



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS**

**GRADO EN GEOGRAFÍA Y
ORDENACIÓN DEL TERRITORIO**



TRABAJO FIN DE GRADO

Director: DOMINGO FERNANDO RASILLA ALVAREZ

Curso 2021/2022

**UNA APROXIMACIÓN A LAS INTRUSIONES
DE AIRE SAHARIANO EN CANTABRIA**

**AN ASSESSMENT OF SAHARAN DUST OUTBREAKS
IN CANTABRIA**

Celia Ruiz Ruiz

Febrero de 2022

ÍNDICE

Resumen / Abstract	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. La calidad del aire y la contaminación atmosférica	4
1.2. El material particulado	6
1.2.1. Clasificación del material particulado	6
1.2.2. Efectos del material particulado	7
1.3. El material particulado en la península ibérica	8
1.4. El material particulado de origen sahariano	10
1.5. Legislación ambiental	11
2. OBJETIVOS	13
3. ÁMBITO DE ESTUDIO, FUENTES Y METODOLOGÍA	14
3.1. Ámbito de estudio	14
3.2. Fuentes de información	16
3.3. Metodología	18
4. RESULTADOS	20
4.1. Caracterización del PM ₁₀ en Cantabria	20
4.1.1. Situación de Cantabria en comparación con regiones colindantes	20
4.1.2. Régimen mensual	21
4.1.3. Influencia de las condiciones atmosféricas en los niveles de PM ₁₀	23
4.2. Caracterización de las intrusiones saharianas en Niembro	26
4.2.1. Frecuencia	26
4.2.2. Relación entre intrusiones y las condiciones atmosféricas	29
4.3. Impacto de las intrusiones saharianas en Cantabria	33
4.4. Análisis y caracterización de un evento de intrusión de polvo sahariano en Cantabria	35
5. CONCLUSIONES	42
REFERENCIAS	44
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	49

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado analiza las intrusiones de aire sahariano en Cantabria y su influencia en la calidad del aire de la región. De acuerdo con la metodología sugerida por el MITECO, los datos de PM₁₀ proporcionados por la estación de Niembro (ES08), perteneciente a la red EMEP, sirvieron de base para la caracterización de las intrusiones.

Los resultados muestran una frecuencia de aproximadamente 40 días con intrusiones saharianas al año (11%), sobre todo durante los meses estivales. Los episodios más potentes ocurren bajo circulaciones sinópticas de procedencia meridiana, destacando el tipo SSE, aunque el mayor número de intrusiones es generado por situaciones anticiclónicas. La magnitud de las aportaciones diarias es moderada, pues sólo suponen incrementos a los niveles habituales de PM₁₀ en Cantabria del 6-15%, incrementos bajos en comparación con el resto de España, debido principalmente a su lejanía con el foco emisor. Esa aportación relativa es más reducida en las estaciones con mayor carga habitual de PM₁₀, como las situadas en la Bahía de Santander, y más alta en las estaciones más alejadas, pero con menor aporte antrópico, como Reinoso o Los Tojos.

Palabras clave: calidad del aire, PM₁₀, intrusión sahariana, circulación sinóptica.

ABSTRACT

This work analyzes the Saharan dust outbreaks in Cantabria and its influence upon regional air quality. The methodology of dust recognition and characterization issued by MITECO was followed using as reference station Niembro (ES08), belonging to the EMEP network.

The results show a frequency of about 40 days per year with African dust outbreaks, particularly in summertime. The most intense dust outbreaks occur under Southerly circulations, especially SSE patterns, but the most frequent occur under Anticyclonic patterns. The magnitude of the daily African dust concentrations is moderate, which only rise the normal PM₁₀ load in Cantabria about 6-15%, values lower in comparison with other Spanish regions, due to the distance to the sources of natural particles in Africa. Such relative load is lower in the most loaded stations, such those around the Bay of Santander, but higher in the farthest stations, such as Reinoso or Los Tojos.

Key Words: air quality, PM₁₀, African dust outbreaks, synoptic circulation.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. LA CALIDAD DEL AIRE Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

El desarrollo económico experimentado por el ser humano en los dos últimos siglos ha causado diferentes impactos en el medio natural, siendo uno de los más importantes la modificación de la composición de la atmósfera. Cuando la liberación de ciertas sustancias a la atmósfera acarrea un riesgo, daño o molestia grave para la salud de las personas y de los demás seres vivos, así como un ataque a materiales o incluso producción de olores desagradables, hablamos de contaminación atmosférica.

La quema masiva de combustibles fósiles para proporcionar la energía requerida para las actividades fabriles inicialmente, a la que se ha sumo la difusión del transporte privado a lo largo de la segunda mitad del siglo XX han sido responsables de graves episodios de contaminación atmosférica. El *Great Smog* en Londres en 1952 o el *Mortal Smog* en Donora (Estados Unidos, 1948) constituyen ejemplos de estos episodios, cuyas consecuencias directas fueron la propagación de enfermedades respiratorias que afectaron a la salud de miles de personas, llegando a provocar aumentos de la mortalidad (Stone, 2002). Si bien la emisión de sustancias contaminantes es su principal causa, los altos niveles de inmisión registrados, es decir, sus elevadas concentraciones en superficie estuvieron también estrechamente vinculados a unas condiciones atmosféricas específicas. Todos estos episodios coincidieron con situaciones anticiclónicas persistentes, que no sólo impidieron la dispersión horizontal (ausencia de viento) y vertical (inversiones térmicas) de los contaminantes, sino que, además favorecieron determinadas reacciones químicas. Gracias a ellas, los compuestos resultado de la quema de carbón y azufre se combinaron con la humedad atmosféricas para formar partículas de ácido sulfúrico que se almacenaron en forma de niebla (*smog*, *pea-souper*). Al disiparse ésta, el ácido se concentró y quedó adherido a las superficies (asfalto, ropa) y entró en los pulmones, causando numerosos problemas respiratorios (Zhang *et al.*, 2015).

La contaminación del aire es hoy en día uno de los más importantes factores de riesgo para la población. Aunque se han encontrado vínculos con un gran conjunto de enfermedades, afecta principalmente al sistema respiratorio (EPOC, cáncer de pulmón) y al cardiovascular (accidentes cerebrovasculares, enfermedades cardíacas). La exposición a estas sustancias también ha sido relacionada con problemas cognitivos, como puntuaciones

más bajas en los test que miden el coeficiente intelectual, así como un mayor riesgo de trastornos psiquiátricos. En todos los casos, la respuesta de los organismos individuales a la exposición a sustancias contaminantes depende del tipo de contaminante, el grado de exposición y el estado de salud y la genética del individuo (Vallero, 2008). Se estima que las pérdidas de productividad cuestan a la economía mundial aproximadamente 5 mil millones de dólares al año (World Bank, 2016); además, diferentes organismos atribuyen a la contaminación del aire alrededor de 7 millones de personas en todo el mundo cada año, constituyendo, por ello, el mayor riesgo para la salud ambiental del mundo. En 2019, el 99% de la población mundial vivía en lugares donde no se respetaban las directrices de la OMS sobre la calidad del aire; de ahí que más del 90% de las defunciones atribuidas a la contaminación atmosférica se producen en países de bajos y medianos ingresos, particularmente en Asia Sudoriental y el Pacífico Occidental (WHO, 2021). Por su parte, en el año 2019 el 94% de la población española (44 millones de personas), concentrados en el 88% del territorio nacional, respiraba aire de mala calidad, con niveles de concentración de contaminantes superiores a los recomendados (OMS, 2019).

Otros impactos de la contaminación atmosférica tienen que ver con la “lluvia ácida” originada a partir de moléculas de azufre por las combustiones con carbón y fueles. La lluvia ácida perjudica notablemente el agua, los suelos y la agricultura, además de convertirse en uno de los procesos más dañinos para la conservación del patrimonio cultural de muchos países.

Existe una gran diversidad de sustancias contaminantes en la atmósfera. De acuerdo con su forma molecular se dividen en gaseosos, líquidos, vapores y aerosoles. Los más importantes son los gaseosos y los aerosoles. Entre los primeros destacan el ozono (O_3), el metano (CH_4), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el dióxido de azufre (SO_2); la familia de los aerosoles corresponde a partículas sólidas o líquidas, tales como nieblas, polvos, fibras o humos.

Las fuentes de la contaminación atmosférica pueden clasificarse en naturales o antrópicas. Entre éstas últimas cabe señalar como principal fuente de contaminación los medios de transporte y los procesos industriales, que utilizan combustibles fósiles. A ellas se unen las aportaciones naturales de erupciones volcánicas (que producen partículas de azufre, cloro y cenizas), la combustión de biomasa (los incendios forestales y la quema de residuos agrícolas produce humo, partículas y monóxido de carbono), la desintegración radiactiva de la corteza terrestre (gas radón) así como las zonas áridas del planeta.

1.2. EL MATERIAL PARTICULADO

El material particulado atmosférico (PM) se define como “... cualquier sustancia, a excepción del agua pura, presente en la atmósfera en estado sólido o líquido bajo condiciones normales y cuyo tamaño se considera comprendido entre los 0,002-100 μm de diámetro” (Finlayson-Pitts, 2000). Por consiguiente, la contaminación atmosférica por material particulado se define como “... la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas ya sea por causas naturales o por la acción del hombre” (MITECO, 2021a).

1.2.1. Clasificación del material particulado

El material particulado se puede clasificar a través de varios criterios: origen (fuentes naturales o antrópicas), proceso de formación (primarias o secundarias) o tamaño.

❖ *En función de su origen:* las partículas naturales destacan por la fracción mineral, con origen en las emisiones naturales de los suelos. Los fuertes vientos levantan arena y polvo de suelos secos a la atmósfera, transportándolos a cientos o miles de kilómetros de distancia. Este es el caso del desierto de Gobi respecto a China, o del polvo del Sahara, que puede alcanzar el Caribe, aprovechando la circulación tropical (Méndez, Pinto-Herrera, Belalcázar-Cerón, 2018). Como es lógico, la composición química y mineralógica de estas partículas depende del tipo de sustrato en cada región. Las emisiones volcánicas también pueden constituir una fuente natural de partículas. Asimismo, cabe destacar la importancia en los aportes de los mares y océanos, generadores del aerosol marino. La fracción primaria del aerosol marino esta principalmente compuesta por cloruros (Méndez, Pinto-Herrera, Belalcázar-Cerón, 2018).

Las fuentes de partículas antrópicas se encuentran en zonas urbanas e industriales. El tráfico es la más importante, tanto por las emisiones de los motores como por el desgaste de pavimento, neumáticos y frenos. Los combustibles fósiles son otra de las mayores fuentes de materia particulada, principalmente la combustión del carbón. Por último, dentro de las actividades industriales más importantes, destacan también la fundición de metales como el cobre o el cinc, la producción de cemento, cerámica y ladrillos (Querol *et al.*, 2004).

❖ *Por el proceso de formación:* las partículas primarias son emitidas directamente a la atmosfera desde el lugar de origen. Mientras que las partículas secundarias son el

resultado de las transformaciones químicas de precursores gaseosos tales como el óxido de azufre y nitrógeno, amonio u otros compuestos orgánicos. En el caso de las partículas primarias, la mayor parte proceden de fuentes naturales (océanos, volcanes, vegetación...). Por otra parte, las partículas antrópicas primarias aparecen por las emisiones del tráfico y la industria (Aldabe *et al.*, 2011).

- ❖ *En función del tamaño:* para la clasificación se establecen “modas”, las cuales son distintos rangos de tamaños de partícula según el mecanismo de formación: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa (Fig. 1.1) (Warneck, 1998).

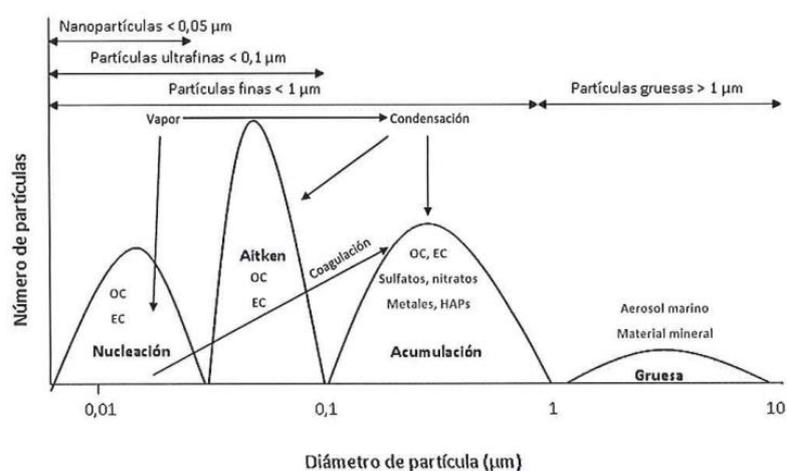


Figura 1.1. Distribución del número de partículas con respecto al diámetro

Fuente: Warneck, 1988.

1.2.2. Efectos del material particulado

Las partículas son uno de los contaminantes más dañinos para el ser humano, especialmente las más pequeñas, debido a su capacidad para penetrar en los pulmones, el torrente sanguíneo y el cerebro, causando ataques cardíacos, enfermedades respiratorias y muerte prematura. Cabe destacar que las partículas de menor diámetro son las más peligrosas, debido principalmente a que pueden entrar más profundamente en los pulmones: las partículas de PM_{10} pueden llegar a penetrar en la región traqueobronquial, mientras que las partículas de diámetro menor a $2,5 \mu m$ pueden alcanzar la cavidad alveolar. Por consecuencia el mayor riesgo para la salud lo origina la fracción $PM_{2,5}$, ya que causarían afecciones más graves al alcanzar los alveolos pulmonares (Oyarzún, 2010). La exposición mundial a $PM_{2,5}$ contribuyó a 4.100.000 muertes por enfermedades cardíacas y accidentes cerebrovasculares, cáncer de pulmón, enfermedad pulmonar crónica e infecciones

respiratorias en 2016, situándolas como el sexto factor de riesgo principal de muerte prematura a nivel mundial (HEI, 2018). A estas afecciones hay que añadir que el transporte de hongos, esporas y microbios procedentes del Sahara también es perjudicial para la salud humana al haber sido relacionados con alergias y enfermedades respiratorias.

El material particulado también tiene un gran impacto en el cambio climático. Tanto las partículas naturales, minerales como el aerosol marino pueden llegar a alterar las propiedades fisicoquímicas de la troposfera. Un efecto directo es el forzamiento radiactivo del material particulado que modifican el albedo, así como la formación de nubes. Por lo que, los episodios de intrusiones pueden producir tanto calentamiento atmosférico como por el contrario producir un enfriamiento, dependiendo de la cantidad del material mineral, así como su contenido en óxidos de hierro.

1.2.3 Otros efectos

El material particulado también influye en la fauna y flora. En el caso de la vegetación, al depositarse las partículas sobre las hojas de las plantas, pueden obstruir los poros influyendo en la fotosíntesis y por consiguiente en el desarrollo normal de la planta, alterando su crecimiento (Grantz, Garner, Johnson, 2003). Además, por otra parte, si el material particulado contiene sustancias químicas nocivas, los animales pueden engullirlo produciendo consecuencias negativas en su salud a largo plazo.

