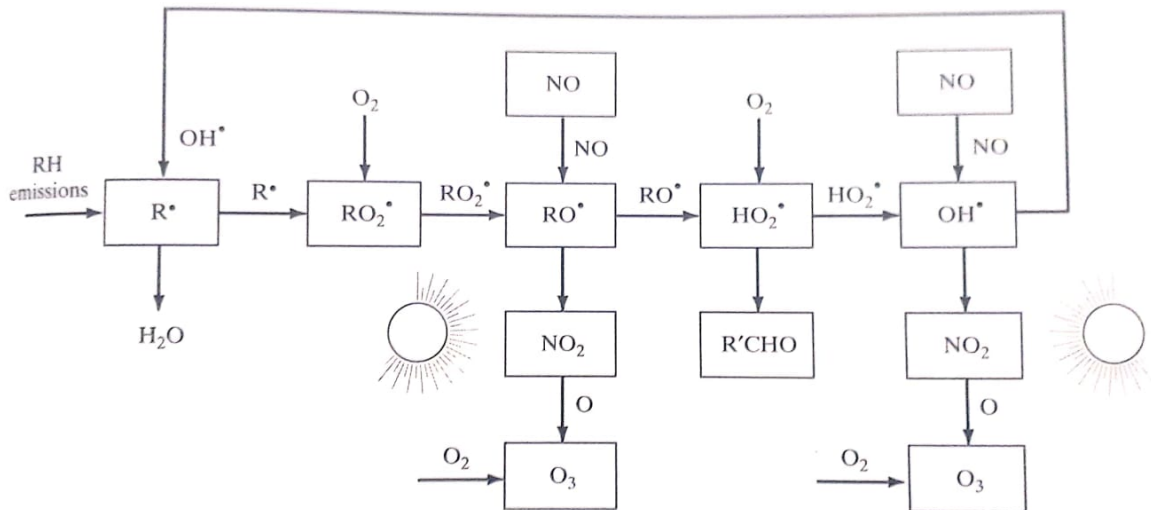


Figura 3: Ciclo de formación de Ozono a partir de la degradación de hidrocarburos.

concentraciones empiezan a decrecer, hasta final de la tarde, cuando crecen de nuevo por la vuelta a casa de los trabajadores. En este caso, sin embargo, al no haber suficiente luz solar, ya no se forma más ozono y su concentración sigue disminuyendo. Todo esto se observa en la *Figura 4*.

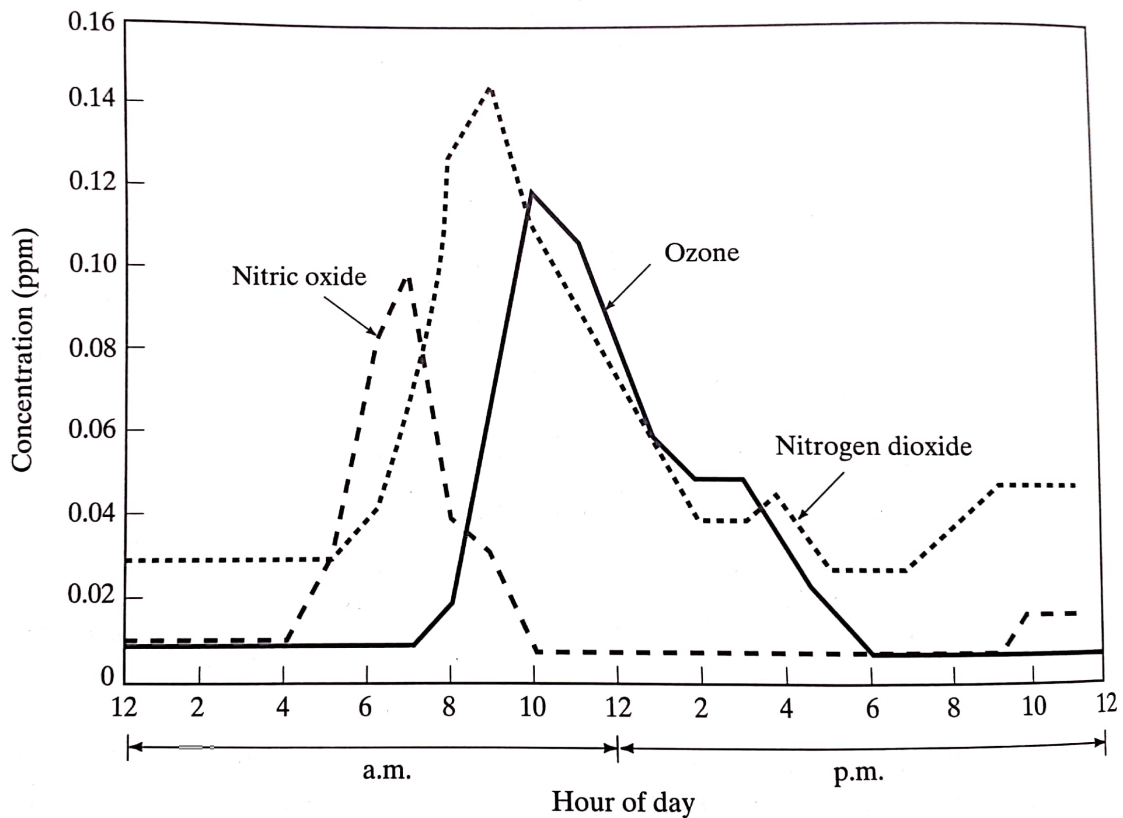


Figura 4: Variación diurna de las concentraciones de  $NO$ ,  $NO_2$  y  $O_3$  en Los Angeles el 19 de julio de 1965. (Fuente: U.S. HEW, 1970)

En cuanto a los daños en la salud que puede provocar el ozono, estudios en animales sugieren que

exposiciones continuadas al  $O_3$  pueden conllevar desgaste permanente en el tejido pulmonar, pérdida de funcionalidad pulmonar y reducción de la elasticidad de los pulmones. Estas afecciones son más pronunciadas en personas con problemas respiratorios previos (como asma) y en niños.

También se ha visto que causa daños en el follaje de los árboles y reduce su tasa de crecimiento. Por ello, se piensa que el ozono es el responsable de casi la totalidad de los daños que la contaminación del aire produce en la agricultura.

#### 2.4.1. Determinación de ozono por absorción ultravioleta

A pesar de haber muchos métodos de medida de la concentración del  $O_3$ , el más eficaz hasta la fecha es el basado en la absorción de la radiación ultravioleta por las moléculas de ozono.

Si se trabaja con radiación ultravioleta en torno a los 250 nm (banda de Hartley y Huggins) y, si la distancia entre la fuente de radiación y el detector es constante, se puede emplear la ley de Lambert-Beer (ecuación 2) para obtener la concentración de  $O_3$  en la muestra de aire al comparar la intensidad incidente y la de salida (que será menor debido a la absorción de la radiación).

El proceso de medida inicia con la muestra de aire pasando por un filtro para evitar acumulación de partículas. A continuación, el aire se bifurca: a la muestra que atraviesa el primer canal se le elimina el ozono que contiene por medio de un catalizador (en particular óxido de molibdeno). De esta forma, este aire sin ozono se usa como patrón en la celda de referencia. Por el segundo canal pasa el aire con ozono hacia la celda de medida.

