



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS

FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES

EFFECTO DE LAS MEDIDAS ADOPTADAS COMO CONSECUENCIA DE LA
COVID-19 EN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA:

Análisis en la Comunidad Autónoma de Cantabria

Autor: Eugenia Martínez Lucia

5º E-3 Analytics

Tutor: Manuel Alejandro Betancourt Odio

Madrid | Junio 2023

Antonio Gasparrini

Catedrático de Bioestadística y Epidemiología en la *Lonson School of Hygiene & Tropical Medicine*

*“El confinamiento durante la primera ola de la pandemia de COVID19 generó inmensos costes sanitarios y sociales, pero sin embargo también ha permitido que se dieran **condiciones únicas para investigar los potenciales efectos de unas políticas estrictas para reducir los niveles de contaminación en las áreas urbanas.** Este 'experimento natural' ha sido un atisbo de cómo puede **mejorarse la calidad del aire con drásticas medidas de salud pública** que serían difíciles de aplicar en épocas normales. La información puede ser importante para diseñar **políticas eficaces con las que resolver el problema de la contaminación en nuestras ciudades.**”*

AGRADECIMIENTO

Quería expresar mi profundo y sincero agradecimiento a mi tutor de Trabajo de Fin de Grado, Alejandro Betancourt, por permitirme realizar junto a él este proyecto del que tanto he aprendido. No solo ha comprendido mi situación personal en momentos difíciles, si no que ha sido siempre el primero en apoyarme y darme el soporte que necesitaba. Gracias por guiarme, orientarme y enseñarme. Sin duda, me ha impulsado a analizar críticamente y aportar mi grano de arena.

RESUMEN

Este trabajo lleva a cabo un análisis e investigación acerca de los niveles de contaminación de los contaminantes NO₂, O₃ y PM₁₀ en la Comunidad Autónoma de Cantabria (España) durante el periodo temporal de 2012 hasta 2022. Está demostrado que la contaminación tiene efectos nocivos, no solo en la salud de los seres humanos, sino también en la fauna, la flora y los demás ecosistemas que habitan en la Tierra. Por ello, las autoridades competentes de muchos países han desarrollado y comenzado a implementar medidas para reducir los niveles de contaminación y, de tal forma, no superar los niveles establecidos por la legislación y recomendados por organización internacionales como la OMS. No obstante, la eficacia de dicha medidas se puede poner en duda. El periodo de tiempo elegido brinda la oportunidad de analizar si existe una relación y, en caso afirmativo, en qué medida, entre, por un lado, las actividades humanas, industriales, económicas y la movilidad y, por el otro lado, la calidad del aire. Durante los meses de marzo a junio de 2020 se impusieron estrictas medidas restrictivas y limitativas de contención como consecuencia de la pandemia generada por el virus Covid-19 para frenar su expansión y los contagios. Para ello se ha utilizado un modelo de regresión lineal múltiple y los resultados, además de ser analizados numéricamente, se han visualizado gráficamente a través de mapas de zonificación. De este modo, el objetivo de este análisis es esclarecer comprobar si diversas variables que se ha decidido evaluar incluyéndolas en el modelo como el confinamiento, las condiciones meteorológicas, el efecto del fin de semana y las fuentes naturales tienen influencia real sobre los niveles de contaminación de las partículas examinadas en Cantabria. También se exponen las posibles causas y los patrones de comportamiento que se observan. En conclusión, este trabajo puede servir para poder mejorar la eficiencia de las medidas adoptadas para mejorar la calidad del aire de la Comunidad Autónoma de Cantabria, dado que los resultados obtenidos demuestran un claro descenso de NO₂ y PM₁₀. Excepcionalmente, el O₃ incrementó durante el periodo temporal evaluado.

PALABRAS CLAVE

Cantabria, Calidad del Aire, Contaminación, Clima, COVID-19, Contaminantes, Dióxido de nitrógeno, Ozono, Partículas, Confinamiento, Domingo, Polvo del Sáhara.