Otro efecto relevante es el aumento de la corrosión debido al depósito del material particulado sobre la superficie, que, junto a factores meteorológicos, bacteriológicos y fisicoquímicos, condicionan el proceso de degradación (Seoánez, 2002).

1.3. EL MATERIAL PARTICULADO EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

La concentración anual de PM_{10} en la Península Ibérica se encuentra dentro de los valores habituales del resto de Europa Occidental, y claramente por debajo de los de algunos países de la Europa Oriental (Polonia, Bulgaria) (Fig. 1.2).

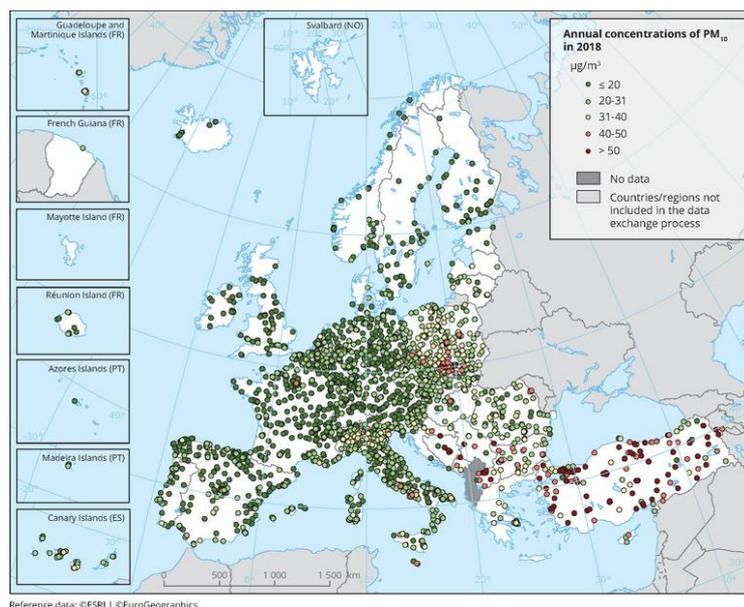


Figura 1.2. Concentraciones anuales de PM₁₀ en Europa en 2018

Fuente: EEA, 2020.

La evolución mensual de las concentraciones medias registradas en las estaciones de fondo rural españolas, en las que se registra fundamentalmente el material particulado procedente de fuentes naturales, muestra un claro gradiente S-N, que sugiere que el factor de cercanía al principal foco natural de emisión de partículas, el desierto del Sahara es determinante para cuantificar las diferencias geográficas en los valores de material particulado. Los valores más elevados se registran en el sector sur (Andalucía y Extremadura), a las que habría que añadir las Islas Baleares (Fig. 1.3). En la mayoría de estas áreas los valores más elevados de partículas coinciden con los meses estivales, momento en el que la llegada de intrusiones saharianas es más frecuente, a las que se añade la aportación de la propia Península Ibérica, cuyos suelos sin abundante vegetación están muy secos y sometidos a altas temperaturas, lo que favorece la resuspensión de las partículas. En las estaciones más septentrionales, el alejamiento de la fuente principal de partículas saharianas, las precipitaciones más abundantes y frecuentes, y la llegada de aerosol marino durante los temporales favorecen valores más homogéneos durante todo el año. Además, a estos aportes deben añadirse los procedentes del centro de Europa, cuyo gradiente es el opuesto al de las intrusiones saharianas.

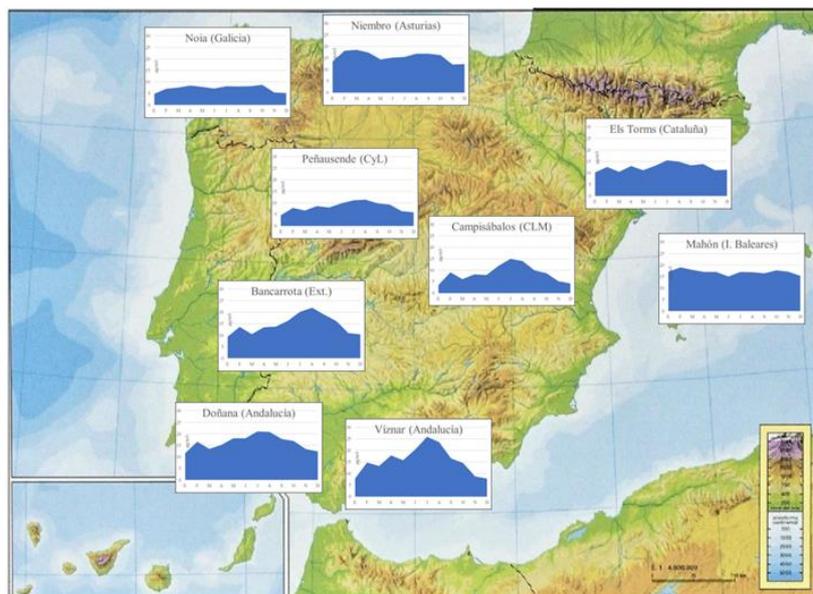


Figura 1.3. Niveles de PM₁₀ registrados en diferentes estaciones EMEP en la península ibérica
 Fuente: elaboración propia a partir de los datos proporcionados por el MITECO.

1.4. EL MATERIAL PARTICULADO DE ORIGEN SAHARIANO

Con una superficie de 9.200.000 km², el Sahara es el principal reservorio de polvo desértico del planeta. El polvo sahariano está compuesto de partículas, en su mayoría de origen mineral, como la calcita, el óxido férrico, cuarzo y minerales de arcilla. Además, es portador de esporas, bacterias y polen, mezclados con el resto de los minerales.

El polvo sahariano puede viajar a grandes distancias a través de la troposfera, siguiendo tres trayectorias. Una de ellas, hacia el oeste, atraviesa el Golfo de Guinea, alcanza el Caribe y puede llegar hasta América del Sur (Méndez, Pinto-Herrera, Belalcázar-Cerón, 2018). Otra, hacia el norte, atraviesa el Mediterráneo y el sur de Europa, llegando ocasionalmente hasta Escandinavia. Finalmente, puede adquirir una dirección este, hacia el Mediterráneo oriental y Oriente Medio. Se estima que al Atlántico viajan del orden de 170 Gt/año, de ellas 5 Gt/año al Caribe, y 25 Gt/año al Mediterráneo (Prospero, 1996). La llegada de polvo sahariano aporta nutrientes (por ejemplo, fósforo a la cuenca del Amazonas) que mitigan déficits locales de algunos compuestos. Los mecanismos que colaboran en la exportación de material particulado desde el Sáhara son muy diversos, y presentan un comportamiento estacional, ligado a los diferentes procesos de advección desde el norte de África (Querol *et al.*, 2009).

La mayor parte de ese polvo proviene de una serie de cuencas internas del Sahara, como la depresión de Bodélé, formada por lechos de antiguos lagos, hoy secos y cubiertos por

dunas. La ausencia de precipitaciones y el calentamiento de la superficie durante el día favorecen la resuspensión del material; los vientos recogen el material suelto para su exportación elevándolo hasta las capas medias de la atmósfera. La mayor exportación de polvo se produce desde la primavera hasta el otoño (Washington *et al.*, 2006).

En España, las intrusiones de masas de aire provenientes del norte de África son una de las mayores fuentes de concentración de PM, suponiendo el 90% de las superaciones de los valores límites (Querol *et al.*, 2008). La llegada de polvo sahariano a la península no es un fenómeno novedoso. Ya en el siglo XIX algunas zonas del océano Atlántico eran conocidas como “mar oscuro” por los navegantes (Darwin, 1845), a causa de la reducción de la visibilidad. En el Mediterráneo son también frecuentes las lluvias de sangre (verano-otoño), que son precipitaciones líquidas mezcladas con polvo en suspensión.

1.5. LEGISLACIÓN AMBIENTAL

La necesidad de protección del medio ambiente como la salud humana ha propiciado el desarrollo de una normativa medioambiental que establece las disposiciones legales con el objetivo principal de reducir la contaminación atmosférica y los impactos negativos. Actualmente, la normativa vigente relativa al PM₁₀ aparece en la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia en Europa (Tabla 1.1). Esta normativa ha obligado a los estados miembros de la Unión Europea a adoptar medidas para así controlar el material particulado en suspensión.

Tabla 1.1. Valores límite legislados, para las partículas PM₁₀ en aire ambiente, por la Directiva Europea

	Valor límite	Período
Valor límite diario de PM₁₀ para la protección de la salud humana	50 µg/m ³	24 h No debe superarse en más de 35 ocasiones por año civil
Valor límite anual de PM₁₀ para la protección de la salud humana	40 µg/m ³	Año civil

Fuente: Directiva 2008/50/CE.

Mientras que los valores recomendados por la OMS para el material particulado (Tabla 1.2) son:

Tabla 1.2. Valores límite establecidos, para las partículas PM₁₀ en aire ambiente, por la Organización Mundial de la Salud

	Valor límite	Período
PM₁₀	20 µg/m ³	Media anual
	50 µg/m ³	Media 24 horas
PM_{2,5}	10 µg/m ³	Media anual
	25 µg/m ³	Media 24 horas

Fuente: WHO, 2021.

A la hora de evaluar el cumplimiento de la normativa que regula la calidad del aire a escala local, y la posible intervención sobre las emisiones de partículas, la legislación obliga a separar las superaciones de los valores límites causadas por la llegada de masas de aire sahariano de aquéllas producto de las actividades humanas (Boldo, 2012). Si las causas se vinculan a estas últimas, las autoridades deben llevar a cabo planes de actuación para mejorar la calidad del aire:

“Cuando se superen los valores límite de PM₁₀ a que se refiere la sección I del anexo III debido a concentraciones de PM₁₀ en el aire ambiente producidas por fenómenos naturales, que supongan concentraciones considerablemente superiores a los niveles de fondo procedentes de fuentes naturales, los Estados miembros informarán de ello a la Comisión de conformidad con el apartado 1 del artículo 11 de la Directiva 96/62/CE y facilitarán la justificación necesaria para demostrar que dichos rebasamientos se deben a fenómenos naturales. En estos casos, los Estados miembros tendrán la obligación de ejecutar planes de actuación con arreglo al apartado 3 del artículo 8 de la Directiva 96/62/CE sólo cuando se rebasen los valores límite a que se refiere la sección I del anexo III por causas que no sean tales fenómenos naturales.” (Directiva 2008/50/CE).

En el caso de la Comunidad Autónoma de Cantabria, la normativa vigente que afecta a la región aparece en el Decreto 50/2009, por el que se regula el control de la contaminación atmosférica industrial (Decreto 50/2009).

2. OBJETIVOS

Los estudios sobre calidad del aire tienen dos propósitos, uno a corto plazo y local, para mejorar la calidad de vida de la población y el medio ambiente, y otro más global y a largo plazo, como es mejorar el nivel de adaptación del territorio al cambio global. Los estudios sobre contaminación atmosférica cada vez tienen más relevancia en el panorama de la Geografía y Ordenación del Territorio. Desde su perspectiva se pueden desarrollar soluciones a diferentes escalas para contrarrestar los efectos del material particulado sobre el clima y la salud ciudadana.

Diferentes características del material particulado que afecta a las Islas Canarias o al sur de la península, como frecuencia, situaciones atmosféricas típicas etc., ha sido objeto de estudios en el marco académico (Viana, 2003; Salvador, 2005; Alonso, 2007). No es esta la situación en la fachada cantábrica, donde el número de trabajos al respecto es escaso (Querol *et al.*, 2014) por lo que este trabajo constituye un paso inicial para llenar ese vacío. En un futuro, sus resultados podrán ayudar a un mejor conocimiento de las consecuencias sanitarias y medioambientales que estos eventos suponen para la sociedad en el norte peninsular.

El objetivo del trabajo es el análisis de las intrusiones saharianas en Cantabria y su impacto sobre la calidad del aire en la región. Para ello

1. Se caracterizará la variabilidad espacial y temporal de las partículas de PM₁₀ en Cantabria, así como el papel de las condiciones atmosféricas y de la actividad humana en la dicha variabilidad.
2. Se describirán las intrusiones de aire sahariano y su aportación de PM₁₀ (frecuencia, duración, carga de polvo adicional) analizando los registros de calidad del aire de la estación de Niembro, perteneciente a la red EMEP/VAG/CAMP (CIMA, 2022), localizada en la costa cantábrica.
3. En tercer lugar, se analizarán datos meteorológicos y tipos de circulación para establecer las condiciones atmosféricas que acompañan a estos episodios.
4. Posteriormente, se evaluará su impacto sobre la calidad del aire en Cantabria, a partir de la revisión de la información procedente de la red de calidad del aire del CIMA.
5. Por último, se examinará en profundidad un episodio de intrusión sahariana en nuestro ámbito de estudio, seleccionado por su importancia y representatividad.

3. ÁMBITO DE ESTUDIO, FUENTES Y METODOLOGÍA

3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO

El ámbito de estudio corresponde al área norte de la península ibérica, concretamente la comunidad autónoma de Cantabria (Fig. 3.1). Debido a sus condiciones orográficas, la mayor parte de la población regional se concentra en la costa, especialmente alrededor de la Bahía de Santander y a lo largo del Valle del Besaya, donde aparecen núcleos como Torrelavega, Los Corrales de Buelna y Reinosa. El 46% de la población de Cantabria se sitúa a no más de 20 km de la capital; ésta es el centro de un área metropolitana que conforma el principal foco de empleo regional, lo que explica la alta movilidad pendular de la población. Esta alta densidad de tráfico es una de las principales fuentes de material particulado en la región. Además, también es relevante el sector secundario, que todavía ocupa aproximadamente al 30% de la población activa, destacando actividades como la siderurgia, la industria alimentaria y la química, entre otras. Por último, el sector de actividad predominante en la región es el terciario, que ocupa al 64% de la población activa, mientras que el primario sólo emplea al 6% de la población.



Figura 3.1. Ámbito del área de estudio

Fuente: elaboración propia a partir de IGN, 2021.

El clima predominante es templado oceánico, caracterizado por precipitaciones abundantes y regulares, y temperaturas suaves, aunque estos rasgos se ven modificados por el relieve. Las precipitaciones se sitúan entre los 1.200-2.400 mm anuales, siendo los meses de noviembre y diciembre los más lluviosos. Las temperaturas oscilan entre los 10 y 20°C a

nivel del mar, debido al efecto moderador del océano Atlántico. La abundancia de precipitaciones y las temperaturas moderadas impiden la aparición de un periodo seco estival.

Hacia el interior se pueden generar dos situaciones diferentes (Fig. 3.2). En valles expuestos a los vientos húmedos del NW (por ejemplo, Mirones), los rasgos oceánicos se acentúan. En este ámbito, los macizos montañosos compactos, con valles estrechos, y sin grandes obstáculos orográficos, canalizan las masas de aire hacia el interior de la península ibérica, favoreciendo la convergencia horizontal de las masas de aire y el aumento de la nubosidad y de las precipitaciones. Por el contrario, en los valles amplios de la mitad occidental, separados de la costa por alineaciones abruptas, los rasgos oceánicos se atenúan: la precipitación disminuye y la amplitud térmica aumenta (inviernos más frescos, veranos más cálidos), lo que conducen a la aparición de un breve periodo seco en julio y agosto (Tama). En zonas altas, como en el valle de Campoó, la altitud y lejanía al mar aumentan los rasgos continentales, provocando unas condiciones climáticas bastante alejadas de las existentes en la costa.