Ambas celdas son irradiadas con luz ultravioleta de 253,7 nm y, viendo las intensidades de salida por cada celda utilizando un fotomultiplicador, puede calcularse la absorción debida al ozono. Un circuito electrónico resuelve la ecuación de Lambert-Beer, obteniéndose la concentración de  $O_3$ .

#### 2.5. Partículas en suspensión y $PM_{10}$

Se denominan partículas en suspensión a cualquier tipo de materia dispersada, ya sea sólida o líquida, cuyas partes individuales abarcan un diámetro de entre 0,005  $\mu m$  y 100  $\mu m$ . Por tanto, son una categoría muy amplia y variada, tamaños, concentraciones y comportamientos químicos distintos entre sí.

Aunque las partículas puedan tener formas muy irregulares, se suele describir su tamaño con el llamado *diámetro aerodinámico*, que se define como aquel diámetro que tendría una partícula esférica de densidad 1  $g/cm^3$  que se mantiene en el aire con la misma velocidad que la partícula en cuestión. Esta velocidad se denomina velocidad de sedimentación, y se calcula a partir de la ley de Stokes simplificada, igualando fuerzas de arrastre y gravitatorias. Así, se llega a la siguiente expresión, válida para partículas de tamaño inferior a unos 30  $\mu m$ :

$$v = \frac{d_a^2 \rho_0 g}{18\eta} \quad (14)$$

Donde  $d_a$  es el diámetro aerodinámico en gramos,  $\rho_0$  es la densidad del agua en  $g/m^3$ ,  $g$  es la aceleración gravitatoria en  $m/s^2$  y  $\eta$  es la viscosidad del aire ( $0,0172 g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ).

Otro parámetro de interés en cuanto al estudio de las partículas en suspensión es el tiempo de residencia, simbolizado con la letra  $\tau$ . Esta magnitud hace referencia al tiempo estimado que permanece una especie en la atmósfera. Para calcularla puede usarse un modelo sencillo en el que consideramos

una caja de atmósfera de altura  $h$  que contiene  $N$  partículas de la sustancia estudiada. Así:

$$\tau = \frac{N}{R} \quad (15)$$

Donde  $R$  es la tasa de eliminación de partículas, que es el ritmo al que se van depositando las partículas:

$$R = \frac{N v}{h} \quad (16)$$

Así,

$$\tau = \frac{N}{(Nv/h)} = \frac{h}{v} \quad (17)$$

Por ejemplo, para una partícula de  $2 \mu\text{m}$  de diámetro, su velocidad de sedimentación es de medio metro por hora y su tiempo de residencia, de unos 3 meses. Por ello, es importante llevar un seguimiento de las concentraciones de partículas en suspensión, pues pueden suponer un riesgo para la salud durante mucho tiempo.

El tamaño de las partículas es muy importante a la hora de tener en cuenta sus efectos en la salud humana. Las partículas de un tamaño superior a los  $10 \mu\text{m}$  son fácilmente eliminadas del sistema respiratorio por medio de los pelos y la piel de las fosas nasales y, en caso de atravesar esta parte, las partículas son atrapadas por el mucus de la zona traqueal y eliminadas al tragar o al escupir en forma de moco.

Sin embargo, las partículas inferiores a los  $10 \mu\text{m}$  pueden alcanzar fácilmente la zona inferior del sistema respiratorio (bronquios y pulmones); aunque si son demasiado pequeñas, tienden a salir del sistema respiratorio a través de la propia exhalación. Así, son las partículas de entre  $0,5$  y  $10 \mu\text{m}$  las que suponen mayores peligros, pues pueden depositarse con mayor facilidad en la zona pulmonar. De esta forma, en 1987 se introdujo el estándar de las partículas en suspensión de tamaño inferior a  $10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) y, 10 años más tarde, el de las  $\text{PM}_{2,5}$ .

Los mayores emisores de  $\text{PM}_{10}$  en zonas urbanas suelen venir de las actividades industriales, quema de combustibles y la industria del transporte, aunque con los años se ha reducido de forma importante las emisiones de estos últimos. En España en particular, no son extrañas las entradas de polvo procedente del norte de África, que provocan aumentos sustanciales en las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  durante algunos días del año.

Las partículas en suspensión que suelen provocar la mayoría de problemas de salud son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH por sus siglas en inglés). Dentro de estos, el más peligroso es el benzo(a)pireno, producido por la combustión incompleta de materias orgánicas, especialmente combustibles fósiles y tabaco, y es conocido por causar cáncer de pulmón y riñón.

En general, la exposición prolongada a las partículas en suspensión agravan los problemas respiratorios y cardiovasculares, y dañan el tejido pulmonar. Como hemos mencionado, algunos son, además, cancerígenos. Por ello, los periodos con altas concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  suelen ir acompañadas de un aumento en las hospitalizaciones por infecciones respiratorias, problemas cardíacos, bronquitis, asma y neumonía. Todo esto ha llevado a ir endureciendo las concentraciones límite de partículas en suspensión al cabo de los años. Actualmente, en Zaragoza, la concentración límite de  $\text{PM}_{10}$  se sitúa en los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 2.5.1. Determinación de partículas en suspensión $PM_{10}$ por atenuación de la radiación $\beta$

Se denomina  $PM_{10}$  a las partículas en suspensión cuyo diámetro aerodinámico es menor a  $10 \mu m$ . La medida de su concentración se basa en la absorción parcial de la radiación  $\beta$  (procedente de una fuente estable) al interactuar con las partículas en suspensión retenidas en papel de fibra de vidrio.

En general, la expresión que permite estudiar la absorción  $\beta$  en un material viene dada por:

$$N = N_0 e^{-k\mu} \quad (18)$$

Donde  $N$  y  $N_0$  es el número de impulsos registrados por el contador Geiger utilizado en el aparato de medida;  $k$  es la constante física que caracteriza al equipo de medida; y  $\mu$  es el coeficiente de atenuación lineal de la radiación  $\beta$ , que es una medida de la probabilidad de interacción de la partícula  $\beta$  con las  $PM_{10}$ .

De esta ecuación se deriva la que se utiliza directamente para calcular la masa  $m$  de  $PM_{10}$  retenida en el papel de fibra de vidrio:

$$m = \frac{A}{k} (\ln N_0 - \ln N) \quad (19)$$

Donde el cociente entre  $A$  y  $k$  se denomina coeficiente total de atenuación, que es independiente de las partículas estudiadas.

El proceso para calcular la concentración de partículas en suspensión parte del filtrado de la muestra de aire a estudiar, haciéndola pasar a través del papel de fibra de vidrio mencionado anteriormente. Por medio de un sistema automatizado que repite todo este proceso en intervalos determinados de tiempo, la muestra en papel de fibra se coloca en el aparato de medida, entre la fuente de radiación  $\beta$  y el contador Geiger. Así, conociendo los pulsos cuando el filtro estaba limpio y los pulsos obtenidos al exponer la muestra, se puede calcular fácilmente la masa de  $PM_{10}$ . Dividiendo esta por el volumen de la muestra de aire, se obtiene la concentración de partículas en suspensión.