ABSTRACT

This work carries out an analysis and research on the pollution levels of NO₂, O₃ and PM₁₀ pollutants in the Autonomous Community of Cantabria (Spain) during the time period from 2012 to 2022. It has been demonstrated that pollution has harmful effects, not only on the health of human beings, but also on the fauna, flora and other ecosystems that inhabit the Earth. For this reason, the competent authorities in many countries have developed and begun to implement measures to reduce pollution levels so as not to exceed the levels established by legislation and recommended by international organizations such as the WHO. However, the effectiveness of such measures can be questioned. The chosen time period provides an opportunity to analyze whether and to what extent there is a relationship between human, industrial, economic and mobility activities, on the one hand, and air quality, on the other. During the months of March to June 2020, strict, restrictive, and limiting containment measures were imposed as a consequence of the pandemic generated by the Covid-19 virus in order to curb its spread and contagions. For this purpose, a multiple linear regression model has been used and the results, in addition to being analyzed numerically, have been visualized graphically through zoning maps. Thus, the objective of this analysis is to clarify whether several variables that have been evaluated by including them in the model, such as confinement, meteorological conditions, the weekend effect, and natural sources, have a real influence on the levels of particle contamination examined in Cantabria. Possible causes and observed patterns of behavior are also presented. In conclusion, this work may serve to improve the efficiency of the measures adopted to improve air quality in the Autonomous Community of Cantabria, since the results obtained show a clear decrease in NO₂ and PM₁₀. Exceptionally, O₃ increased during the time period evaluated.

KEY WORDS

Cantabria, Air Quality, Pollution, Climate, COVID-19, Contaminants, Nitrogen Dioxide, Ozone, Particulates, Confinement, Sunday, Sahara Dust.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I. ACTUALIDAD DEL TEMA	22
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	28
1. CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	28
2. FUENTE DE LOS DATOS	31
1.1. DATOS DE CALIDAD DEL AIRE	31
1.2. DATOS DEL CLIMA	31
1.3. DATOS SOBRE FUENTES NATURALES.....	36
3. MÉTODO DE ANÁLISIS	37
3.1. MODELO DE REGRESIÓN TEÓRICO	37
3.2. VISUALIZACIÓN DE DATOS CON TABLEAU	39
CAPÍTULO III. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	41
1. CONJUNTO DE DATOS	41
1.1. VARIABLE DEPENDIENTE: CONTAMINANTES	41
1.1.1. <i>Partículas PM10</i>	41
1.1.2. <i>Ozono (O3)</i>	42
1.1.3. <i>Dióxido de nitrógeno (NO2)</i>	44
1.2. VARIABLES INDEPENDIENTES	44
1.2.1. <i>Valores climatológicos</i>	45
1.2.2. <i>Lockdown</i>	46
1.2.3. <i>Fin de semana y festivos</i>	47
1.2.4. <i>Fuentes naturales</i>	48
2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS CON MATLAB.....	50
3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO ECONOMÉTRICO	53
4. ELABORACIÓN DE MAPAS DE ZONIFICACIÓN	54
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	56
1. ANÁLISIS NÚMÉRICO: TENDENCIAS DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN	56
2. ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS DATOS	63

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	77
1. ARTÍCULOS ACADÉMICOS.....	77
2. INFORMES	80
3. RECURSOS DE INTERNET	83
ANEXOS.....	87
1. RESULTADOS PARA LA REGRESIÓN PARA EL NO ₂ POR ESTACIÓN.....	87
2. RESULTADOS PARA LA REGRESIÓN PARA EL O ₃ POR ESTACIÓN	90
3. RESULTADOS PARA LA REGRESIÓN PARA EL PM ₁₀ POR ESTACIÓN.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de estaciones de contaminación.....	26
Figura 2. Localización de estaciones de clima	30
Figura 3. Pasos para el tratamiento de los datos	45
Figura 4. Efecto promedio por partícula contaminante de las variables independientes	51
Figura 5. Efecto promedio general de las variables independientes.....	51
Figura 6. Efecto de la intrusión del confinamiento en la contaminación	59
Figura 7. Efecto de la intrusión del domingo en la contaminación	62
Figura 8. Efecto de la intrusión del polvo del Sáhara en la contaminación	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de contaminantes	28
Tabla 2. Lista de las variables independientes empleadas en el modelo	38
Tabla 3. Resultados de la regresión por contaminante en Cantabria. Las columnas 3 y 5 representan el valor medio de los coeficientes estimados por los modelos de regresión de cada variable independiente (columna de variables independientes) en relación con cada variable dependiente (contaminante).	56