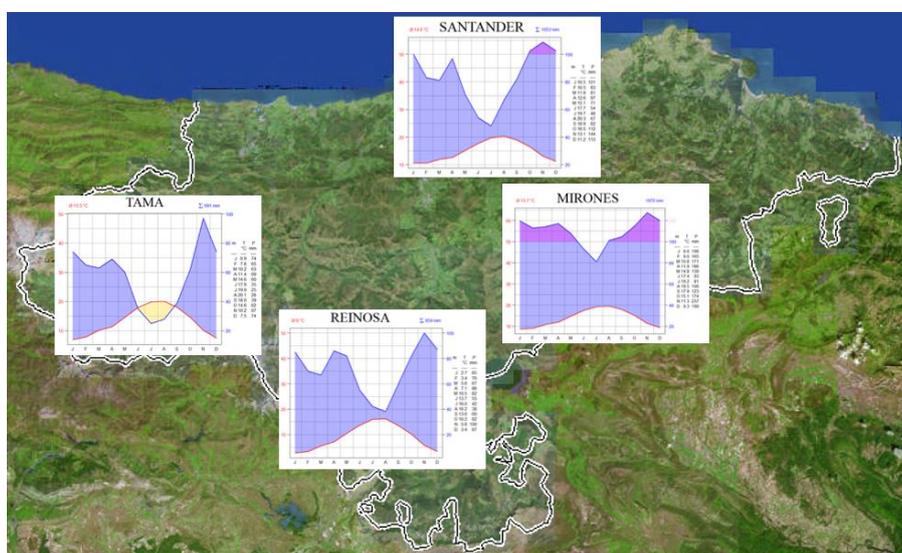


Figura 3.2. Estaciones meteorológicas seleccionadas en Cantabria: Santander, Mirones, Tama y Reinosa

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

Una variable climática que aún no ha sido estudiada en Cantabria de manera exhaustiva, pero con gran influencia en la dispersión de contaminantes, así como en el régimen térmico y en la humedad ambiental, es el viento. El ámbito costero, representado por el observatorio del Centro Territorial de la Aemet en Santander, es el que muestra una mayor agitación y variedad de direcciones. Los vientos predominantes son los del NW, que traen nubosidad y

precipitaciones, seguidos del NE, más frecuentes en verano, y que son en su mayor parte una brisa de mar, resultado de los contrastes entre el mar y el interior. Hacia el interior el viento disminuye su velocidad debido al rozamiento, y su dirección se adapta a la complicada orografía regional. Por ejemplo, tanto en Tama como en Villacarriedo se simplifica la rosa de vientos, en la que predominan los vientos del N y del S, siendo éstos últimos mucho más frecuentes en Villacarriedo. En Tama, mucho mejor protegida por la orografía, la velocidad del viento es mucho más baja. Por último, Reinosa, al tratarse de un valle abierto, está afectada por vientos de todas las direcciones, siendo los más fuertes los del NW y del SW. La componente NE proviene de las brisas que remontan el valle del Besaya (Fig. 3.3).

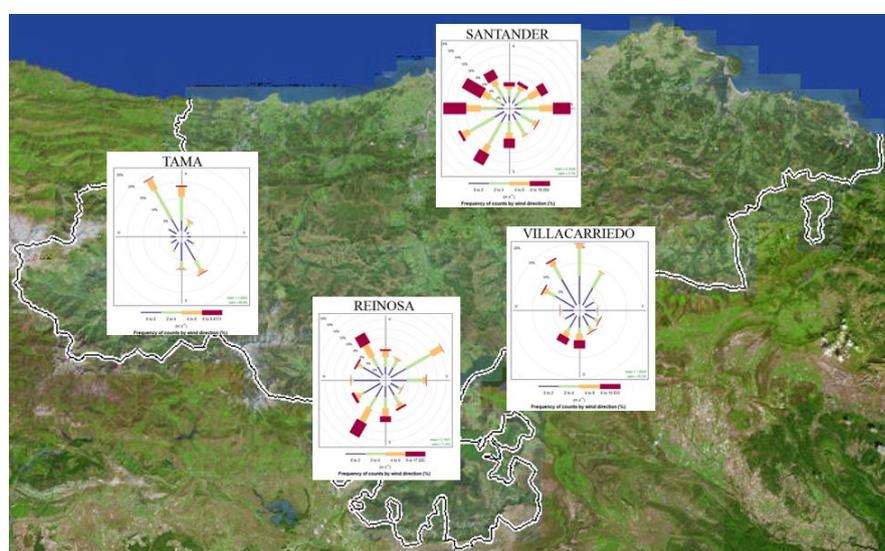


Figura 3.3. Vientos predominantes en las estaciones meteorológicas seleccionadas en Cantabria: Santander, Villacarriedo, Tama y Reinosa

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

3.2. FUENTES DE INFORMACIÓN

Para la realización de este trabajo se han utilizado datos procedentes de dos redes de calidad del aire diferentes. Por un lado, los correspondientes a la estación de Niembro, en Llanes (Asturias) (Fig. 3.4). Es una estación de fondo rural, perteneciente a la red EMEP (ES08), cuyo propósito es la cuantificación y vigilancia de los niveles de contaminación atmosférica de fondo, por lo que se sitúan alejadas de los principales focos de emisión. Los datos fueron suministrados por la Subdirección General de Aire Limpio y Sostenibilidad Industrial, del MITECO, y corresponden a la concentración diaria de PM_{10} , temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, viento y radiación solar.



Figura 3.4. Instrumentos para la toma de muestras de precipitación y aerosoles en la estación de la red EMEP/VAG/CAMP situada en Niembro (Asturias)

Fuente: AEMET, 2021.

Para la caracterización de los niveles de PM_{10} en Cantabria se han utilizado las estaciones englobadas en la Red de Vigilancia de Calidad del Aire, pertenecientes al CIMA (Centro de Investigación del Medio Ambiente; Consejería de Desarrollo Rural, Ganadería, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente de Cantabria; Fig. 3.5; CIMA, 2022). Esta red consta actualmente de 11 estaciones localizadas en cierto número de localidades, donde se sitúan los principales focos de emisión de sustancias contaminantes de la región, además de la estación de Los Tojos, clasificada como de fondo regional (Tabla 3.1).



Figura 3.5. Estaciones de calidad del aire en Cantabria, 2021

Fuente: elaboración propia a partir de CIMA, 2022.

Las estaciones cuantifican los siguientes contaminantes:

- Partículas en suspensión de tamaño inferior a 10 micras (PM_{10}).
- Dióxido de azufre (SO_2).
- Óxidos de nitrógeno (NO y NO_2).

- Monóxido de carbono (CO).
- Ozono (O₃).

Cabe destacar que algunas de las estaciones, también disponen de torre meteorológica, la cual mide:

- Dirección y velocidad del viento.
- Precipitación.
- Humedad relativa.
- Temperatura.
- Presión barométrica.
- Radiación solar.

Tabla 3.1. Estaciones calidad del aire en Cantabria, 2021

Nombre	Zonificación	Parámetros medidos
Santander Centro	Santander	PM10, SO2 CO NO, NO2, BTX
Tetuán		PM10, SO2 CO NO, NO2, O3
Cros	Camargo	PM10, SO2 CO NO, NO2, O3
El Astillero	Guamizo	PM10, SO2 CO NO, NO2, O3, meteorológicos
Minas	Torrelavega	PM10, SO2, H2S, NO, NO2
Zapatón		PM10, SO2, H2S, CO, NO, NO2, O3
Barreda		PM10, SO2, H2S, CO, NO, NO2
Escuela de Minas		Meteorológicos
Los Corrales de Buelna		PM10, SO2, NO, NO2, O3, meteorológicos
Reinosa	Zona Interior	PM10, SO2, NO, NO2, O3, meteorológicos
Los Tojos		PM10, SO2, NO, NO2, O3, meteorológicos
Castro Urdiales	Zona litoral	PM10, SO2, NO, NO2, O3, meteorológicos

Fuente: CIMA, 2022.

3.3. METODOLOGÍA

La cuantificación de los niveles de material particulado de origen natural es clave para determinar la influencia de las actividades antrópicas en los niveles de partículas, y llegado el caso, implementar las actuaciones de control de las emisiones incluidas en la normativa actual.

Existen diferentes métodos para cuantificar la contribución de partículas de origen sahariano en los registros de calidad del aire (Fig. 3.6). Debido al coste económico y en tiempo de los métodos de especiación química, que identifican las posibles fuentes en función de su composición química, se ha propuesto un método alternativo más simple, basado en el análisis de los niveles de PM₁₀ medidos en las estaciones de fondo rural. Este procedimiento consta de dos fases, una inicial de identificación de intrusiones saharianas a

partir de la combinación de fuentes sinópticas (tipos de circulación, retrotrayectoria de las masas de aire), análisis de imágenes de satélite y modelos de previsión numérica, y otra posterior de cuantificación del aporte suplementario de PM sobre los niveles de fondo. Una vez identificado un día como afectado por una intrusión sahariana, se procede al cálculo de esos niveles de fondo de PM en la estación de referencia utilizando el percentil 40 móvil, en el que el día en cuestión ocupa la posición 15, y se excluyen de esos 30 días aquellos días que también hayan registrado otras intrusiones saharianas. Finalmente, la contribución sahariana es el resultado de sustraer los valores reales medidos en el observatorio de referencia, del valor de fondo de PM.



Figura 3.6. Ejemplo de cálculo de la aportación sahariana

Fuente: Santos, 2015.

Los períodos temporales bajo los que Niembro ha estado sometido a intrusiones de aire sahariano se han obtenido de la página web del MITECO. Este organismo, en colaboración con la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas, elabora anualmente una serie de documentos en los que se recoge un calendario de intrusiones saharianas en las diferentes regiones de España, conteniendo igualmente la aportación (descuento) correspondiente a cada episodio, todo ello en formato Excel.

Finalmente, también se utilizaron como herramientas adicionales de análisis:

- Los mapas de la circulación atmosférica proporcionados por NOAA (NOAA PSL, 2022).
- El visor de calidad del aire del MITECO (MITECO, 2021b).
- Las retrotrayectorias proporcionadas por el modelo HYSPLIT (NOAA ARL, 2022).
- Los sondeos termodinámicos proporcionados por el sitio web Meteociel.
- Las imágenes de satélite del sensor MODIS (NASA, 2021).

La clasificación de tipos de circulación aplicada en este trabajo está basada en la clasificación original de Lamb, pero adaptada a la península ibérica (Fernandez y Rasilla, 2001).

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL PM₁₀ EN CANTABRIA

4.1.1. Situación de Cantabria en comparación con regiones colindantes

Desde el punto de vista geográfico, los niveles medios de PM₁₀ varían en función de la proximidad a las fuentes de partículas, sean éstas antrópicas o naturales, y de las condiciones atmosféricas. Debido a su posición septentrional, clima oceánico y ausencia de grandes focos de contaminación antrópica, Cantabria muestra, en general, niveles moderados, comparables a los de las regiones vecinas. Sin embargo, un análisis más detallado permite detectar algunos comportamientos singulares.

Como parece lógico, las estaciones de fondo rural (Los Tojos -Cantabria-, Mundaka - Vizcaya- y Valderejo -Álava-) muestran los valores más bajos, dada su lejanía a las fuentes antrópicas. En ningún caso se supera el de 15 µg/m³, cumpliendo ampliamente el objetivo del valor límite anual de PM₁₀ para la protección de la salud humana (40 µg/m³). Por el contrario, los valores más elevados se registran en las estaciones de tráfico en áreas urbanas, si bien rara vez se superan los 25 µg/m³. Cabe señalar que las estaciones ubicadas alrededor en el área metropolitana de Santander muestran valores ligeramente superiores a los de las estaciones ubicadas en el área metropolitana de Bilbao, a pesar de la diferencia de población en favor de esta última. Una posible explicación a esta circunstancia puede provenir del mantenimiento de la industria siderúrgica en la Bahía de Santander, que ha desaparecido casi por completo de Bilbao. La importancia de estos aportes industriales también está detrás de los máximos absolutos de PM₁₀ registrados en el área policéntrica de Oviedo, Gijón y Avilés; es además un área con una importante red de ferrocarriles, vías de comunicación y polígonos industriales. Algunas estaciones llegan a incumplir el valor límite anual establecido por la legislación, como por ejemplo la estación de Matadero (43,48 µmg/m³), clasificada como suburbana industrial, emplazada en las proximidades del puerto de Avilés. En la vertiente sur de la Cordillera Cantábrica también son las estaciones urbanas de tráfico las que registran los valores más elevados, aunque en líneas generales el aporte de PM₁₀ es incluso inferior al de sus homólogas en la vertiente N (Fig. 4.1).

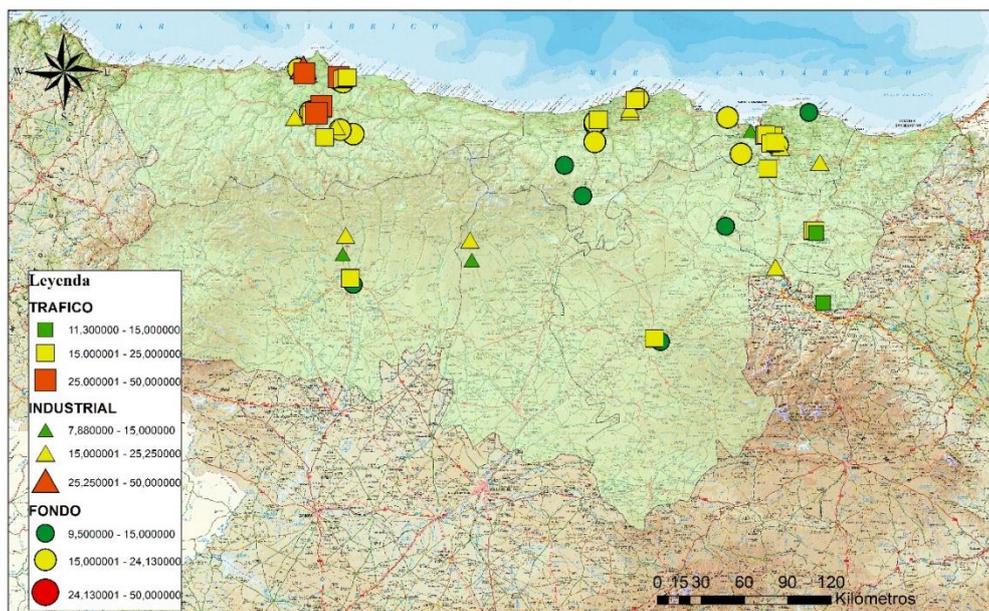


Figura 4.1. Valores medios anuales de PM₁₀ en Cantabria y regiones limítrofes en 2020
 Fuente: elaboración propia a partir de MITECO, 2020.