El calibrado de este sistema consiste, para las medidas con partículas, en interponer entre la fuente y el contador un material cuyo coeficiente de absorción es conocido. Para calibrar el cero (sin partículas), se utiliza aire puro, libre de partículas y de la radiación natural contenida en el aire ambiente.

## 2.6. Óxidos de azufre

En muchas regiones del mundo (como la zona oriental de Estados Unidos), los óxidos de azufre, en especial el dióxido de azufre  $SO_2$ , son los contaminantes que más predominan a día de hoy, pese a haberse reducido drásticamente su concentración en los últimos 30 años.

La mayor parte del azufre procede de la quema de combustibles fósiles en plantas de generación de energía, siendo el carbón el que mayor azufre contiene (entre un 1 y un 6%). De este porcentaje, la mitad puede eliminarse al pulverizar y limpiar el carbón. En el resto de combustibles la cantidad de azufre es muy pequeña, sobre todo en el gas natural una vez tratado y extraído el ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) que contiene.

Cuando se queman estos combustibles, se libera azufre, principalmente en forma de  $SO_2$  pero también en forma de trióxido de azufre ( $SO_3$ ). Por medio del radical hidroxilo, el  $SO_2$  puede formar  $SO_3$ , el cual reacciona rápidamente con el agua para dar lugar al ácido sulfúrico, que es la principal causa de la lluvia

ácida:



Las moléculas de ácido sulfúrico se convierten rápidamente en partículas por condensación en el aire o unidas al vapor de agua en forma de gotas. Una fracción importante de las partículas en suspensión en la atmósfera la conforman estos aerosoles de sulfatos  $SO_4$ . Así, el azufre emitido puede volver a depositarse de forma seca (sin precipitación) o de forma húmeda (por medio de precipitación). Si es depositado de esta última forma, se habla de lluvia ácida cuando el PH de dicha agua es inferior a 5,0.

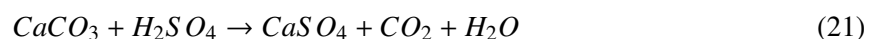
La mayor parte de las partículas de sulfato en el aire urbano tienen un tamaño de entre 0,2 y 0,9  $\mu m$ . Al ser este tamaño comparable al de la longitud de onda de la luz visible, su presencia afecta a la visibilidad.

Por otro lado, el  $SO_2$  es muy soluble en agua, lo que permite a las vías húmedas del aparato respiratorio superior absorber gran parte de este. Sin embargo, cuando se encuentra en forma de aerosol ( $SO_4$ ), su pequeño tamaño le permite alcanzar la parte más interna de los pulmones. Es la combinación de ambos,  $SO_2$  y  $SO_4$ , lo realmente peligroso para las personas, reduciendo el rendimiento pulmonar. Aun así, se requieren grandes concentraciones de  $SO_2$  para dañar la salud, siendo sus efectos, normalmente, solo temporales [8].

Debido a ello, el  $SO_2$  es el contaminante que puede encontrarse en mayor concentración sin que se den avisos por riesgo de salud. En particular, la Red de Calidad del aire de Zaragoza no emite avisos por alta acumulación de  $SO_2$  cuando su concentración está por debajo de los  $350 \mu g/m^3$ .

Los óxidos de azufre también pueden dañar a los árboles (especialmente en entornos húmedos con bajo nivel de PH), así como a las plantas, reduciendo su capacidad de absorber nutrientes. Estos contaminantes también producen el decoloramiento de la pintura, corroen metales y debilitan las fibras orgánicas (como el algodón).

Las exposiciones prolongadas a aire con altas concentraciones de sulfatos produce el deterioramiento de materiales como el mármol y la caliza al sustituirse los carbonatos que lo conforman por sulfatos:



Dando lugar a sulfato de calcio, que es soluble en agua y, por tanto, fácilmente erosionable. Esto ha provocado que algunos monumentos históricos hayan tenido que ser trasladados a entornos aclimatados para evitar su deterioro.

### 2.6.1. Determinación del $SO_2$ por fluorescencia ultravioleta

Cuando sobre una muestra de aire se incide con luz ultravioleta de la banda de los 216  $nm$ , esta es absorbida por el dióxido de azufre que se encuentra en dicha muestra, produciéndose la excitación de los niveles electrónicos de la molécula. Tras un breve periodo de tiempo (entre  $10^{-8}$  y  $10^{-4}$  segundos), la molécula se desexcita, emitiendo radiación ultravioleta de 350  $nm$ .

Para poder determinar la concentración del  $SO_2$  se utiliza un aparato de medida que consiste en lo siguiente:

El aire que entra a la cavidad por el tubo de aspiración es separado de impurezas en forma de partícu-

las, y se filtran distintas sustancias como el  $\text{H}_2\text{S}$  y los hidrocarburos.

A continuación, la radiación ultravioleta de, habitualmente, una lámpara de xenón, pasa a través de un filtro óptico de banda estrecha de alrededor 210 nm a una cámara de reacción donde se encuentran las moléculas de  $\text{SO}_2$  de la muestra, que absorberán la radiación y reemitirán en forma de fluorescencia ultravioleta. Esta pasa a través de un segundo filtro óptico de banda estrecha (350 nm) e ilumina la superficie de un fotomultiplicador, que producirá una señal en forma de corriente eléctrica proporcional al número de moléculas de  $\text{SO}_2$  que han sido excitadas. Esto, a su vez, es proporcional a la concentración de  $\text{SO}_2$  que había en la cámara de reacción.

A través de la ley de Lambert-Beer y comparando con unas concentraciones patrón (debidamente calibradas), se puede obtener la concentración de  $\text{SO}_2$  en la muestra de aire entrante.



### 3. Red de Calidad del Gobierno de Aragón (RCGA)

La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), con sede en Copenhague, es la encargada de implementar y evaluar las políticas medioambientales que se originan en los países miembros de la Unión Europea (aunque hay países no pertenecientes que también participan). Por tanto, es la AEMA el organismo encargado de proporcionar la información relacionada con el medio ambiente y, por tanto, de la ligada a la calidad del aire.

Para clasificar y facilitar la información sobre el estado en el que se encuentra el aire, se utiliza el Índice de Calidad del Aire (ICA), que sigue las directrices del Índice de Calidad del Aire Europeo aplicado en 2017 por la AEMA y la Comisión Europea.

El índice establece seis niveles de calidad del aire: Buena, Razonablemente Buena, Regular, Desfavorable, Muy Desfavorable y Extremadamente Desfavorable. Cada uno de estos niveles tiene asociado un color en función de la concentración de la sustancia medida, particular de cada una de ellas. El ICA puede consultarse para las distintas estaciones afiliadas a la AEMA desde su página web [9], actualizándose cada hora a medida que se toman los datos en dichas estaciones. Actualmente, el ICA también incorpora recomendaciones sanitarias tanto para el público general como para la población de riesgo.