INTRODUCCIÓN

Actualmente no cabe duda de que la contaminación atmosférica es el principal riesgo ambiental para la salud pública y así lo ha establecido la Organización Mundial de la Salud (OMS). Acorde con el informe Cambio Global España 2020/50 las principales consecuencias sobre el ser humano son las enfermedades cerebrovasculares, cardiopatías, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas. Se estima que, como consecuencia de que en 2019 el 99% de la población mundial estuviese expuesta a niveles de contaminación del aire que superaban las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire (OMS, 2022), más de 4 millones de personas murieron de forma prematura (*Id.*). Sin embargo, la baja calidad del aire no solo tiene un efecto sobre este aspecto, sino que el informe Planeta Vivo del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) ha demostrado que, a lo largo de los últimos 40 años, la fauna tanto terrestre como marina se ha visto reducida en un 58% afectando tanto al hábitat como a la alimentación de los animales.

Tras la implementación de las primeras medidas para luchar contra la propagación de la COVID-19, conocida también como pandemia de coronavirus y decretada pandemia mundial por la OMS en 2020 por su alarmante y grave ratio de contagio y propagación, a día de hoy, en 2023, autoridades ambientales denuncian el retorno de la contaminación del aire a los niveles anteriores de la pandemia (Roca, 2021). Dichas medidas, basadas mayoritariamente en la prohibición de la movilidad y las actividades humanas diarias, propulsaron una disminución de las partículas que contribuyen a ensombrecer la calidad del aire.

España no es una excepción en este sentido. Acorde con los datos facilitados por el Sistema de Vigilancia de Calidad del aire, durante toda la etapa en la que se activaron medidas restrictivas para hacer frente a la pandemia, las concentraciones de las partículas contaminantes se encontraron bajo la categoría “muy buena” en la escala del índice de calidad del aire (Nacional Geographic España, 2022). Más notablemente, en las grandes ciudades españolas como Madrid y Barcelona, a los pocos días de decretar el estado de alarma el día 14 de marzo de 2020 e imponer el cese de actividades económicas no fundamentales, y en consecuencia la reducción de la movilidad de la población, se redujeron considerablemente los niveles de contaminación atmosférica (Alcalde, 2020). En un estudio publicado por el Centro de Tecnologías Físicas de la Universidad Politécnica de València

(UPV) el 24 y de marzo de 2020 sus investigadores calcularon la reducción de la contaminación del aire en España en un 64% de media.

Por lo tanto, resulta de extraordinario interés poder estudiar el efecto y comportamiento de las diferentes medidas adoptadas por las Comunidades Autónomas de España sobre los niveles de calidad del aire y su respectiva contaminación atmosférica. Así, como se ha demostrado que las alteraciones en las actividades diarias han tenido tal efecto en la limpieza de los cielos españoles, las estrategias, políticas y los planes tanto estatales como autonómicos o locales pueden poner su foco en medidas encaminadas a limitar dichas actividades para la eficaz reducción de los gases de efecto invernadero, también en cumplimiento de la normativa europea (Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021 por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifican los Reglamentos (CE) n.1 401/2009 y (UE) 2018/1999 («Legislación europea sobre el clima»)). Así, los actuales planes de acción durante episodios de alta contaminación (Conferencia Sectorial de Medio Ambiente, Ministerio de Transición Ecológica, 2021) que se han puesto en marcha en España para alcanzar dicho objetivo tienen mayoritariamente su foco en decisiones acerca de la movilidad sostenible y la disminución de las actividades industriales (Ministerio de Medio Ambiente, 2022). A nivel europeo, se adoptó en mayo de 2021 el Plan de Acción de Contaminación Cero que consiste en... *“reducir la contaminación del aire, el agua y el suelo a niveles que ya no se consideren perjudiciales para la salud y los ecosistemas naturales, que respeten los límites soportables para nuestro planeta y que creen así un medio ambiente libre de sustancias tóxicas”* (Comisión Europea, 2021).

Según el informe estatal “La contaminación por ozono en el Estado español durante 2022” elaborado por Ecologistas en Acción, el 99% de toda la población española ha estado expuesta durante el mencionado año a unos niveles francamente insalubres de ozono y que incumplen los límites delimitados por la OMS. El ozono (O₃) es uno de los contaminantes atmosféricos más complejos y dañinos cuya formación se gesta por la presencia de radiación solar en combinación con otros contaminantes que sí son emitidos por actividades humanas. Los ejemplos más destacables son el transporte de vehículos que utilizan diésel como combustible, las centrales termoeléctricas o las fábricas industriales.