4.1.2. Régimen mensual

El patrón espacial citado en el anterior epígrafe también se cumple en Cantabria, donde las estaciones más próximas a los focos de emisión registran los valores más elevados. Este es el caso de las estaciones ubicadas en el arco de la Bahía de Santander (Cros, Guarnizo, Tetuán y Santander-Centro) (Fig. 4.2), a causa de la combinación de una elevada densidad de tráfico y la concentración de actividades industriales. El caso más evidente es Cros, estación localizada en el municipio de Camargo, próxima a la S-20, a la empresa siderúrgica Ferroatlántica, y rodeada por numerosos polígonos industriales y centros comerciales. El importante papel de las aportaciones antrópicas se advierte en el predominio de máximos invernales, ya que en esta estación las situaciones de gran estabilidad atmosférica, acompañadas de vientos en calma, impiden la dispersión horizontal y vertical y favorecen la concentración de contaminantes en las proximidades de las fuentes de emisión.

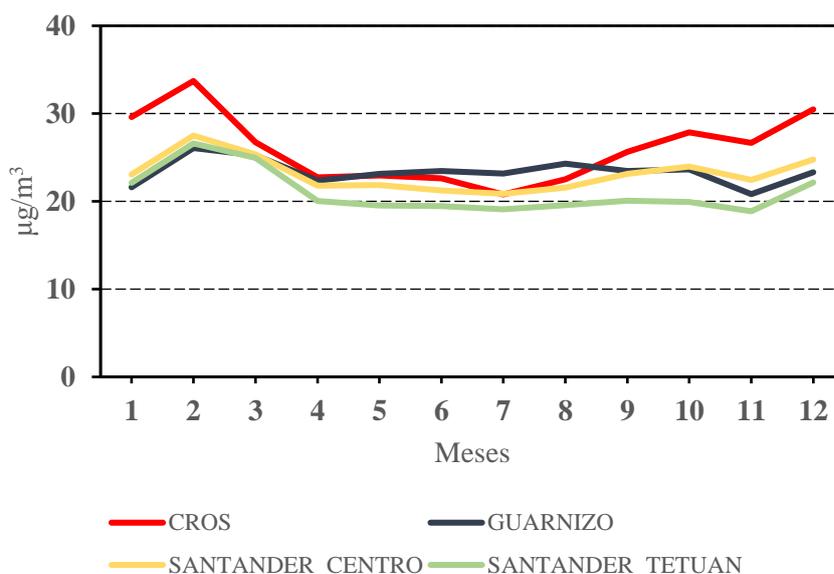


Figura 4.2. Régimen mensual PM₁₀ en el área de Santander, 2020

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

Una situación análoga se observa en el entorno de Torrelavega (Fig. 4.3). La estación con valores más elevados de PM₁₀ es la de Barreda, consecuencia lógica de su emplazamiento próximo a Solvay y Sniace. En la misma línea se sitúa la estación ubicada en Los Corrales de Buelna, influida por las industrias ubicadas en el Valle de Buelna. Todas ellas mantienen el patrón mensual con máximos invernales, aunque ligeramente atenuado.

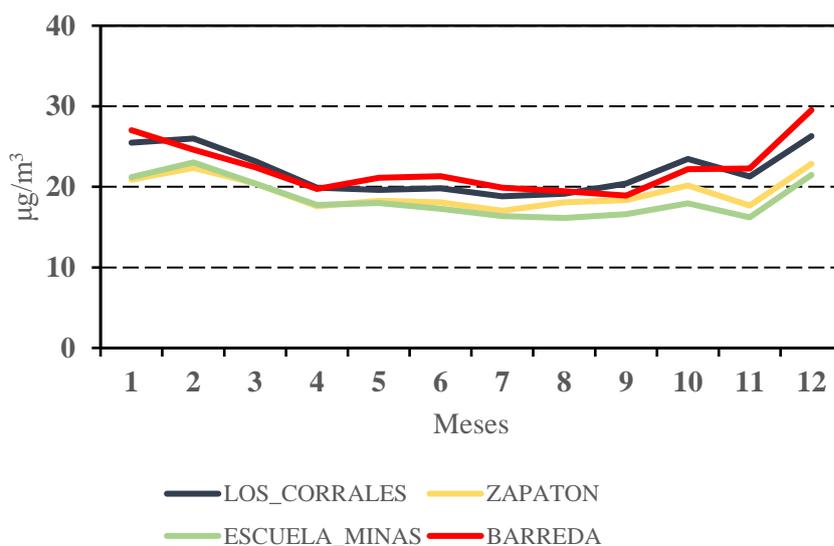


Figura 4.3. Régimen mensual PM₁₀ en el área de Torrelavega, 2020

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

Por último, las estaciones con menor concentración de PM_{10} son las de Los Tojos, de fondo rural, como las de Reinosa y Castro Urdiales, ambas clasificadas como de fondo urbano (Fig. 4.4). La reducción de los aportes antrópicos supone también una modificación del patrón mensual antes citado, ya que en ellas la mayor carga de partículas se registra durante la primavera y el otoño, siendo el invierno la estación con menos carga de partículas. Llama la atención las diferencias entre Los Corrales de Buelna y Reinosa, dos localidades con una población similar, ambas recorridas por la A-67 y el ferrocarril, y con una actividad industrial teóricamente similar. Pese a que Reinosa está clasificada como estación urbana con influencia industrial, los valores de calidad del aire son mejores que en Los Corrales.

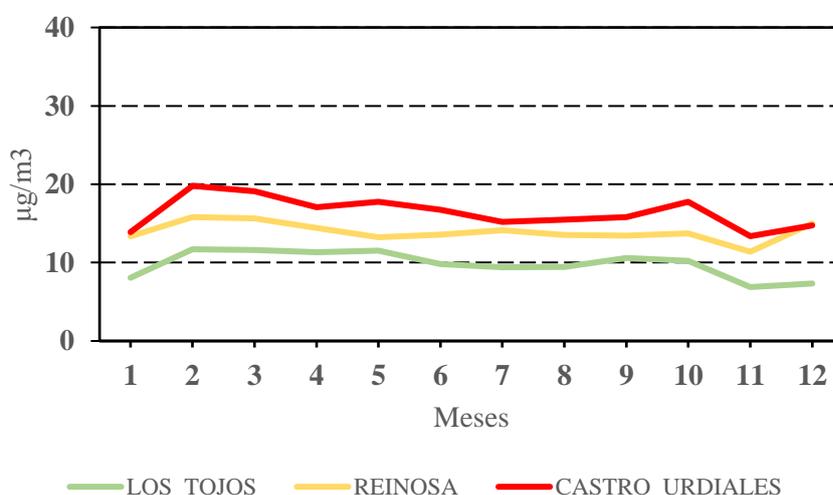


Figura 4.4. Régimen mensual PM_{10} en el resto de las estaciones, 2020
Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

4.1.3. Influencia de las condiciones atmosféricas en los niveles de PM_{10}

La calidad del aire en cualquier localidad está condicionada no sólo por su proximidad a las fuentes de emisión de sustancias contaminantes, sino también por las condiciones atmosféricas, fundamentalmente la cuantía y frecuencia de las precipitaciones, así como la intensidad y dirección del viento. La precipitación limpia la atmósfera a través de procesos de deposición húmeda, por los que las sustancias contaminantes se depositan sobre los objetos, mientras que el viento dispersa los contaminantes por el entorno disminuyendo su incidencia puntual (Inche, 2004).

Las condiciones atmosféricas habituales en Cantabria no son realmente propicias a episodios graves de concentración de material particulado, ya que las precipitaciones son abundantes, los vientos generalmente moderados y, por su parte, los bajos niveles de

radiación solar impiden la aparición de reacciones químicas favorables a la génesis de material particulado.

En el análisis de la relación existente entre la evolución mensual de la concentración de PM_{10} en Cros y la velocidad del viento y la precipitación en el observatorio meteorológico de Parayas (Fig. 4.5), queda claro que los meses con abundantes precipitaciones (enero 2015, 2016, 2019 y 2020), que corresponden además al predominio de vientos del NW, coinciden con bajas concentraciones de PM_{10} . Por el contrario, meses secos y estables, como febrero de 2019 y 2020, ha propiciado altos niveles de PM_{10} .

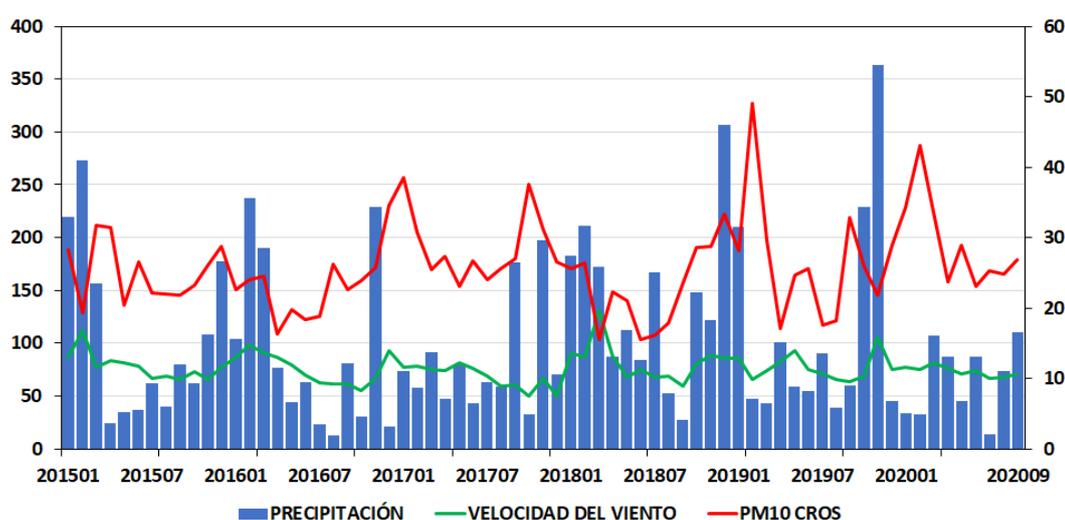


Figura 4.5. Régimen mensual del PM_{10} en Cros con los datos de precipitación y viento de Parayas entre 2015-2020

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

Sin embargo, mientras que el efecto reductor de las precipitaciones sobre los niveles de PM_{10} es innegable, el papel del viento no parece tan evidente. Por esta razón, se ha analizado la relación entre los niveles horarios de PM_{10} y la dirección y velocidad del viento en las estaciones de medida que registran simultáneamente ambos datos (Barreda, Castro Urdiales, Los Corrales de Buelna, Guarnizo, Reinosa y Los Tojos), mediante el uso de los diagramas polares (Fig. 4.6). Estos diagramas sirven para determinar si los niveles de PM_{10} están condicionados por la velocidad del viento y muestran, igualmente, la posible procedencia de esos aportes. Cabe destacar, en líneas generales, la diversidad de procedencias de las aportaciones de PM_{10} en Cantabria, señalando la diversidad de focos de emisión.

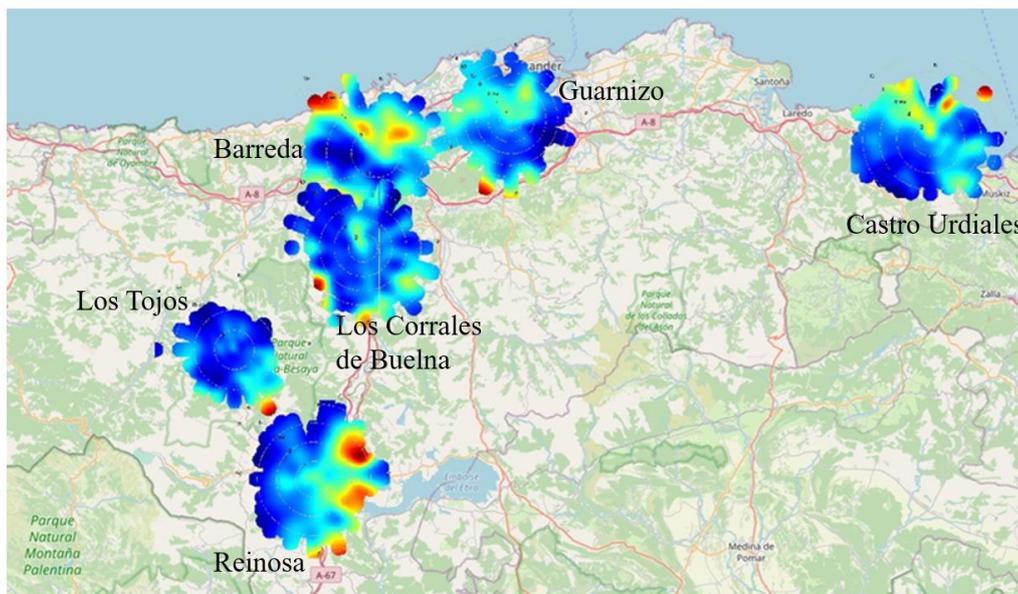


Figura 4.6. Rosas de contaminación en Cantabria correspondientes al PM₁₀

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

En la costa oriental de Cantabria (Castro Urdiales) predominan las aportaciones con vientos fuertes (hasta 8 m/s) del NW y del NE, lo que hace suponer que el origen del PM₁₀ puede ser tanto aerosol marino como material particulado procedente de Europa. En la costa central (Guarnizo), junto a la persistencia de ambas procedencias, aumenta de manera considerable la componente S con vientos muy fuertes (hasta 14 m/s), que indicaría una posible asociación con suradas. También se aprecia un aumento de las concentraciones con vientos flojos, que podrían corresponder a la ausencia de dispersión de las emisiones locales ligadas a la industria.

En el interior de Cantabria se mantiene la componente NW y NE, pero adquiere importancia la componente S. Barreda muestra tres procedencias fundamentales: vientos fuertes (hasta 15 m/s) del NW, vientos algo más flojos (5-6 m/s) de componente N y vientos del SW de intensidad moderada a fuerte (10-15 m/s). El patrón de Los Corrales de Buelna es diferente, puesto que se amortigua la componente septentrional y las mayores aportaciones provienen del S y SW, con velocidades también algo menores, rondando los 10 m/s. En el caso de Los Tojos el aspecto general de la rosa de contaminación recuerda al de Los Corrales de Buelna, ya que la mayor parte del material particulado procede del SE.

El diagrama polar de Reinosa es el más complejo de toda la región. Si bien las concentraciones más altas de PM₁₀ se registran con vientos del ESE y SSE, se aprecia otra importante concentración de partículas con vientos moderados del NE.

Este análisis permite, en líneas generales, diferenciar dos regímenes de viento en relación con las concentraciones de PM₁₀: los vientos de componente N-S, responsables de la llegada de aerosol marino y partículas desde Europa y con mayor impacto en las estaciones costeras, y la componente S-N, más típica de las estaciones situadas en el interior de Cantabria.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS INTRUSIONES SAHARIANAS EN NIEMBRO

Las rosas de contaminación (Fig. 4.6) muestran que una parte del PM₁₀ registrado en Cantabria alcanza la región con vientos relativamente moderados de componente S y SE, sugiriendo que la fuente de ese material particulado puede estar en el interior de la península ibérica o en el N de África (Rodríguez *et al.*, 2001). Siguiendo esta línea de razonamiento, la definición de las características fundamentales de las intrusiones saharianas en la zona de estudio se realiza a partir del análisis de los datos de Niembro, la estación EMEP más próxima a Cantabria.