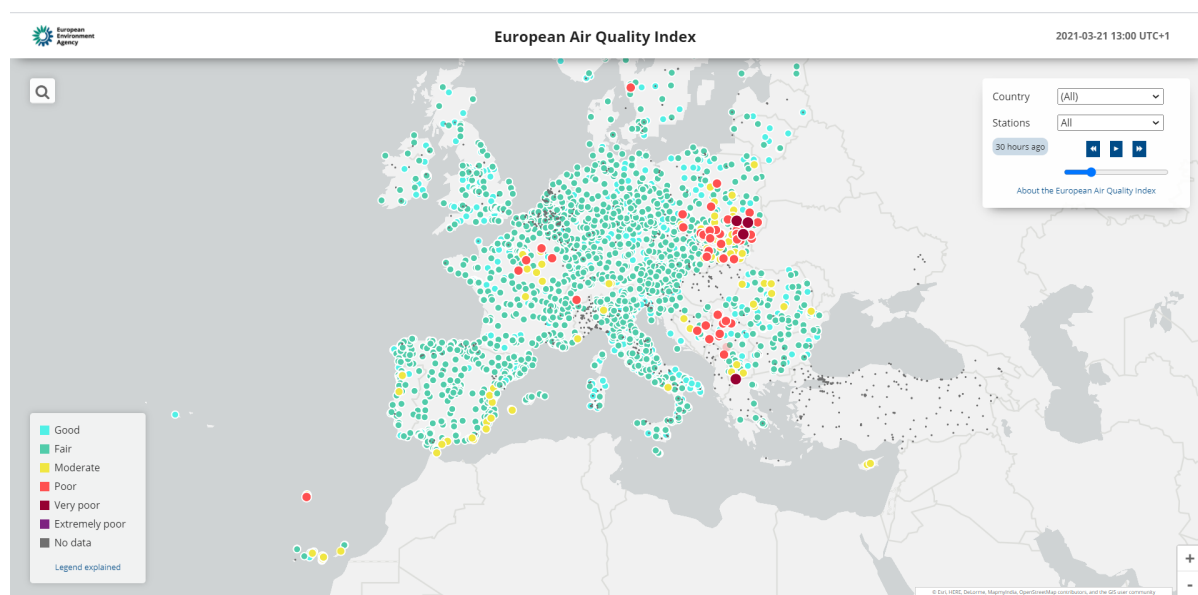


Figura 5: Mapa del índice de calidad del aire en Europa para el mediodía del 21 de marzo de 2021

Un simple vistazo al panorama general europeo deja ver cómo es la parte oriental de Europa, y sobre todo Polonia, la zona en la que menos se cumplen las normativas de calidad mínima del aire. De hecho, de acuerdo al informe de la Organización Mundial de la Salud de 2016, de las 50 ciudades con mayor contaminación, 33 se encontraron en Polonia. Esto se debe a la gran dependencia que tiene el país en la generación energética industrial basada en carbón.

Dentro de los cientos de estaciones que monitorizan las concentraciones de los gases contaminantes principales en Europa, se encuentra la Red de Calidad del Gobierno de Aragón (RCGA), la cual está conformada por las estaciones de Torrelisa, Huesca y Monzón centro en la provincia de Huesca; las estaciones de Bujaraloz y Alagón en la provincia de Zaragoza; y la estación de Teruel, en la provincia homónima.

Además de estas, la Red dispone también de dos unidades móviles, que miden óxidos de nitrógeno, O<sub>3</sub> y, en el caso de una de ellas, SO<sub>2</sub>. También disponen de dos captadores gravimétricos, situados en Alcañiz y en Sariñena, que miden las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>.

Para el caso de la RCGA, el ICA se calcula con los datos en tiempo real ofrecidos por las distintas estaciones de medida, y tiene en cuenta las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y SO<sub>2</sub>. Para el NO<sub>2</sub> y el SO<sub>2</sub>, se miden las concentraciones horarias, mientras que para el ozono, lo que se hace es calcular la media móvil de las concentraciones de las últimas 8 horas. Para las partículas en suspensión, los captadores, al utilizar como método de medida el gravimétrico, solo proporcionan datos diarios en lugar de horarios.

En la figura 6 se recogen los rangos de concentraciones que marcan cada nivel de calidad del aire, siguiendo las directrices de la AEMA y la comisión europea.

SO <sub>2</sub>		PM <sub>2,5</sub>		PM <sub>10</sub>		O <sub>3</sub>		NO <sub>2</sub>		CATEGORÍA DEL ÍNDICE
0	100	0	10	0	20	0	50	0	40	BUENA
101	200	11	20	21	40	51	100	41	90	RAZONABLEMENTE BUENA
201	350	21	25	41	50	101	130	91	120	REGULAR
351	500	26	50	51	100	131	240	121	230	DESFAVORABLE
501	750	51	75	101	150	241	380	231	340	MUY DESFAVORABLE
751-1250		76-800		151-1200		381-800		341-1000		EXTREMADAMENTE DESFAVORABLE
SIN DATOS ACTUALIZADOS										

Figura 6: Categorías sobre el índice de calidad del aire según las concentraciones (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de cada contaminante

Estas categorías vienen acompañadas de recomendaciones sanitarias para el público general y para los grupos de riesgo, que son los siguientes:

- Buena y Razonablemente Buena: la contaminación no supone ningún tipo de riesgo para el público general ni para los grupos de riesgo
- Regular: la contaminación no supone ningún riesgo para el público general pero se recomienda a los grupos de riesgo que consideren reducir las actividades intensas en exteriores en caso de notar síntomas.
- Desfavorable: para el público general, se recomienda reducir las actividades intensas en exteriores en caso de notar síntomas como picor de ojos o de garganta y tos. Para el público sensible, se recomienda reducir las actividades físicas en exteriores en caso de notar síntomas.
- Muy Desfavorable: para el público general, se recomienda que consideren reducir las actividades físicas en exteriores en caso de notar los síntomas descritos anteriormente. Para los grupos de riesgo, se recomienda evitar actividades físicas, especialmente fuera de casa, en caso de notar síntomas.
- Extremadamente Desfavorable: a la población general se le recomienda que consideren reducir la actividad física en exteriores, mientras que a los grupos de riesgo se les recomienda evitar cualquier tipo de actividad física en exterior.

A continuación, vamos a ver en más detalle los contaminantes que se registran en cada una de estas estaciones pues, mientras que hay algunas especies que son medidas en todas ellas, hay algunas excepciones. Además, analizaremos alguna de las gráficas e información extra que ofrece la propia web de la RCGA..

### 3.1. Huesca

La estación de Huesca, que se encuentra en la calle Torre Mendoza, mide las concentraciones de  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO$ , óxidos de nitrógeno totales ( $NO_X$ ) y  $SO_2$ . De estas, el ozono y los óxidos de nitrógeno ( $NO$ ,  $NO_2$  y  $NO_X$ ) son medidos por todas las estaciones de calidad del aire de la red de Aragón. Vamos a tomar un ejemplo de los datos que ofrece la página web de la RCGA [10] en la estación de Huesca, fijándonos en la figura 7, donde se muestran las concentraciones de las especies mencionadas.