Sin embargo, en el contexto de la contaminación atmosférica no solo hay que tener en cuenta el ozono como partícula contribuyente a dicha contaminación. Así, aunque sea uno

de los contaminantes con más relevancia e efecto en la medición de la calidad del aire, hay otros grupos de ellos que son muy nocivos tanto para la salud de las personas como para la superficie terrestre y que se encuentran en grandes concentraciones que superan con creces los estándares marcados por las autoridades competentes. Entre ellos, los más destacables, son el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO₂, NO_x), el monóxido de carbono (CO), las partículas volátiles y el material particulado (PM_x). Estos componentes encuentran su origen tanto en la acción humana como en los fenómenos naturales.

En este sentido, el satélite Copernicus Sentinel-5P capta y monitoriza la concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), cuya fuente es el tráfico y la quema de combustibles fósiles durante procesos industriales. Dicho contaminante se vio reducido en un 45% entre febrero de 2019 y febrero de 2020, es decir, justo cuando se implementaron las medidas más restrictivas de movilidad y actividad económica (Zehner, 2021). España se considera uno de los países que más se ha beneficiado por dicha reducción, alcanzando una ésta un máximo puntual alrededor del 70%. Asimismo, el informe de Calidad del Aire en Europa, elaborado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) indica que la reducción de la contaminación durante dicho periodo fue principalmente gracias a las limitaciones de transporte por carretera, de la aviación y del envío internacional. Asimismo, la concentración de las partículas en suspensión PM₁₀ también experimentó un fuerte descenso, en media, casi del 40% en territorio español (Turrión, 2020) durante el periodo en el que se tomaron severas medidas restrictivas.

También se pone de manifiesto que no todas las intervenciones tuvieron el mismo efecto, por ende, los mismos resultados en la contaminación atmosférica, haciendo hincapié en la diferencia entre, por un lado, medidas que contribuyeron ampliamente a la reducción de las partículas contaminantes, por ejemplo, el cierre de colegios y centros de trabajo, la cancelación de actos públicos y las restricciones de movimiento y, por el otro lado, las medidas cuya contribución fue menor como las restricciones a los viajes nacionales e internacionales. Por lo tanto, cabe destacar la importancia del tipo de medida gubernamental para diseñar próximas políticas y así poder asegurar un efecto directo sobre los niveles de contaminación atmosférica, lo cual conlleva un beneficio para la salud pública (Peuch, 2020).

A pesar de todo lo expuesto, no solo se debe tener en cuenta la variable humana en la ecuación tan compleja de la contaminación atmosférica, pues hay un factor que, muy

relacionada con la actividad humana, también está generando actualmente mucho debate. Se trata del cambio climático cuyos efectos están estrechamente vinculados con la contaminación (Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul de la Junta de Andalucía). Los altos niveles de los gases de efecto invernadero, producidos por los contaminantes NO₂, O₃, PM_{2,5} y PM₁₀, causan directa e indirectamente un aceleramiento del cambio climático a través del aumento de la temperatura global, lo cual, a su vez, obstaculiza una posible reducción de la contaminación y una mejora de la calidad del aire (Ballester, 2005). Es considerado un fenómeno que no solo repercute sobre la salud de las persona, sino que también implica grandes riesgos y daños para la naturaleza. Se trata, en consecuencia, de un círculo vicioso del cual, para salir del mismo se hace de especial y vital importancia las necesidades de investigación y la puesta en marcha de políticas medioambientales eficaces.

Bajo esta situación de extraordinario interés público y que precisa actuación inmediata, el medio objeto de esta investigación queda limitada a la Comunidad Autónoma de Cantabria. A pesar de que el informe Ecologistas en Acción (La calidad del aire en el Estado español durante 2019) ha considerado que los únicos dos municipios españoles (Castro Urdiales y Reinosa) que se encuentran dentro de los niveles permitidos de la calidad del aire pertenecen a dicha Comunidad Autónoma y que a toda la cornisa cántabra llegan vientos del noreste limpios de contaminantes, las actividades industriales que se encuentran en Cantabria contrarrestan la pureza del aire, elevando fuertemente la emisión de contaminantes. Del mismo modo, la Consejería de Medio Ambiente de Cantabria se ha visto obligada a activar en numerosas ocasiones el Protocolo de actuación del Gobierno de Cantabria en materia de información a la población ante concentraciones de contaminantes tras haber superado los umbrales establecidos tanto por la Unión Europea (UE) como la OMS, tal y como establece el Centro de Investigación del Medio Ambiente (CIMA). Por dicha razón, surge la importancia de estudiar en profundidad las diferencias a nivel local de las concentraciones de emisiones antropogénicas, dando lugar al siguiente planteamiento de la pregunta a investigar: ¿Cuáles son las variables que tienen mayor influencia en los niveles de contaminación de la Comunidad de Cantabria?