4.2.1. Frecuencia

Como se ha señalado en el apartado dedicado a las fuentes de información y metodología, el MITECO proporciona información para toda la Península Ibérica acerca de la llegada de intrusiones saharianas desde el año 2009. De ella se ha extraído la serie diaria de intrusiones de material particulado de origen sahariano que afectaron a Niembro. En el análisis de la evolución en el número de días con intrusión sahariana en dicha localidad durante el periodo 2009-2020 (Fig. 4.7), destaca claramente la caída en el número de días en el año 2013; este año, además, permite separar dos períodos temporales diferentes en términos de la frecuencia de estos eventos. Con anterioridad a 2013, la frecuencia osciló entre 32 y 36 al año, mientras que a partir de 2015 se elevó a unos 40 episodios por año. Por lo tanto, es muy probable que la serie completa haya experimentado una ruptura importante en su continuidad, que puede atribuirse a la incorporación a la base de datos original de otros fenómenos capaces de producir incrementos de PM₁₀, como son los incendios forestales (codificados como quema de biomasa) o las advecciones europeas (codificados como sulfatos). Dado que el análisis de las intrusiones durante todo el periodo disponible de información podría resultar erróneo al incluir dos subpoblaciones con características diferentes, se optó por un criterio conservador, analizándose sólo el último periodo temporal, 2015-2020.



Figura 4.7. Evolución de los días con intrusiones saharianas (2009-2020) en la estación de Niembro
Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

Durante ese periodo, el promedio anual en el número de días de intrusión fue 39, lo que supone aproximadamente el 11% de los días del año. La aportación media durante ese mismo periodo fue de $10,8 \mu\text{gr}/\text{m}^3$. Dentro de este periodo, el año 2017 registró la mayor frecuencia de días con intrusión (62), aunque el promedio de la aportación de polvo sahariano ($11,31 \mu\text{gr}/\text{m}^3$) fue ligeramente superior a la media. En contraposición, en 2019 se contabilizó el menor número de días de intrusión (27), pero la aportación medio fue la más elevada de todo el periodo, $14,22 \mu\text{gr}/\text{m}^3$) (Fig. 4.8). De esta aparente contradicción se deduce que los mecanismos que favorecen la mayor o menor frecuencia de advecciones de aire sahariano no corresponden siempre a los que provocan las intrusiones con una carga más potente en términos de polvo sahariano desplazado hacia la península ibérica.

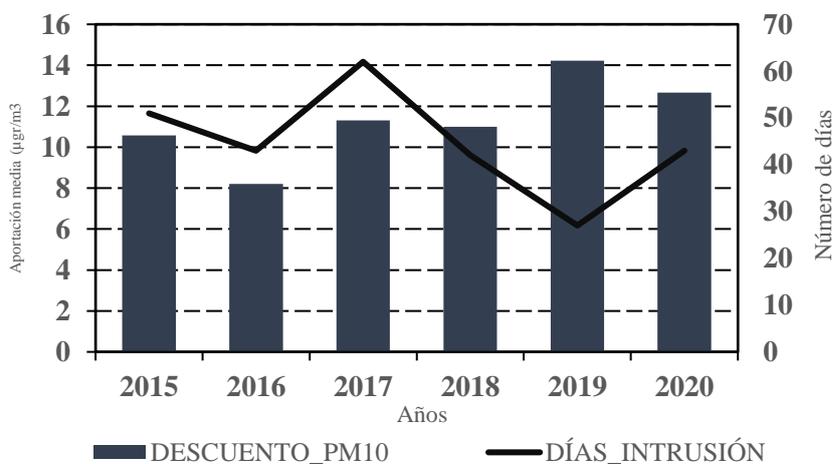


Figura 4.8. Evolución anual en el número de días de intrusión sahariana y en la aportación de PM₁₀ correspondiente a esos días
Fuente: MITECO, 2020.

En líneas generales, la aportación extra procedente del N de África es relativamente moderada. El análisis de la distribución de los valores medios diarios de PM₁₀ durante los días con y sin intrusión (Fig. 4.9) muestra que el intervalo modal de los días con intrusión es el de 15-19 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$, mientras que el correspondientes a los días sin intrusión es el intervalo inmediatamente inferior, 10-14 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$, es decir, una diferencia de 5 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$.

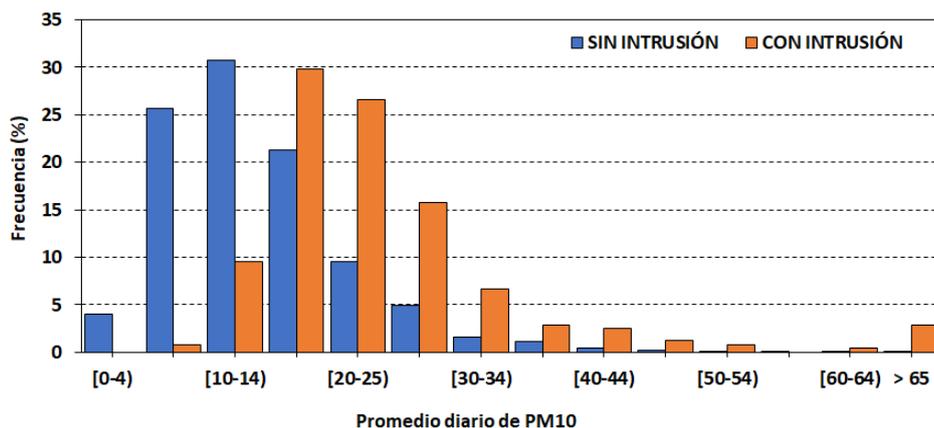


Figura 4.9. Valor medio diario de PM₁₀ en Niembro en días con y sin intrusión
Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

El estudio de la intensidad diaria de las intrusiones (Fig. 4.10) confirma estas afirmaciones: los descuentos diarios son relativamente poco elevados, ya que en la mayoría de los casos (aproximadamente el 75% de los días) el exceso de PM₁₀ debido a intrusiones no supera los 14 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$, si bien se han registrado eventos excepcionales de hasta 87 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$.

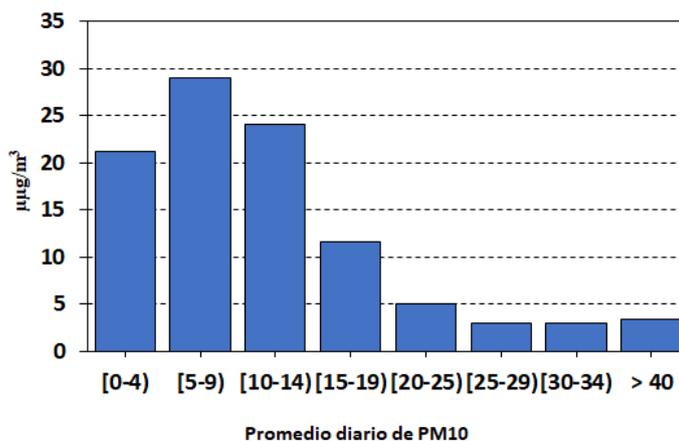


Figura 4.10. Intensidad diaria de las intrusiones saharianas en Niembro
Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

Por lo tanto, como cabría esperar, las intrusiones saharianas elevan la concentración de aerosoles en la atmósfera de Niembro, pero no excesivamente en comparación con los valores de otros puntos de España, donde dichas intrusiones son más frecuentes (hasta 60 días al año) y potentes (aportaciones medias de hasta $30 \mu\text{gr}/\text{m}^3$). Sin embargo, los días en los que los valores de PM_{10} son excepcionalmente altos en Niembro ($> 60 \mu\text{gr}/\text{m}^3$) ocurren siempre bajo intrusiones saharianas.

La variabilidad mensual en el número de días de intrusión y en el promedio de aportaciones diarias durante el período 2015-2020 confirma la mencionada disociación entre frecuencia e intensidad de las intrusiones (Fig. 4.11). La frecuencia de las intrusiones saharianas muestra un ciclo anual evidente, con máximos entre abril y agosto (en julio y agosto se superan los 40 días) y mínimos entre septiembre y marzo (este último mes es el que registró el menor número de intrusiones (3 días). Por el contrario, la aportación de las intrusiones saharianas no presenta ningún ciclo definido, si bien los meses estivales registran, en su conjunto, valores inferiores a los del resto del año (inferior a $10 \mu\text{gr}/\text{m}^3$), dónde destaca el máximo destacado de febrero (un promedio de $27 \mu\text{gr}/\text{m}^3$).

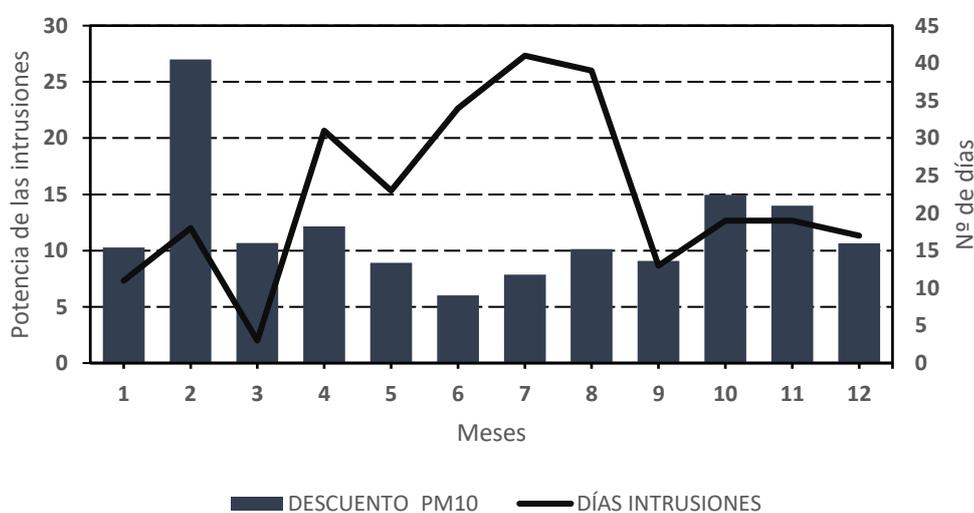


Figura 4.11. Promedios mensuales en el número de días de intrusión sahariana y en la aportación de PM_{10} correspondiente al período 2015-2020

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

4.2.2. Relación entre intrusiones y las condiciones atmosféricas

La disociación entre la frecuencia de las intrusiones y la aportación de PM_{10} conduce a pensar que estos fenómenos están caracterizados por una dinámica atmosférica relativamente compleja, con predominio de patrones de la circulación atmosférica concretos (Pandolfi *et al.*, 2014). Un primer paso para desentrañar esa aparente contradicción ha sido

relacionar los valores medios anuales de los parámetros meteorológicos registrados en la estación de Niembro con la frecuencia e intensidad de las intrusiones saharianas en esa localidad, aplicando para ello el coeficiente de correlación de Pearson, un procedimiento estadístico que indica no sólo la dirección de esa posible relación (si es positiva o negativa) sino también su magnitud (Tabla 4.1).

Las relaciones más significativas vinculan la frecuencia y potencia de las intrusiones con la presión atmosférica: el número de días de intrusión muestra una correlación positiva con la presión (a más situaciones anticiclónicas más frecuencia y viceversa), mientras que lo contrario ocurre con la potencia de las intrusiones (intrusiones más potentes con situaciones de presión baja). Llama la atención la ausencia de correlaciones importantes con la temperatura, ya que podría pensarse que, dado el origen de las masas de aire implicadas en estas intrusiones, una elevada frecuencia de eventos podría influir en las temperaturas en Niembro. Por ejemplo, el año más cálido, 2020, no coincide con el año con mayor cantidad de intrusiones, ni tampoco con las más potentes. Tampoco se observa demasiada relación con las precipitaciones, la humedad relativa y el viento.

Tabla 4.1. Coeficiente de Pearson para los parámetros meteorológicos en relación con los días de intrusión

	TMAX	TMIN	HUM	VIENTO	PRESIÓN	PRECIP
N.º días intrusión	0,06	0,21	-0,05	-0,22	0,62	-0,07
Descuento PM₁₀	0,23	-0,06	0,36	0,05	-0,64	0,32

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

Tras analizar los parámetros atmosféricos en relación con la frecuencia y la potencia de las intrusiones, se confirma que la frecuencia y de la potencia de las intrusiones responde a diferentes mecanismos atmosféricos. Por ello, el siguiente paso consistió en el análisis de la relación entre los tipos de circulación más frecuentes en el N de la península ibérica y su relación con las intrusiones saharianas.

La relación entre frecuencia anual de aparición de cada tipo de situación y la frecuencia anual con la que, dentro de ese tipo, registra intrusiones saharianas (Fig. 4.12) evidencia que cuando la longitud de la barra correspondiente a las intrusiones supera a la longitud de la barra correspondiente a la frecuencia anual, se considera que ese tipo de circulación es muy efectivo en la génesis de intrusiones. Así, mientras que la situación atmosférica más frecuente es la anticiclónica (A, un potente anticiclón localizado sobre la Península Ibérica,

que desvía las borrascas y frentes), la frecuencia de intrusiones es inferior a la que le correspondería, al igual que ocurre en las situaciones del W, NNW y NE, éstas últimas habitualmente responsables de temporales de lluvia en el N de la Península Ibérica. Por el contrario, situaciones poco habituales, como la ciclónica (C), la indeterminada (U) y la del SSE son muy efectivas a la hora de generar intrusiones.

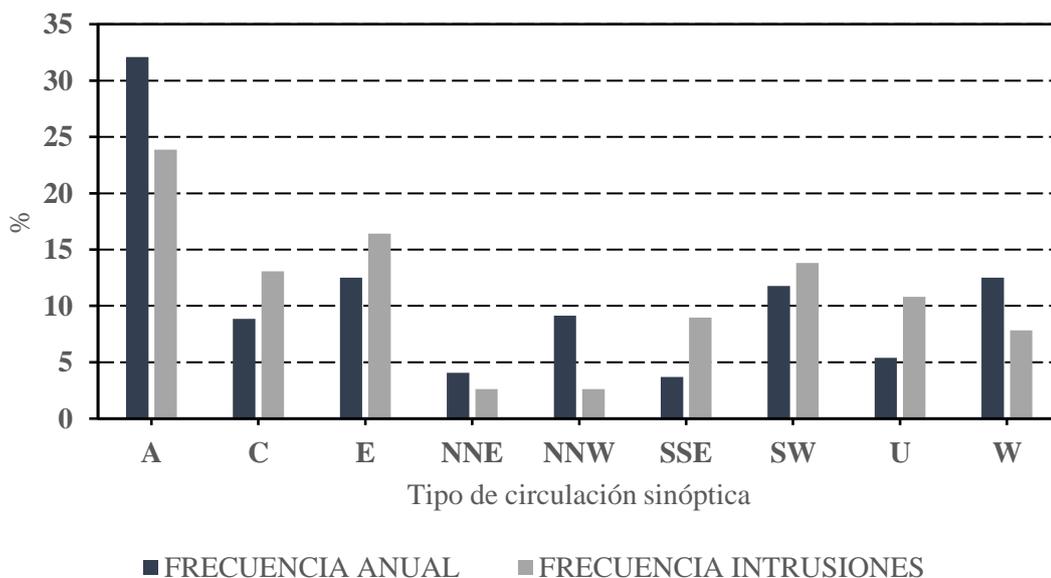


Figura 4.12. Frecuencia intrusiones saharianas en relación con los tipos de circulación sinóptica
 Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO,2020.