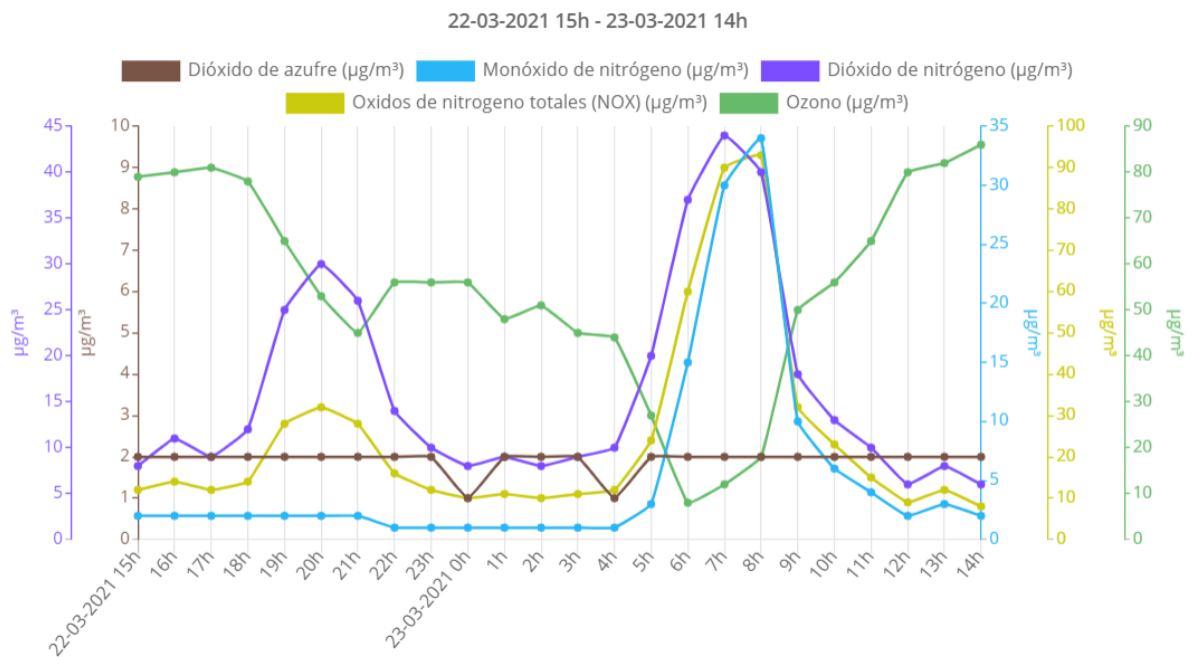


Figura 7: Concentraciones de  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO$ ,  $NO_X$  y  $SO_2$  medidas en la estación de Huesca entre el 22 y el 23 de marzo de 2021

Esta gráfica es muy ilustrativa, ya que nos permite confirmar el ciclo típico del ozono, junto al  $NO$  y  $NO_2$ , del que hablamos en la sección 2.4.

Comenzando desde las 18 horas del 22 de marzo, vemos un incremento en la concentración de dióxido de nitrógeno que alcanza su máximo al final de la tarde, momento del día en el que la circulación de vehículos es importante al terminarse muchos turnos de trabajo. El óxido de nitrógeno tiene niveles muy bajos, debido a que la presencia de ozono hace que tenga lugar la reacción dada por la ecuación (8). La concentración de ozono, por su parte, comienza a disminuir con la pérdida de luz solar, aguantando durante unas horas con el incremento del  $NO_2$ .

Ahora vamos a fijarnos en las primeras horas de la mañana del día 23. Desde primera hora, cuando la mayor parte de los servicios comienzan su jornada, comienza a aumentar las concentraciones de monóxido y dióxido de nitrógeno. Cuando amanece, en torno a las 7 horas, la luz solar permite el inicio del ciclo del ozono, de manera que su concentración aumenta rápidamente, con la correspondiente dis-

minución del NO, que reacciona muy eficientemente con el O<sub>3</sub>.

Por su parte, la concentración de dióxido de azufre apenas varía a lo largo del día y se mantiene en niveles muy bajos, ya que este gas se produce sobre todo en centrales de quema de combustibles fósiles y en Huesca destacan las centrales hidroeléctricas y eólicas.

Respecto al ICA, a las 14 horas del 23 de marzo y comparando con la figura 6, se tiene que la calidad del aire era razonablemente buena, ya que el ozono (cuya concentración era de 86  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) estaba en el rango de 51-100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En estas condiciones, por tanto, la contaminación no suponía ningún riesgo para la salud.

La página European Air Quality Index [9], permite conocer la categoría del ICA de los últimos 365 días, lo que da una idea de la calidad general del aire de un territorio. En este caso, en Huesca se tuvo que en dicho periodo de tiempo, el 8,8 % de los días la calidad del aire no sobrepasó la categoría Bueno; el 72,7 % de los días no sobrepasó la categoría Razonablemente Buena; y el 18,5 % de días restantes, la calidad del aire alcanzó la categoría Regular. La causa más frecuente de contaminación en Huesca (y en la mayor parte de Aragón) es el ozono, que como vimos en la sección 2.4, es la especie contaminante más abundante y por el cual se comenzaron a realizar estándares de calidad del aire.

### 3.2. Torrelisa

La estación de Torrelisa, situada en una colina cercana a la localidad, mide las concentraciones de las mismas especies que la estación de Huesca, es decir, O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>. A diferencia que en la estación de Huesca, la de Torrelisa se encuentra en un entorno rural, de poco tránsito automovilístico. Debido a ello, como se ve en la figura 8, las concentraciones de óxidos de nitrógeno son considerablemente inferiores, mientras que la concentración de ozono en la zona suele mantener niveles similares a los vistos en Huesca.

De nuevo, observando los datos de los últimos 365 días, se tiene que solo el 5,9 % de los días, la calidad del aire fue Buena, el 72,9 % fue Razonablemente Buena, el 20,6 % fue Regular y hubo dos días en los que la calidad del aire alcanzó una categoría mayor. Uno de ellos se alcanzó la categoría Desfavorable y otro alcanzó la de Muy Desfavorable. En general, todo ello debido a altas concentraciones de O<sub>3</sub>. A las 15 horas del 23 de marzo de 2021, como se aprecia en la figura 8, los niveles de ozono correspondían con la categoría Razonablemente Buena, la más frecuente en Torrelisa.

### 3.3. Monzón Centro

La estación de Monzón Centro, situada al final de la calle Nuestra Señora de la Carrodilla, se encarga de medir las concentraciones de los gases ya mencionados en el entorno urbano de Monzón. Debido a ello, los ciclos de aumento en los niveles de ozono son similares a los vistos en Huesca, con incrementos a primera hora de la mañana y a última hora de la tarde.

Esta estación midió ICA's de categoría máxima Buena el 25,4 % de los últimos 365 días, de categoría Razonablemente Buena el 71,5 % de dichos días, y de categoría Regular el 3,1 % de días restantes, siendo, en promedio, la estación de Huesca provincia con mejor calidad del aire en este periodo. De nuevo, esta contaminación se debe, casi siempre, al ozono troposférico.