Para determinar la influencia y el efecto que tienen diferentes variables en los niveles de contaminación atmosférica de la Comunidad Autónoma de Cantabria se plantea esta hipótesis de investigación para poder obtener una respuesta al problema de investigación:

Las medidas restrictivas de actividad y movilidad humana que se impusieron durante las más duras etapas de contagio y propagación de la pandemia causada por la COVID-19, notablemente entre los meses de enero a junio de 2020, fueron causa directa de la reducción de los niveles de concentración de contaminantes atmosféricos y, por tanto, tuvieron un gran efecto en la calidad del aire y el medio ambiente a nivel mundial.

A partir de este contexto, el objetivo general de este estudio es analizar el comportamiento y la variación los niveles de contaminación de las distintas partículas contaminantes en la Comunidad de Cantabria durante los años 2012 a 2021 y el resultante efecto que han tenido las medidas del confinamiento por la COVID-19 sobre la calidad del aire.

Para la consecución y el logro del objetivo general mencionado se han delimitado los siguientes los siguientes objetivos específicos:

1. Extraer tanto los datos de contaminación horaria como los datos de variables climáticas de la Agencia Española de Meteorología (AEMET) necesarios para realizar el estudio de la calidad del aire de las 8 estaciones de la Comunidad Autónoma de Cantabria y tratarlos a través de una automatización programada en MATLAB.
2. Realizar un análisis descriptivo de los niveles de contaminación antes, durante y después de la pandemia.
3. Modelar, mediante el uso de funciones de regresión en R, el comportamiento de la contaminación antes, durante y después de las medidas de confinamiento a través de los niveles de concentración de las partículas contaminantes NO₂, O₃ y PM₁₀ para poder explicar posteriormente el efecto de las variables climáticas y aquellas que son utilizadas para el seguimiento de las actividades humanas y el efecto fin de semana.
4. Analizar a nivel espacial los resultados obtenidos del modelo de regresión a través del uso de la herramienta de visualización Tableau.

El periodo de tiempo durante el cual se adoptaron las medidas basadas particularmente en las restricciones a la movilidad y el distanciamiento social se ha llegado a considerar un experimento, de modo que dichas medidas pueden ser de gran utilidad para delinear de forma eficiente las futuras estrategias y políticas medioambientales en la lucha a favor del descenso

de las emisiones de gases contaminantes que tan necesarias en la actualidad por el incremento en las actividades humanas tanto industriales como diarias.

Este trabajo está compuesto de una introducción, tres capítulos y se finaliza con las conclusiones como elemento que resumen todos los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta que se pueden extraer del análisis de los resultados.

El primer capítulo ofrece una visión de la actualidad e importancia del tema de investigación del estudio. Se toman en consideración las diferentes partículas contaminantes a estudiar, su efecto de forma general en la contaminación atmosférica y su efecto dañino sobre la salud humana, el cambio climático y la superficie terrestre. Se procede primero a nivel general y, posteriormente, a nivel concreto focalizando el estudio en la Comunidad Autónoma de Cantabria de España. También se exponen los métodos que se han adoptado hasta el momento para monitorizar la evolución de la calidad del aire.

Seguidamente, el segundo capítulo expone detalladamente la metodología que se ha empleado en el trabajo para el efectivo logro de los objetivos establecidos. Para ello, primero se pone de manifiesto cuál es el área de estudio, se examinan sus características principales y se realiza un análisis por periodos de tiempo. Después, se establecen las fuentes utilizadas tanto para la extracción de datos como para el planteamiento de éstos y la elaboración del modelo matemático. Por último, se ofrece una descripción general teórica del análisis descriptivo de la contaminación, de la aplicación de diferentes modelos de regresión múltiple y de la visualización de los datos abarcando el periodo de tiempo que se tiene en consideración y utilizando diferentes herramientas analíticas como R y Tableau.