El análisis de la aportación de PM_{10} de origen sahariano en cada tipo de circulación confirman estas afirmaciones (Fig. 4.13). Como parece lógico, las situaciones que aportan más material son las que propician un movimiento S-N de las masas de aire (tipos SSE, SW, C), normalmente caracterizadas por una borrasca al W o de la Península Ibérica o en el Golfo de Cádiz, y un anticiclón sobre el Mediterráneo o Europa Occidental. Esta configuración ayuda a la inyección de aire proveniente del N de África.

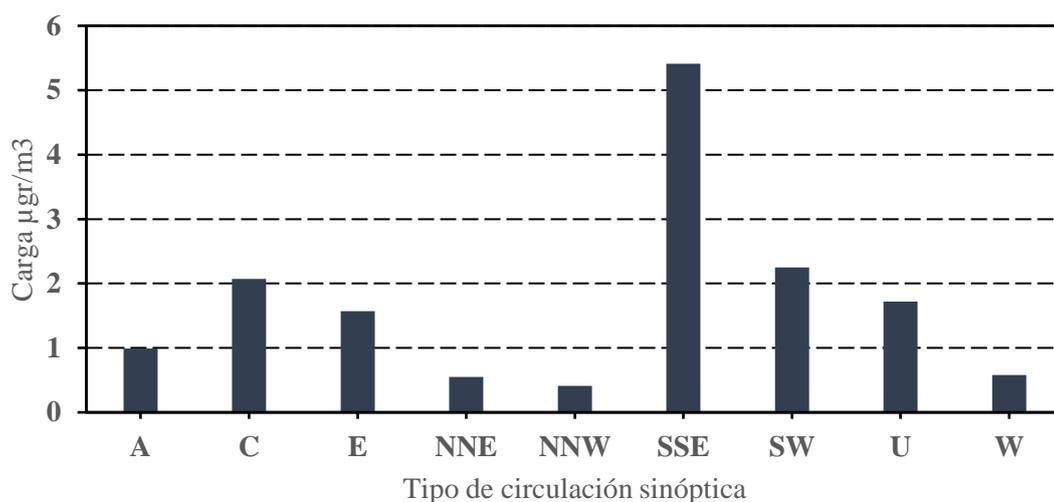


Figura 4.13. Carga de polvo sahariano según tipo de circulación

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

Las diferencias en la potencia de las intrusiones entre los tipos Anticiclónico y del SSE (Fig. 4.14) se explican del siguiente modo: en el primer caso, un anticiclón se sitúa sobre Europa Occidental, extendiéndose sobre la Península Ibérica. Aunque la disposición de las isobaras facilita la llegada de aire cálido de procedencia africana, el gradiente de presión es reducido, por lo que no son esperables vientos fuertes ni en superficie ni en los niveles bajos de la troposfera, con capacidad para arrastrar grandes volúmenes de partículas hacia latitudes septentrionales. Obsérvese además que su recorrido ejecuta una parábola sobre el Océano Atlántico, por lo que es posible que parte de la carga de partículas se diluya antes de alcanzar la península ibérica.

Por el contrario, la situación del SSE desplaza el anticiclón hacia el NE, situándose frente a las costas de Portugal y el Golfo de Cádiz un área de bajas presiones. La rotación del aire entre ambos centros de acción y un gradiente de presión acentuado facilita vientos moderados del SSE, tanto en superficie como en las capas altas. Bajo tales condiciones, los aerosoles africanos alcanzan directamente la península ibérica, al ser su recorrido menor desde el N de África, y atraviesan mucha menor superficie marina, con lo que es posible que los aportes africanos puedan mezclarse con aportes peninsulares si el suelo está muy seco. Esto último elevaría adicionalmente los niveles de PM_{10} registrados en Niembro, y por extensión, en el resto de las estaciones de Cantabria.

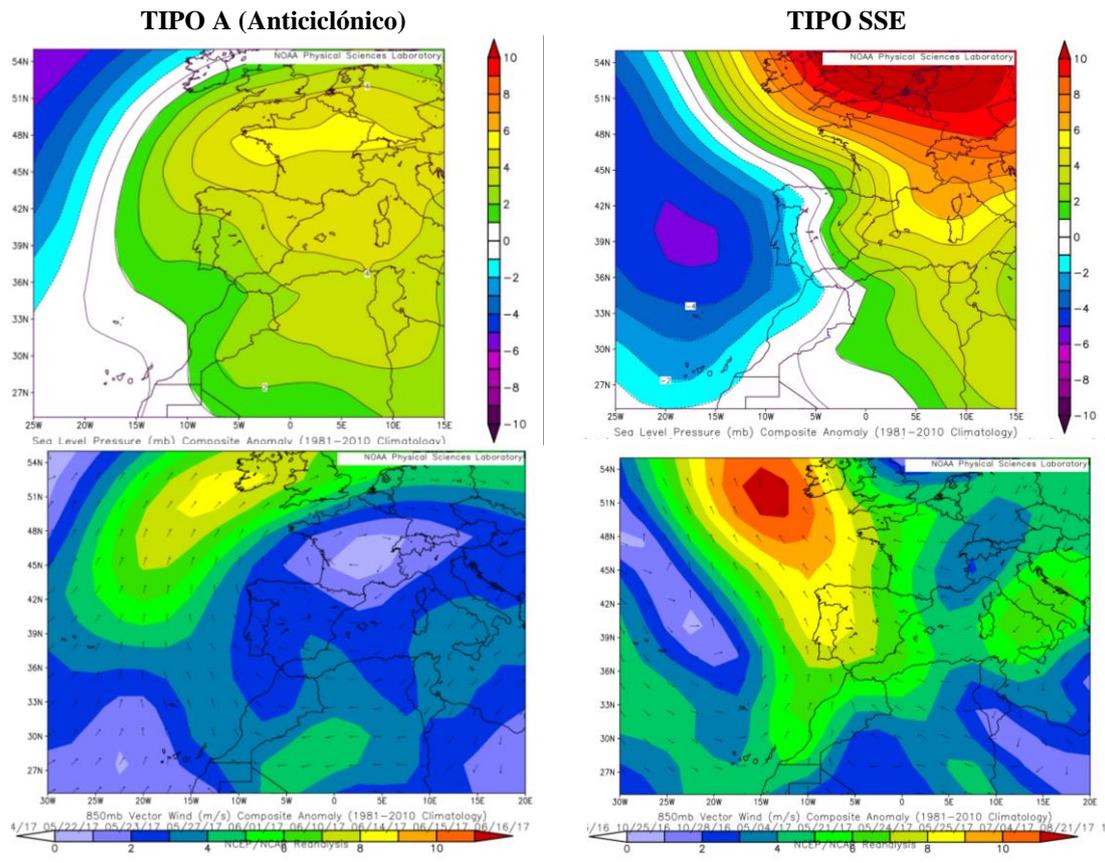


Figura 4.14. Anomalías de la presión a nivel del mar (columna izquierda) y dirección y velocidad del viento a 850 hPa en todas las situaciones Anticiclónicas y SSE que han generado intrusiones saharianas sobre Niembro, carga de polvo sahariano según tipo de circulación.

Fuente: NOAA PSL, 2022.

4.3. IMPACTO DE LAS INTRUSIONES SAHARIANAS EN CANTABRIA

Una vez analizadas las principales características de las intrusiones saharianas sobre los niveles de PM_{10} de la estación de Niembro, queda por determinar el impacto que tienen estos episodios sobre los niveles de material particulado en las estaciones de calidad del aire de la Comunidad de Cantabria. Para ello, a los valores diarios de PM_{10} en cada estación le será sustraído el valor de la aportación sahariana (descuento) correspondiente a ese día en Niembro, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\Delta\% = \frac{PM_{10} \text{ medido} - PM_{10} \text{ aportación sahariana}}{PM_{10} \text{ medido}} * 100$$

La aportación sahariana a los niveles de PM_{10} de Cantabria es modesta (Tabla 4.2), oscilando entre un máximo del 15% en Los Tojos y un mínimo del 6% en Cros. Ese valor

está en relación con la baja frecuencia de intrusiones y con la modesta carga de material particulado sahariano señalada en líneas anteriores. La diversidad geográfica está en relación no tanto con la posición de la estación (aunque las dos más meridionales tienen los porcentajes más altos) sino con los niveles medios de PM_{10} , a su vez relacionados con los aportes antrópicos, de tal manera que allí donde los valores de PM_{10} son más altos (por proximidad al tráfico o zona industrial), las variaciones relativas son menores.

Tabla 4.2. Porcentaje que representa la aportación sahariana sobre los niveles medios de PM_{10} en cada localidad

ESTACIÓN	%	ESTACIÓN	%
Castro Urdiales	9,07	Escuela de Minas	8,05
Santander Centro	6,54	Zapadón	7,57
Santander Tetuán	7,27	Los Corrales	6,91
Cros	6,03	Los Tojos	15,49
Guarnizo	6,54	Reinosa	11,33
Barreda	6,32		

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

Donde sí se observa un impacto notable de las intrusiones saharianas, ya mencionado también en líneas anteriores, es en los episodios de superación de los valores límite, siguiendo lo ya examinado para Niembro. En el cuadro 4.3 (Tabla 4.3) se muestra la frecuencia de días con superación del umbral de $50 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ sin y con intrusión en Cantabria, según el número de estaciones que registraron la superación simultáneamente. Los episodios con superaciones puntuales (que afectan a menos del 25% de las estaciones simultáneamente) ocurren sobre todo durante días en los que no se registra intrusión, y que podemos atribuir a episodios locales ligados a las actividades humanas y a una baja capacidad dispersiva de la atmósfera. Por el contrario, son las intrusiones saharianas las que provocan un mayor número de episodios de superación generalizadas (más del 50% de las estaciones).

Tabla 4.3 Frecuencia de días con superación del umbral 50 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ sin y con intrusión en Cantabria

	SIN INTRUSIÓN	CON INTRUSIÓN
< 25 % de las estaciones	78	40
25-50 % de las estaciones	9	9
> 50% de las estaciones	4	8

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO, 2020.

4.4. ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN EVENTO DE INTRUSIÓN DE POLVO SAHARIANO EN CANTABRIA

Como evento representativo de las condiciones atmosféricas más habituales que propician la llegada de material particulado de origen sahariano a Cantabria se ha elegido el episodio que se desarrolló a finales de marzo de 2021. Aunque no se incluye en el período temporal estudiado, de acuerdo con la información manejada, la cantidad de material particulado de origen sahariano que registró la estación de Niembro lo situaría entre los 10 eventos más potentes del último quinquenio. La potencia de la advección sahariana elevó los niveles de PM_{10} en toda la comunidad de Cantabria por encima del valor límite establecido por la legislación ($50 \mu\text{gr}/\text{m}^3$) en la mayoría de las estaciones de la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire en Cantabria.

De acuerdo con la información proporcionada por el visor del MITECO (MITECO, 2021b) (Fig. 4.15), la advección sahariana afectó mayoritariamente a la mitad occidental de la península ibérica (fundamentalmente Asturias, Galicia, Castilla y León, Castilla la Mancha y Andalucía), dónde se concentraron la mayoría de las superaciones del umbral de $50 \mu\text{gr}/\text{m}^3$. En la mitad oriental la calidad del aire fue sustancialmente mejor, salvo en estaciones urbanas (Zaragoza, Barcelona).



Figura 4.15. Valor diario en las estaciones de PM₁₀ en España

Fuente: MITECO, 2021b.

En Cantabria, las estaciones más afectadas por la intrusión sahariana fueron las situadas cerca de la costa. Así, los valores más elevados fueron registrados en la estación de Santander-Centro (un promedio diario de 82 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ tanto el día 30 de marzo como el 1 de abril) y en la de Tetuán (65 y 74 respectivamente). Las situadas en Torrelavega también registraron valores muy elevados (en Barreda se registraron 70, 75 y 77 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ entre los días 30 de marzo y 1 de abril). Llama la atención además que, en este caso, las estaciones ubicadas al S de la Comunidad (Los Tojos y sobre todo Reinosa) experimentaron valores inferiores a los del resto de estaciones (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Niveles registrados de PM₁₀ en las estaciones de Cantabria durante el evento de intrusión del 31 de marzo de 2021

Fecha	Reinosa	Los Tojos	Corrales de Buelna	Escuela de Minas	Parque Zapatón	Barreda
29/03/2021	29	26	30	33		46
30/03/2021	41	40	41	54	58	70
31/03/2021	45	35	50	55	64	75
01/04/2021	40	68	57	56	64	77
02/04/2021	49	50	55	53	56	63
03/04/2021	36	41	37	38	40	47
Fecha	Guarnizo	Cros	Santander Centro	Tetuán	Castro Urdiales	
29/03/2021	32	44	51	49	30	
30/03/2021	54	56	82	65	40	
31/03/2021	41	55	55	50	39	
01/04/2021	64	74	82	74	43	
02/04/2021	46	49	58	62	47	
03/04/2021	34	29	37	43	32	

Fuente: elaboración propia a partir de datos del MITECO,2020.

El análisis de la evolución horaria de la concentración de PM₁₀ en algunas de las mencionadas estaciones (Fig. 4.16) muestra que, de hecho, este episodio se compuso de dos intrusiones diferentes, separadas por un hiato intermedio. La primera tuvo lugar a lo largo de la tarde-noche del día 30 de marzo, con un máximo horario de 179 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ a las 21 horas en la estación de Santander-Centro y de 134 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ en Barreda dos horas antes. La segunda intrusión tuvo lugar casi simultáneamente durante la madrugada del día 4, alcanzándose 131 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ en Santander a las 8 de la mañana, y 115 en Barreda a las 9. Esta intrusión si tuvo efecto en Los Tojos, aunque ligeramente adelantada, ya que el máximo se produjo a las 6 de la mañana y con valores superiores a los de las restantes estaciones: 149 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$.

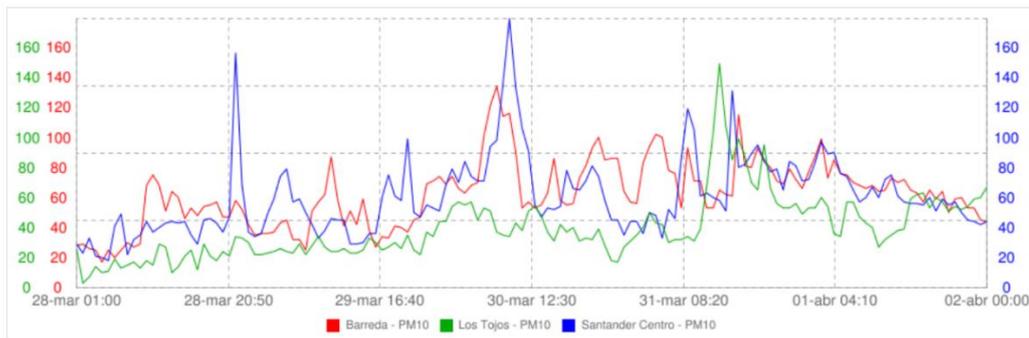


Figura 4.16. Concentración media de partículas PM₁₀ en las estaciones de Barreda, Santander-Centro y Los Tojos durante el período 28 de marzo 2021-2 de abril 2021
 Fuente: CIMA, 2022.