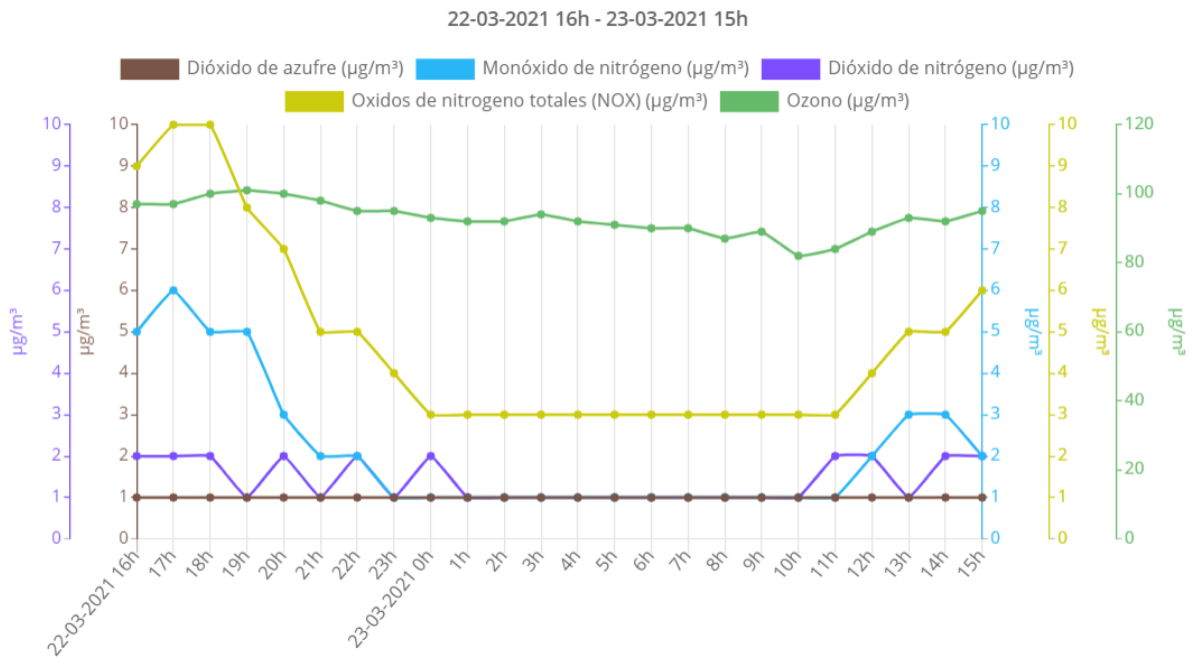


Figura 8: Concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> medidas en la estación de Torre Elisa entre el 22 y el 23 de marzo de 2021

### 3.4. Bujaraloz

La estación de Bujaraloz, en la provincia de Zaragoza, se encuentra cerca de la entrada a la localidad, en un entorno rural. A diferencia de las estaciones oscenses, en esta se miden las concentraciones de O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, y no del dióxido de azufre. Al ser una zona de transición media, las concentraciones de los óxidos de nitrógeno y ozono son parecidas a las vistas en Huesca y en Monzón Centro, pero de menor intensidad.

En cuanto al ICA, el 19,3 % de los últimos 365 días, la calidad del aire mantuvo la categoría Buena; el 63,4 % de estos alcanzó la categoría Razonablemente Buena; el 17 % llegó a categoría Regular y hubo solo un día en el que se tuvo una calidad del aire Pobre. Como es habitual en esta región, el ozono es el principal gas contaminante.

### 3.5. Alagón

En el área suburbana (en la autovía del Ebro) de la localidad de Alagón, Zaragoza, se encuentra la estación de medición de gases contaminantes de la zona. Es la única de las estaciones fijas de la Red de Aragón que mide la concentración de monóxido de carbono (CO). Al encontrarse la estación en una autovía, la densidad de tráfico es importante, por lo que, como se ve en la figura 9, las concentraciones de óxidos de nitrógeno son importantes, siendo en ocasiones la especie protagonista a la hora de calcular el índice de calidad del aire.

De acuerdo a los datos recopilados en la European Air Quality Index, de los últimos 365 días, el 14,5 % la categoría del ICA fue Buena, el 77,8 % fue Razonablemente Buena y el 7,4 % de las veces fue Regular. Además, hubo un día que la contaminación alcanzó la categoría de Muy Desfavorable.

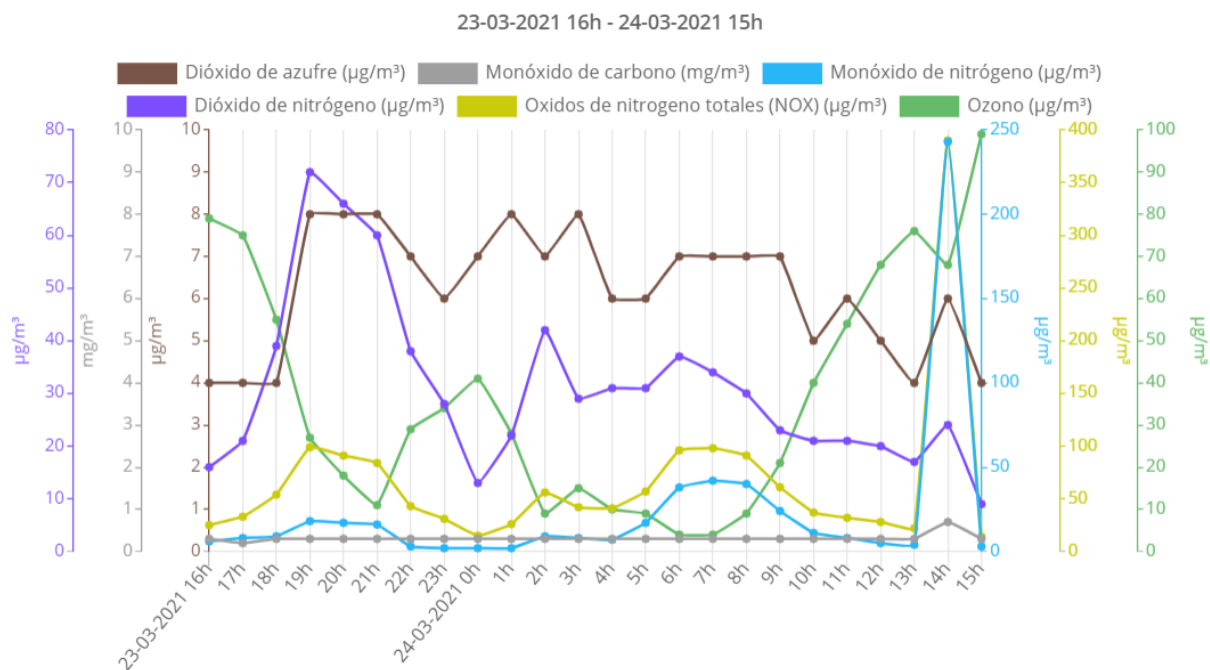


Figura 9: Concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y CO medidas en la estación de Alagón entre el 23 y el 24 de marzo de 2021

### 3.6. Teruel

La estación de Teruel se encuentra en la Calle Magisterio, dentro de la ciudad, por lo que está localizada en un área urbana, siguiendo los ciclos típicos observados en la estación de Huesca (figura 7).