En el tercer capítulo se exponen los resultados de la aplicación de la metodología explicada en el capítulo segundo. De especial importancia es el peso de las distintas variables incluidas en los cambios que afectan a la contaminación. Para ello, se realiza una presentación de los datos obtenidos de la base de datos, la variable dependiente que marca el eje central del modelo matemático relevante para realizar y las variables independientes introducidas manualmente que representan las distintas variables adoptadas durante la pandemia causada por la COVID-19. También se explica el proceso de tratamiento de los datos. Finalmente, se elaboran mapas de zonificación para representar y visualizar los resultados de los modelos matemáticos propuestos.

El cuarto capítulo se dedica a los resultados obtenidos del modelo teniendo como resultado la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos a través de una función de las variables independientes elegidas para ello. Se explican las variables relativas al clima que se tienen en consideración en el análisis de la calidad del aire y su importancia en el objeto de esta investigación. También, se exponen las conclusiones extraídas de los resultados de la regresión, concretamente las tendencias, la evolución y los cambios más relevantes en los niveles de concentración de dichos contaminantes. Para añadir valor a los resultados, los datos se analizan en función de su geolocalización y se representan gráficamente a nivel especial.

Finalmente, se ponen de manifiesto las conclusiones de la investigación llevada a cabo con el objetivo de exponer la respuesta de este al problema de investigación planteado al comienzo del mismo. Dichas conclusiones se complementan con un apartado de anexos que facilitan su comprensión y valoración. El objetivo de este apartado es ser consciente del alcance de este estudio para poder ofrecer nuevas perspectivas para futuras investigaciones.

CAPÍTULO I. ACTUALIDAD DEL TEMA

Expertos en cuestiones medioambientales llevan alertando de la importancia y de los efectos nocivos de la contaminación del aire sobre la salud del ser humano desde principios del siglo XX con el objetivo de incitar, ya no solo a las autoridades encargadas de estos asuntos, sino a toda la población, a contribuir en la medida que alcanzan sus posibilidades a la mejora de la calidad del aire. Año tras año, diversas organizaciones publican estadísticas cada vez más alarmantes acerca de las consecuencias dañinas de las partículas contaminantes sobre la salud pública, en especial las partículas en suspensión PM10 o PM2.5, NO_x, NO₂ y el NO y el ozono de la troposfera O₃ (Querol, 2008).

La contaminación del aire, del agua, del suelo y los productos químicos son los máximos responsables del aumento de enfermedades y, como consecuencia de ello, muertes a nivel mundial (National Geographic, 2022). Según un informe en la revista *The Lancet Planetary Health*, una de cada seis muertes en el mundo es causada por la contaminación atmosférica. El costo de los daños a la salud causados por la contaminación atmosférica asciende a 8,1 billones de dólares estadounidenses al año, lo cual equivale al 6,1% del PIB Mundial (Banco Mundial, 2019), todo ello teniendo en cuenta solo las consecuencias sobre la salud, es decir, excluyendo del cálculo el efecto sobre fauna, flora y demás ecosistemas naturales.

Las enfermedades en las que más influye la calidad del aire se pueden agrupar, como ha venido haciendo el Instituto nacional de Ciencias de la Salud Ambiental, en tres grandes categorías. La determinación de tres categorías se ha realizado sin perjuicio de que se ha demostrado que la alta contaminación amenaza también a otras enfermedades como la diabetes, la obesidad y los trastornos reproductivos, neurológicos y del sistema inmunitario (Lim, 2018). La primera categoría hace referencia a las enfermedades respiratorias pues, como consecuencia de estar expuesto a niveles altos de concentración de partículas contaminantes durante periodos medios y largos de duración, éstas afectan al desarrollo de los pulmones pudiendo llegar a causar enfisema, asma, bronquitis crónica y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Oyarzún, 2010). En segundo lugar, la contaminación atmosférica también se ha relacionado con las enfermedades cardiovasculares (Id.). Los óxidos de nitrógeno pueden no solo alterar la función de los vasos sanguíneos, sino también acelerar la calcificación que se encuentra en las arterias, lo cual incrementa la posibilidad de sufrir derrames cerebrales hemorrágicos. Por último, hay una fuerte correlación entre la

calidad del aire y el riesgo de desarrollar un cáncer, en especial, de mama, de pulmón y leucemia (NIH, 2022).