La circulación atmosférica que favoreció esta intrusión de aire sahariano siguió el patrón establecido en líneas anteriores (Fig. 4.17). A partir del mapa de presión atmosférica a nivel del mar, se observa que la mitad occidental de la península ibérica estuvo ocupada por un área de bajas presiones, que enlazaba con una depresión de origen térmico en el norte de África. Sobre el océano Atlántico se situó el anticiclón de las Azores, enlazando con otro anticiclón en Europa Central. Este dispositivo bloqueó el movimiento de las bajas presiones desde el Atlántico hasta la península ibérica, y favoreció el estancamiento de las bajas presiones sobre la península ibérica.

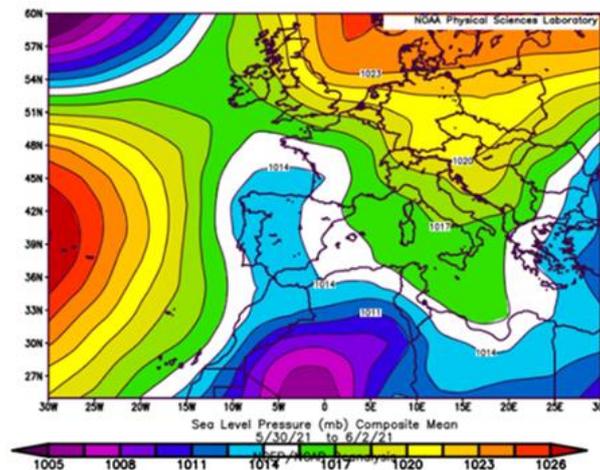


Figura 4.17. Mapa de presión atmosférica a nivel del mar durante el día 31 de marzo de 2021
 Fuente: NOAA PSL, 2022.

Como consecuencia de esta configuración sinóptica, los vientos predominantes fueron de componente S en la mitad occidental de la península ibérica, propiciando la entrada de aire procedente del Sahara a lo largo de la costa de Marruecos, mostrando una clara correspondencia con el patrón espacial de PM₁₀ (Fig. 4.18). Igualmente, el mapa de la

temperatura del aire a 850 hPa muestra la lengua de aire cálido proveniente del norte de África, impulsada por los vientos de componente sur. Las altas temperaturas ($285^{\circ}\text{K} = 11,85^{\circ}\text{C}$) alcanzaron Francia, evidencia de la potencia de este evento.

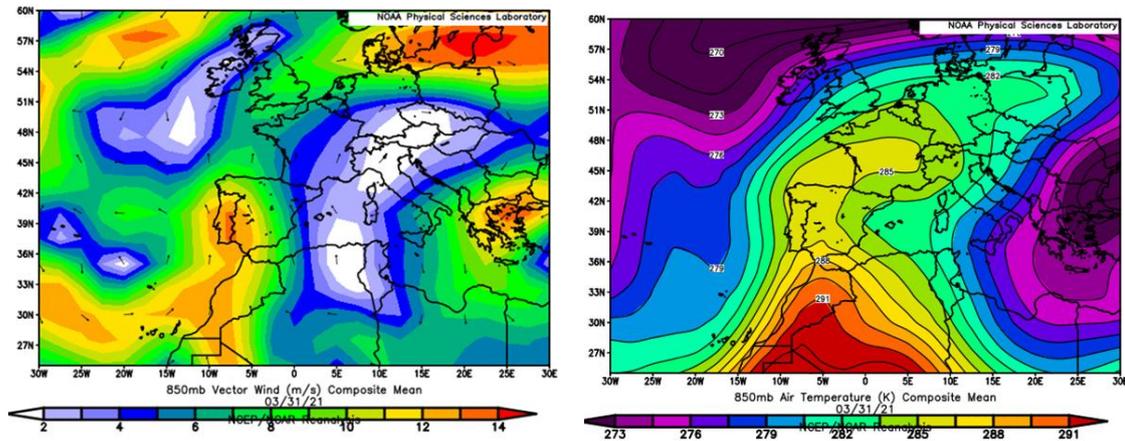


Figura 4.18. Dirección y velocidad del viento a 850 hPa y temperatura del aire a 850 hPa el día 31 de marzo de 2021
Fuente: NOAA PSL, 2022.

El sondeo termodinámico de Santander efectuado a mediodía del día 31 (Fig. 4.19) sugiere que la potente llegada de aire sahariano se produjo en los niveles bajos de la atmósfera. Por debajo de los 3.000 m, la humedad relativa de esa masa de aire no superaba el 30%, con un mínimo del 19% en torno a los 200 m de altura. Esta masa de aire sahariano estaba recubierta por una masa de aire más fresca y, sobre todo, más húmeda, alcanzando valores próximos a 83% a 5.500 m de altura. Los vientos tuvieron una componente sur dominante en todos los niveles de la atmósfera, rolando del SSW en superficie al SSE en niveles medios.

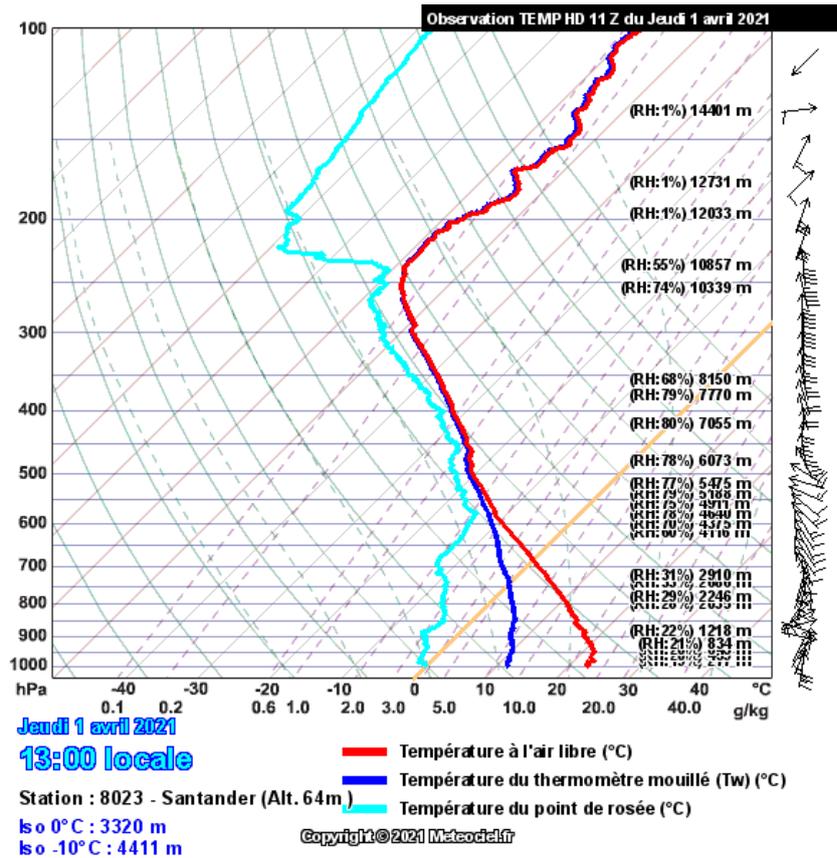


Figura 4.19. Sondeo termodinámico 1 de abril 2021 en Santander

Fuente: https://www.meteociel.fr/cartes_obs/sondage_display.php?id=8023&date=1644836400.

Este tipo de circulación, muy propicia a la entrada de masas de aire cálidas con abundante carga de material particulado, forma parte de un tipo de tiempo característico de la Cornisa Cantábrica, las “suradas”, vinculado al conocido “efecto föhn” (Rasilla, 1999).

El origen del material registrado el día 31 de marzo de 2021 es fundamentalmente africano, como confirman tanto las retrotrayectorias como las imágenes de satélite. En relación a las retrotrayectorias, el modelo HYSPLIT muestra claramente la procedencia norte africana de las partículas de esa masa de aire, que realizaron un largo recorrido atravesando las áreas desérticas del Sahara antes de alcanzar la península ibérica (Fig. 4.20). Obsérvese como esa masa de aire, situada inicialmente a gran altura, tuvo que descender hacia la superficie para recoger allí el material particulado, que sería transmitido desde la superficie gracias a su intenso calentamiento (producto del cual sería la baja térmica en el norte de África), siendo posteriormente redirigido hacia la Península Ibérica por la circulación atmosférica.

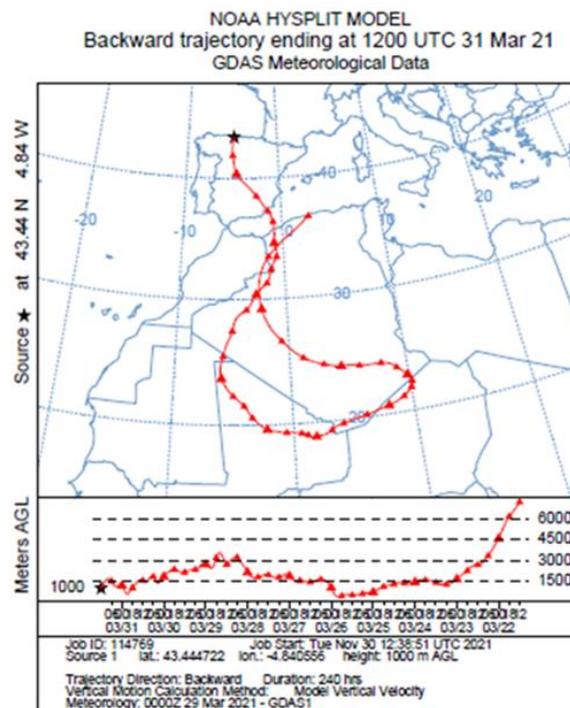


Figura 4.20. Retrotrayectoria (240 horas) correspondiente a 6.000 m (22 de marzo de 2021-31 de marzo de 2021)
Fuente: NOAA ARL, 2022.

La imagen de satélite confirma que la intrusión afectó a la mitad occidental y septentrional de la península ibérica, mientras que el arco mediterráneo no se vio perjudicado ante este fenómeno, en correspondencia con los niveles registrados en las estaciones de superficie proporcionados por el visor de la NASA (Fig. 4.21).

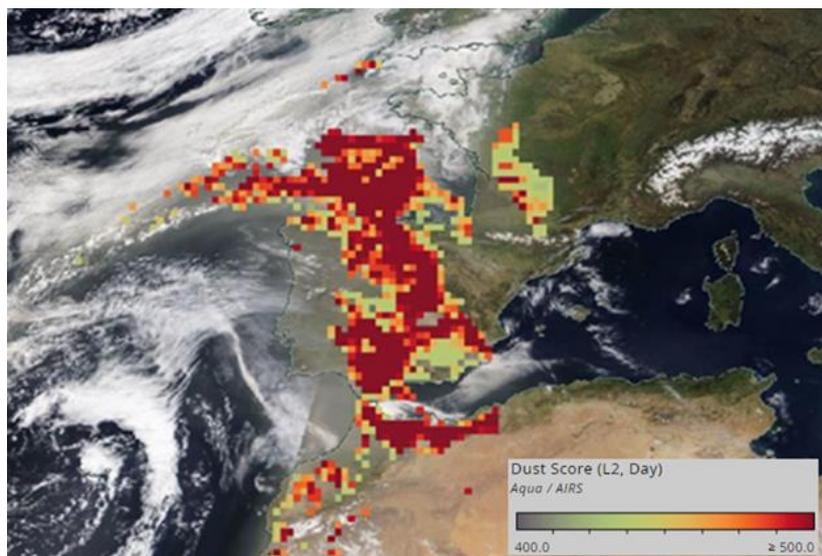


Figura 4.21. Niveles de polvo atmosférico el 31 de marzo de 2021
Fuente: NASA, 2021.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo ha sido el análisis de las intrusiones saharianas en el N de la península ibérica y su impacto específico en la calidad del aire de Cantabria. Para ello se ha analizado la serie de intrusiones saharianas registradas en la estación de Niembro, complementadas con datos procedentes de la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire de Cantabria y con una clasificación de tipos de circulación.

Los principales resultados son:

- Los niveles de PM₁₀ en Cantabria son similares a los de provincias vecinas con condiciones climáticas similares, detectándose orígenes diferentes (naturales o antrópicos) en función de la proximidad o lejanía a las principales fuentes regionales de contaminación. Su evolución en el tiempo también está estrechamente ligada a las condiciones atmosféricas, siendo la precipitación la variable climática que muestra una relación más directa, mientras que el viento actúa de manera ambivalente en función de su dirección y procedencia.
- Se ha detectado una posible anomalía en el registro oficial de intrusiones saharianas en la serie histórica de Niembro en el año 2013. Esta circunstancia ha limitado el periodo de análisis al 2015-2020. La confirmación de esta anomalía y posible identificación de sus causas se deja para un análisis posterior.
- El número de intrusiones registradas en el área de estudio es de unos 39 días al año (11%), un valor relativamente bajo en comparación con el resto de España.
- La mayoría de las intrusiones que alcanzan la costa N de España son poco intensas, observándose una aportación media adicional a los niveles de base del orden de 5 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$.
- Si bien la frecuencia de intrusiones es mayor en los meses estivales, los episodios más intensos se registran a finales del invierno y comienzo de la primavera.
- Aunque los niveles de PM₁₀ se elevan durante los episodios de intrusión con respecto a los días sin intrusión, su reducida aportación impide que alcancen valores excepcionales en las estaciones de Cantabria. No obstante, se ha comprobado que los episodios generalizados de superación de los umbrales son causados por intrusiones saharianas, mientras que los episodios localizados suelen responder a condiciones de falta de ventilación atmosférica que incrementan los niveles de partículas de procedencia antrópica.

- La mayoría de los episodios de intrusión sahariana corresponden a situaciones anticiclónicas, pero los más potentes suelen contemplar una circulación del SSE y SW, en la que una borrasca atlántica, bien frente a Galicia, o bien en el Golfo de Cádiz, proporciona la rotación necesaria del aire para desencadenar la llegada de estas advecciones.