De los últimos 365 días, el ICA de la estación ha tenido un 7,9 % de días con categoría Buena, un 68 % con categoría Razonablemente Buena, un 23,2 % con categoría Regular y un 0,80 % (3 días) con categoría Desfavorable, con el ozono como principal responsable.

## **4. Red de Calidad del Aire de Zaragoza**

Dentro de Aragón, aunque fuera de la RCGA, se encuentra la Red de Calidad del Aire de Zaragoza, formada por ocho estaciones remotas situadas estratégicamente en varios puntos de la ciudad, y que está ligada al propio Ayuntamiento de Zaragoza. Aun así, sigue las directrices de la Comisión Europea y de la AEMA sobre inmisión atmosférica, por lo que las categorías del ICA respetan los mismos rangos que los que aparecen en la figura 6, y las concentraciones se muestran al igual que para la Red aragonesa: concentraciones horarias para  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$ , media móvil de las últimas 8 horas para el ozono, y media móvil de las últimas 24 horas para las especies particuladas.

Desde 2007, la Red cuenta con el Sistema de Predicción de la Contaminación Atmosférica de Zaragoza (PRECOZ), desarrollado por el Centro de Investigación de Energías Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT), que permite predecir la calidad del aire. En particular, permite predecir los niveles de inmisión para los contaminantes  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  y  $\text{PM}_{10}$  para las 12, 24, 36 y 48 horas posteriores a la predicción, con lo que se pueden evitar episodios de contaminación. Actualmente, se está trabajando en el desarrollo del sistema PRECOZ 2.0, que permitirá obtener información de contaminantes como el ozono y el  $\text{NO}_2$ , además de tener una mayor resolución que los mapas generados actualmente.

Desde el portal de Medioambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza [11], en la sección de Calidad del Aire, se puede revisar la calidad actual del aire en cada una de las estaciones de la ciudad, con las concentraciones de cada una de las especies medidas en la última hora, el ICA y avisos emitidos por la Red en caso de alcanzarse o superarse la categoría Desfavorable con el fin de proteger a la población.

A continuación, vamos a analizar someramente cada una de las estaciones con las que cuenta la Red al igual que hicimos con las de la RCGA en el apartado 3.

### **4.1. Estación de Las Fuentes**

La estación de Las Fuentes se encuentra en el IES Francisco Grande Covián, en la calle María de Aragón, en el barrio de Las Fuentes. Por tanto, se encuentra en una zona urbana con un nivel medio de tráfico.

Esta estación mide las concentraciones de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{PM}_{10}$ , siendo el ozono el que, en promedio, más problemas de contaminación produce al año. Según el índice de calidad del aire europeo, en el último año se tuvieron 4 días con una calidad de categoría Desfavorable, 81 de calidad Regular, 235 de calidad Razonablemente Buena y 36 de calidad Buena. Estos datos, así como el de las demás estaciones, quedan recogidos en la figura 10.

### **4.2. Estación de Renovales**

La estación de Renovales se encuentra en el Parque Grande José Antonio Labordeta, en la cara que da al Paseo Mariano Renovales, en el barrio de la Romareda, de manera que mide el aire de un área urbana con un tráfico moderado.

La estación de Renovales es capaz de medir las concentraciones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub>, CO y PM<sub>10</sub> y es la única que además puede medir las de PM<sub>2,5</sub>, siendo las partículas en suspensión las que más contaminación producen, posiblemente debido a que la estación se encuentra dentro de un parque con gran densidad de vegetación, que emitirían una alta cantidad de partículas como el polen. De hecho, es en la estación de Renovales donde se ha llegado un mayor número de veces la categoría Desfavorable en cuanto a calidad del aire en el último año. En concreto, en los últimos 365 días, esta categoría se ha alcanzado en 21 días distintos. La categoría Regular se alcanzó 67 días, la Razonablemente Buena 243 días y la categoría Buena tan solo 25 días.

### **4.3. Estación Centro**

La estación Centro se sitúa en la Plaza Aragón, en la zona centro de Zaragoza, de ahí su nombre. Al estar pegada a Vía Independencia, la densidad de tráfico es alta y, por tanto, los niveles de NO<sub>2</sub> y por extensión los de ozono, serán los gases presentes en mayor concentración.

Esta estación mide las concentraciones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub>, CO y, a pesar de encontrarse en una zona de alto tráfico, no tiene unos niveles tan altos de contaminación como en la zona de la estación de Renovales. Solo hubo un día en el que se alcanzó la categoría Desfavorable, que fue debido al NO<sub>2</sub>. También hubo 40 días en los que se alcanzó la categoría Regular, 261 con categoría Razonablemente Buena, y 49 con categoría Buena.

### **4.4. Estación de El Picarral**

La estación del Picarral, en el barrio homónimo, se encuentra en la Avenida San Juan de la Peña 126, muy cerca de la fábrica de papel de Saica Paper, en zona urbana y de tráfico importante.

Las sustancias contaminantes que se miden en esta estación son el NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub>, CO, PM<sub>10</sub> y SH<sub>2</sub>. El ácido sulfhídrico, más conocido por ser el gas que huele a huevos podridos, es una de las emisiones que más destaca respecto al resto debido a la industria del papel, y es por ello que la estación cuenta con detectores propios para la medición de este gas. Sin embargo, es el NO<sub>2</sub> el culpable de que en el último año se hayan alcanzado en la estación la categoría de calidad del aire Desfavorable. En particular, esto ocurrió en 4 ocasiones, mientras que la categoría Regular se tuvo en 37 días distintos (casi todos debido al SH<sub>2</sub>), la Razonablemente Buena en 263 días, y los 49 días restantes se tuvo una calidad Buena.

### **4.5. Estación de Avenida Soria**

La estación de Avenida Soria, como su nombre indica, se sitúa en las proximidades de dicha avenida, en el Centro de Arte y Tecnología ETOPIA, cerca de la estación Delicias en el barrio de la Almuzara. Se encuentra, por tanto, en una zona suburbana con una alta densidad de tráfico. A pesar de ello, es de las estaciones que mejores condiciones de calidad del aire registra. En el último año, de hecho, solo se alcanzó la categoría Desfavorable un día, 55 días se alcanzó la de Regular, 257 la de Razonablemente Buena, y los 43 días restantes, la de Buena. Al haber mucho tráfico, las concentraciones elevadas son debidas al NO<sub>2</sub> y al ozono, aunque al encontrarse en una zona suburbana con grandes espacios abiertos, el viento tiende a reciclar rápidamente el aire la contaminación no es tan alta. Además de estos gases, la estación también registra las concentraciones de NO, CO, SO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>.



#### **4.6. Estación de Actur**

La estación de Actur, que fue instalada hace poco más de tres años, es la más reciente de las ocho estaciones que conforman la Red de Zaragoza. Concretamente, se encuentra en la Calle Cineasta Carlos Saura, en una zona residencial del barrio Actur.

Al no estar cerca de ninguna zona de emisiones especiales, la estación registra las concentraciones de los contaminantes típicos: NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub> y PM<sub>10</sub>, siendo este último el que más contribuye a la contaminación del aire en la zona.