REFERENCIAS

- AEMET (2021). *Vigilancia nacional del medio ambiente atmosférico*. Gobierno de España; Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Disponible, en febrero de 2022, en: http://www.aemet.es/es/idi/medio_ambiente/vigilancia
- Aldabe, B.; Anderson, R.; Lyly-Yrjänäinen, M.; Parent-Thirion, A.; Vermeulen, G.; Kelleher, C.C.; Niedhammer, I. (2011). Contribution of material, occupational, and psychosocial factors in the explanation of social inequalities in health in 28 countries in Europe. *J. Epidemiol. Community Health*, 65(12): 1123-1131. doi:[10.1136/jech.2009.102517](https://doi.org/10.1136/jech.2009.102517).
- Alonso Pérez, S. (2007). *Caracterización de las intrusiones de polvo africano en Canarias*. La Laguna: Universidad de la Laguna, Departamento de Física Básica, Tesis Doctoral. URI: <http://hdl.handle.net/20.500.11765/2091>
- Boldo Pascua, E.I. (2012). *Efecto de la exposición a PM_{2.5} sobre la mortalidad: evaluación del impacto de las políticas públicas en la salud*. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid, Departamento de Medicina Preventiva y Salud Pública, Tesis Doctoral. URI: https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/11214/55964_Tesis_Elena%20Boldo.pdf?sequence=1
- CIMA (2022). *Red de calidad del aire de Cantabria*. Santander: Gobierno de Cantabria; Consejería de Desarrollo Rural, Ganadería, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente; Centro de Investigación del Medio Ambiente (CIMA). Disponible, en febrero de 2022, en: <https://airecantabria.com/historico.php>
- Darwin, C. (1845). An account of the Fine Dust which often falls on Vessels in the Atlantic Ocean. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 2: 26-30. doi:[10.1144/GSL.JGS.1846.002.01-02.09](https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1846.002.01-02.09)
- Decreto 50/2009, de 18 de junio, por el que se regula el control de la contaminación atmosférica industrial en la Comunidad Autónoma de Cantabria. Boletín Oficial de Cantabria, nº 125, de 1 de julio: 8860-8872. Disponible, en febrero de 2022, en: <https://boc.cantabria.es/boces/verAnuncioAction.do?idAnuBlob=154079>
- Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Diario Oficial de la Unión Europea, nº 152, de 11 de junio de 2008 (DOUE-L-2008-81053). Disponible, en febrero de 2022, en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2008-81053>
- EEA (2020). *Annual concentrations of PM₁₀ in 2018*. København: European Environment Agency (EEA). Disponible, en febrero de 2022, en: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/annual-mean-pm10-concentrations-in-3>
- Finlayson-Pitts, B.J.; Hemminger, J.C. (2000). Physical Chemistry of Airborne Sea Salt Particles and Their Components. *J. Phys. Chem. Society A.*, 104(49) 11463-11477. doi:[10.1021/jp002968n](https://doi.org/10.1021/jp002968n)

- Fernández, F.; Rasilla, D. (2001). Secular Variations of the Synoptic Circulation over the Iberian Peninsula. In: Brunet India, M.; López Bonillo, D. (Eds.). *Detecting and Modelling Regional Climate Change*. Berlin, Heidelberg: Springer, Chapter 20: 229-238. doi:[10.1007/978-3-662-04313-4_20](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04313-4_20)
- Grantz, D.A.; Garner, J.H.B.; Johnson, D.W. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29(2-3): 2013-239. doi:[10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)
- IGN (2021). *Atlas Nacional de España*. Madrid: Gobierno de España: Instituto Geográfico Nacional (IGN). Disponible en febrero de 2022, en: <https://www.ign.es/web/ign/portal/ane-area-ane>
- Inche, J.L. (2004). *Gestión de la calidad del aire: causas, efectos y soluciones*. Lima: Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial-UNMSM.
- HEI (2018). *State of Global Air 2018. A special report on global exposure to air pollution and its disease burden*. Boston: Health Effects Institute (HEI). Disponible, en febrero de 2022, en: <https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga-2018-report.pdf>
- Méndez, J.F.; Pinto-Herrera, L.C.; Belalcázar-Cerón, L.C. (2018). Estudio de una intrusión de polvo sahariano en la atmósfera de Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32): 17-34. doi:[10.22395/rium.v17n32a1](https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a1)
- METEOCIEL. Archives des observations d'altitude par radiosondage. Disponible, en febrero de 2020, en <https://www.meteociel.fr/observations-meteo/sondage.php?map=1&archive=1&jour=14&mois=2&annee=2022&heure=12>.
- MITECO (2019). *I Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica*. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), Dirección General de Biodiversidad y Calidad Ambiental. Disponible, en febrero de 2022, en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/primerpncca_2019_tcm30-502010.pdf
- MITECO (2020). *Evaluación y datos de calidad del aire. Histórico de Informes de Episodios Naturales*. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), Calidad y evaluación Ambiental, Atmósfera y calidad del aire. Disponible, en febrero de 2022, en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/evaluacion-datos/fuentes-naturales/anuales.aspx>
- MITECO (2021a). *Inventario Nacional de Contaminantes Atmosféricos*. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Disponible, en febrero de 2022, en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/Inventario-Contaminantes.aspx>
- MITECO (2021b). Visor de la Calidad del Aire. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), Calidad y evaluación Ambiental, Atmósfera y calidad del aire. Disponible, en febrero de 2022, en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/visor/>

- NASA (2021). *Worldview. Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS)*. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration (NASA). Disponible, en febrero de 2022, en: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
- NOAA ARL (2022). *HYSPLIT*. Oak Ridge (Tennessee): National Oceanic and Atmospheric Administration, Air Resources Laboratory (NOAA ARL). Disponible, en febrero de 2022, en: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>
- NOAA PSL (2022). *Daily Mean Composites*. Boulder (Colorado): National Oceanic and Atmospheric Administration, Physical Sciences Laboratory (NOAA PSL). Disponible, en febrero de 2022, en: <https://psl.noaa.gov/data/composites/day/>
- OMS (2019). *Presencia de la OMS en los países, territorios y zonas. Informe de 2019: resumen de orientación*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud (OMS) (WHO/CCU/19.06). URI: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/324774/WHO-CCU-19.06-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Oyarzún G.M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 26(1): 16-25. doi:[10.4067/S0717-73482010000100004](https://doi.org/10.4067/S0717-73482010000100004).
- Pandolfi, M.; Ripoll, A.; Querol, X.; Alastuey, A. (2014). Climatology of aerosol optical properties and black carbon mass absorption cross section at a remote high-altitude site in the western Mediterranean Basin. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(12): 6443-6460. doi:[10.5194/acp-14-6443-2014](https://doi.org/10.5194/acp-14-6443-2014).
- Prospero, J.M. (1996). Saharan Dust Transport Over the North Atlantic Ocean and Mediterranean: An Overview. In: Guerzoni, S.; Chester, R. (Eds.). *The Impact of Desert Dust Across the Mediterranean*. Dordrecht: Springer Netherlands, Environmental Science and Technology Library, 11: 133-151. doi:[10.1007/978-94-017-3354-0_13](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3354-0_13)
- Querol, X.; Alastuey, A.; Moreno, T.; Viana M.M.; Castillo, S.; Pey, J.; Rodríguez, S.; Artiñano, B.; Salvador, P.; Sánchez, M.; Garcia do Santos, S.; Hecce Garraleta, M.D.; Fernández-Patier, R.; Moreno-Grau, S.; Negral, L.; Minguillón, M.C.; Monfort, E.; Sanz, M.J.; Palomo-Marín, R.; Pinilla-Gil, E.; Cuevas, E.; Rosa, J. de la; Sánchez de la Campa, A. (2008). Spatial and temporal variations in airborne particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) across Spain 1999-2005. *Atmospheric Environment*, 42(17): 3694-3979. doi:[10.1016/j.atmosenv.2006.10.071](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.071)
- Querol, X.; Alastuey, A.; Viana, M.M.; Rodríguez, S.; Artiñano, B.; Salvador, P.; Garcia do Santos, S.; Fernandez Patier, R.; Ruiz, C.R.; Rosa, J. de la; Sanchez de la Campa, A.; Menendez, M.; Gil, J.I. (2004). Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in Spain. *Journal of Aerosol Science*, 35(9): 1151-1172. doi:[10.1016/j.jaerosci.2004.04.002](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.04.002)
- Querol, X.; Pey, J.; Pandolfi, M.; Alastuey, A.; Cusack, M.; Pérez, N.; Moreno, T.; Viana, M.; Mihalopoulos, N.; Kallos, G.; Kleanthous, S. (2009). African dust contributions to mean ambient PM₁₀ mass-levels across the Mediterranean Basin. *Atmospheric Environment*, 43(28): 4266-4277. doi:[10.1016/j.atmosenv.2009.06.013](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.013)

- Querol, X.; Viana, M.M.; Alastuey, A.; Moreno, T.; González, A.; Pallarés, M.; Jiménez, S. (2014). *Niveles, composición y fuentes de PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ en España: Cantabria, Castilla León, Madrid y Melilla*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, S.D.G. de Calidad del Aire y Medio Ambiente Industrial. Disponible, en febrero de 2022, en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informe_completo2007_tcm30-187949.pdf
- Rasilla Álvarez, D.F. (1999). *Viento sur y efecto föhn en la Cornisa Cantábrica: impactos climáticos regionales*. Madrid: CEDEX.
- Rodríguez, S.; Querol, X.; Alastuey, A.; Kallos, G.; Kakaliagou, O. (2001). Saharan dust contributions to PM₁₀ and TSP levels in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment*, 35: 2433-2447.
- Salvador Martínez, P. (2005). *Caracterización de la contaminación atmosférica producidas por partículas en suspensión en Madrid*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I, Tesis Doctoral. Disponible, en febrero de 2022, en: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/5402/1/T27355.pdf>
- Santos Santos, Fabián (2015). *Análisis de los niveles de PM₁₀ en las estaciones de fondo regional de la Comunidad Valenciana; aplicación metodológica para la obtención de la carga neta del polvo sahariano* Elche: Universidad Miguel Hernández, Grado en Ciencias Ambientales. Disponible, en febrero de 2022, en <http://dspace.umh.es/handle/11000/2717>.
- Seoánez, M. (2002). *Tratado de la contaminación atmosférica: Problemas, tratamiento y gestión*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Stone, R (2002). Counting the Cost of London's Killer Smog. *Science*, 298(5601): 2106-2107. doi:[10.1126/science.298.5601.2106b](https://doi.org/10.1126/science.298.5601.2106b).
- Vallero, D. (2008). *Fundamentals of Air Pollution*. Amsterdam: Academic Press.
- Viana, M. (2003). *Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias*. Barcelona: Universidad de Barcelona, Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Tesis Doctoral. URI: <http://hdl.handle.net/10261/27476>
- Warneck, P. (1998). *Chemistry of the natural atmosphere*. Cambridge (Massachusetts): Academy Press, International Geophysics Series, Vol. 41.
- Washington, R.; Todd, M.C.; Engelstaedter, S.; Mbainayel, S.; Mitchell, F. (2006). Dust and the low-level circulation over the Bodélé Depression, Chad: Observations from BoDEx 2005. *Journal of Geophysical Research*, 111, D03201. doi:[10.1029/2005jd006502](https://doi.org/10.1029/2005jd006502).
- World Bank (2016). *The Cost of Air Pollution. Strengthening the Economic Case for Action*. Washington, D.C.: World Bank Group; Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). URI:

<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/25013/108141.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

WHO (2021) *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneve: World Health Organization. URI: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1.1.	Distribución del número de partículas con respecto al diámetro	7
Figura 1.2.	Concentraciones anuales de PM ₁₀ en Europa en 2018	9
Figura 1.3.	Niveles de PM ₁₀ registrados en diferentes estaciones EMEP en la península ibérica	10
Figura 3.1.	Ámbito del área de estudio	14
Figura 3.2.	Estaciones meteorológicas seleccionadas en Cantabria: Santander, Mirones, Tama y Reinosa	15
Figura 3.3.	Vientos predominantes en las estaciones meteorológicas seleccionadas en Cantabria: Santander, Villacarriedo, Tama y Reinosa	16
Figura 3.4.	Instrumentos para la toma de muestras de precipitación y aerosoles en la estación de la red EMEP/VAG/CAMP situada en Niembro (Asturias)	17
Figura 3.5.	Estaciones de Calidad del Aire en Cantabria, 2021	17
Figura 3.6.	Ejemplo de cálculo de la aportación sahariana	19
Figura 4.1.	Valores medios anuales de PM ₁₀ en Cantabria y regiones limítrofes	21
Figura 4.2.	Régimen mensual PM ₁₀ en el área de Santander, 2020	22
Figura 4.3.	Régimen mensual PM ₁₀ en el área de Torrelavega, 2020	22
Figura 4.4.	Régimen mensual PM ₁₀ en el resto de las estaciones, 2020	23
Figura 4.5.	Evolución mensual del PM ₁₀ en Cros con los datos de precipitación y viento de Parayas entre 2015-2020	24
Figura 4.6.	Rosas de contaminación en Cantabria correspondientes al PM ₁₀	25
Figura 4.7.	Evolución de los días con intrusiones saharianas (2009-2020) en la estación de Niembro	27
Figura 4.8.	Evolución anual en el número de días de intrusión sahariana y en la aportación de PM ₁₀ y PM _{2,5} correspondiente a esos días	27
Figura 4.9.	Valor medio diario de PM ₁₀ en Niembro en días con y sin intrusión	28
Figura 4.10.	Intensidad diaria de las intrusiones saharianas en Niembro	28
Figura 4.11.	Promedios mensuales en el número de días de intrusión sahariana y en la aportación de PM ₁₀ correspondiente al período 2015-2020	29
Figura 4.12.	Frecuencia intrusiones saharianas en relación con los tipos de circulación sinóptica	31
Figura 4.13.	Carga de polvo sahariano según tipo de circulación	32
Figura 4.14.	Anomalías de la presión a nivel del mar (columna izquierda) y dirección y velocidad del viento a 850 hPa en todas las situaciones Anticiclónicas y SSE que han generado intrusiones saharianas sobre Niembro	33
Figura 4.15.	Valor diario en las estaciones de PM ₁₀ en España	36

Figura 4.16.	Concentración media de partículas PM ₁₀ en las estaciones de Barreda, Santander-Centro y Los Tojos durante el período 28 de marzo 2021-2 de abril 2021	38
Figura 4.17.	Mapa de presión atmosférica a nivel del mar durante el día 31 de marzo de 2021	38
Figura 4.18.	Dirección y velocidad del viento a 850 hPa y temperatura del aire a 850 hPa el día 31 de marzo de 2021	39
Figura 4.19.	Sondeo termodinámico 1 de abril 2021 en Santander	40
Figura 4.20.	Retrotrayectoria (240 horas) correspondiente a 6000 m (22 de marzo de 2021-31 de marzo de 2021)	41
Figura 4.21.	Niveles de polvo sahariano el 31 de marzo de 2021	41
Tabla 1.1.	Valores límite legislados, para las partículas PM ₁₀ en aire ambiente, por la Directiva Europea	11
Tabla 1.2.	Valores límite establecidos, para las partículas PM ₁₀ en aire ambiente, por la Organización Mundial de la Salud	12
Tabla 3.1.	Estaciones calidad del aire en Cantabria	18
Tabla 4.1.	Coefficiente de Pearson para los parámetros meteorológicos en relación con los días de intrusión	30
Tabla 4.2.	Porcentaje que representa la aportación sahariana sobre los niveles medios de PM ₁₀ en cada localidad	34
Tabla 4.3.	Frecuencia de días con superación del umbral 50 µgr/m ³ sin y con intrusión en Cantabria	35
Tabla 4.4.	Niveles registrados de PM ₁₀ en las estaciones de Cantabria durante el evento de intrusión del 31 de marzo de 2021	37