En el último año, hubo un día en el que se alcanzó la categoría Muy Desfavorable, 4 alcanzaron la de Desfavorable, 46 la de Regular, 273 la de Razonablemente Buena, y 32 la de Buena.

#### **4.7. Estación de Roger de Flor**

La estación Roger de Flor, llamada así por estar localizada en la calle del mismo nombre, en el barrio Delicias, está expuesta a una alta densidad de tráfico y mide las concentraciones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, CO, O<sub>3</sub> y PM<sub>10</sub>, siendo esta última la que más veces ha alcanzado niveles de categoría alta. Concretamente, en los pasados 365 días, la categoría Desfavorable se alcanzó en esta estación 11 días, la de Regular 66 días, la de Razonablemente Buena 255 días y la Buena, los restantes 24 días.

#### **4.8. Estación de Jaime Ferrán**

La estación Jaime Ferrán, localizada en la intersección entre las calles Benjamin Franklin y Jaime Ferrán, en el barrio de la Cogullada, se encuentra en una zona industrial cercana a las fábricas de papel del Picarral, por lo que incorpora medidores de SH<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub>, CO y PM<sub>10</sub>.

Favorecido por su localización, la estación Jaime Ferrán es, por mucho, la estación que recoge los peores datos en cuanto a calidad del aire. Pese a que en el European Air Quality Index no aparecen los datos debido a PM<sub>10</sub>, los registros de la propia estación [11] dejan ver que el 4 de febrero de 2021 se alcanzó la categoría Extremadamente Desfavorable, midiendo una concentración de hasta 168,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Además, en muchas otras ocasiones (al menos en 10 días distintos del último año), se alcanzó la categoría Muy Desfavorable. Tanto en esta estación como en algunas otras de las vistas (Renovales y Roger de Flor), las acumulación de PM<sub>10</sub> más grandes suelen deberse a la entrada de polvo procedente del norte de África, que sumándose a la concentración ya de por sí alta que suele haber en las zonas donde están estas estaciones, dan como resultado estas situaciones.

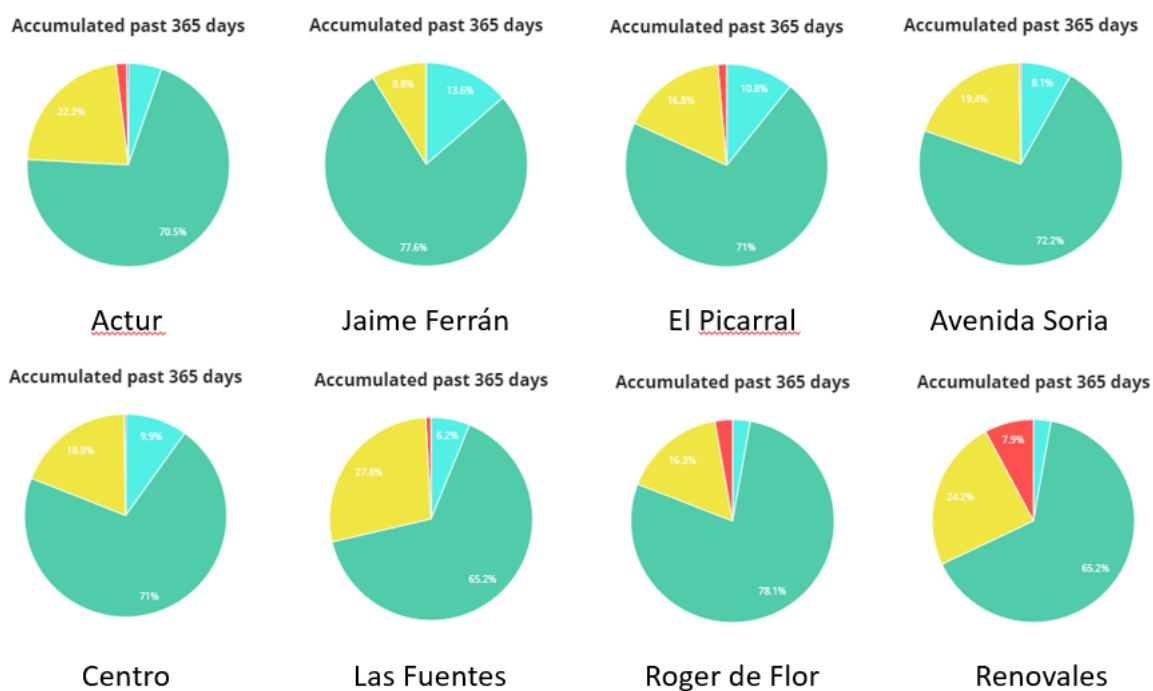


Figura 10: Resumen de los índices de calidad del aire de las estaciones de Zaragoza a día 16 de junio de 2021

## 5. Conclusión

Los problemas de la contaminación atmosférica en nuestras ciudades es uno de los principales problemas sanitarios de la actualidad, produciendo un gran número de muertes prematuras al año. Por ello, es necesario elaborar un plan de acción que mantenga la polución por debajo de niveles considerados peligrosos a largo plazo. En Europa, y tanto en Aragón como en Zaragoza en particular, se trabaja continuamente en monitorizar esta contaminación con el fin de asegurar que se cumplen las directrices marcadas por la Comisión Europea y la AEMA. De cara al futuro, se espera que el desarrollo de nuevos modelos de predicción (como el PRECOZ) y la implantación de nuevas medidas den como resultado una mayor protección frente a la polución atmosférica.

## 6. Referencias

- [1] Informe anual sobre la calidad del aire en Europa, por la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA): [Air quality in Europe - 2020 report](#).
- [2] [Los Angeles Times](#). Tony Barboza: Los Angeles suffers worst smog in almost 30 years (Publicado el 10 de septiembre de 2020).
- [3] World Health Organization Regional Office for Europe: "[WHO air quality guidelines for Europe](#)", second edition (2000). 7.1.Nitrogen dioxide
- [4] Krassi Rumchev, Helen Brown and Jeffery Spickett. "[Volatile Organic Compounds: Do they present a risk to our health?](#)" (2007)
- [5] Reinhard Oppl y Thomas Neuhaus. [Emission specifications in Europe and the US – Limit values \(TVOC, LCI, CREL, ...\) in critical discussion](#) (2008)
- [6] Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) Departament de Projectes d'Enginyeria. [ANEXO II. FORMACIÓN DE OZONO TROPOSFÉRICO Y REGÍMENES DE SENSIBILIDAD QUÍMICA](#) (2008)
- [7] Gilbert M. Masters. Introduction to Environmental Engineering and Science (Second Edition). Section 7.5: Criteria Pollutants
- [8] WHO Regional Office for Europe: [WHO air quality guidelines for Europe, second edition](#) (2000). 7.4.Sulfur dioxide
- [9] Mapa interactivo sobre calidad del aire ofrecido por la Agencia Europea de Medio Ambiente. [European Air Quality Index](#)
- [10] Estado de la Calidad del Aire en Tiempo Real en las estaciones de la Red de Calidad del Gobierno de Aragón: [Calidad del Aire en Aragón](#) (2021)
- [11] Portal de Medioambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza. [Calidad del Aire en Zaragoza](#) (2021)