Por otro lado, uno de los grupo de población con mayor vulnerabilidad a los episodios de altos niveles de concentración y sus consecuencias son los niños (Cano Liébana, 2023). Queda evidenciado en un reciente informe del Programa Nacional de Toxicología que el Ozono es el responsable de incrementar en un 50% el riesgo de las mujeres embarazadas de sufrir hipertensión durante el embarazo (Beverly, 2020). Los trastornos hipertensivos llevan en la mayoría de los casos a partos prematuros, casos de bajo peso al nacer y, en el peor de los casos, muertes de madres y bebés. En este sentido, vivir cerca de vías principales se consideran circunstancias que incrementa el riesgo de desarrollar cáncer de mama (Junta Editorial de la American Society of Clinical Oncology, 2020). Asimismo, como también ha alertado el Centro de Ciencias de la Salud Ambiental de la Universidad de California, el número de ausencias en las escuelas por enfermedades respiratorias se ha visto incrementado especialmente en niños que practican diversos deportes al aire libre en núcleos urbanos. Este aspecto debe su causa a la mayor exposición a la contaminación del aire (Unicef, 2021).

Además de los efectos nocivos para la salud pública, la contaminación atmosférica también juega un papel directo en el cambio climático y el medio ambiente. El incremento de emisión de gases de efecto invernadero, principalmente, dióxido de carbono, óxido nitroso y ozono troposférico provoca el calentamiento global y, en consecuencia, el cambio climático (Benavides y León, 2007). A su vez, el cambio climático conlleva graves alteraciones en nuestro clima que ya son más que evidentes: olas de calor, sequías, inundaciones, etc. (Ministerio del Medio Ambiente, 2022). Dichas consecuencias, junto con las catástrofes naturales experimentadas recientemente que también guardan relación con el aumento de la emisión de partículas contaminantes, justifican una mayor conciencia y percepción de riesgo de la población mundial. Encuestas realizadas por la Agencia Europea del Medio Ambiente demuestran que el 75% de la población europea tiene conocimiento acerca de la producción de un cambio climático y, entre éstos, un 90% son conscientes del peligro que implica (Tien et al., 2015).

Entre las consecuencias del cambio climático destacan la reducción de masa de los glaciares, pérdida de hielo marino, el deterioro de los hábitats de plantas y animales, el aumento acelerado del nivel del mar y las olas de calor más intensas (NASA Global Climate

Change, 2019). A pesar de los esfuerzos en la mitigación y adaptación al cambio de los diferentes sistemas ambientales y sociales, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) alerta de un crecimiento de la temperatura global de entre 2,5 y 10 grados Fahrenheit durante el próximo siglo, cuya causa se encuentra principalmente en la emisión de gases de efecto invernadero provenientes de las actividades humanas. Dicho aumento de las temperaturas también es responsable del incremento del riesgo de fenómenos intensos como los incendios, pues crea un suelo altamente inflamable y reduce las precipitaciones. El riesgo no solo está en el elevado número de incendios producidos durante el año 2022, sino en su capacidad y velocidad de expansión (Miralles, 2019).

Las consecuencias alcanzan también a la fauna tanto marina como terrestre, obligándolas a tener que migrar a territorios nuevos y creando desequilibrios en los ecosistemas que podrían incluso llegar a desaparecer. Otra consecuencia también se manifiesta en una elevada tasa de mortalidad en animales que no son capaces de adaptarse a las circunstancias cambiantes de su entorno. Así, por ejemplo, las aves se han visto obligadas a alterar sus patrones migratorios. Además, el cambio climático está causando una proliferación de especies invasoras agresivas que ponen en peligro la viabilidad de las autóctonas. Ejemplos de estas especies son las medusas o los mosquitos tigre (Marambio, 2019). Por lo tanto, el cambio climático está interviniendo de manera muy negativa en los procesos esenciales y vitales de los organismos.

El origen principal de estos fenómenos anómalos se puede encontrar en las actividades humanas, en especial en la industria y en el transporte. En primer lugar, los procesos industriales contribuyen los mayores contribuyentes a la totalidad de las emisiones de los principales contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero, debido a la quema de combustibles fósiles que se utiliza para generar energía, pues ésta es necesaria para los procesos de fabricación de cemento, hierro, acero, componentes electrónicos, ropa y otros bienes. Hoy en día, la mayoría de la generación de electricidad se realiza a través de la combustión de carbón o gas, lo cual emite niveles muy altos de dióxido de carbono y óxido nítrico. Se calcula la energía total generada por estas fuentes asciende a tres cuartos a nivel global si se compara con la totalidad de las utilizadas, por lo que solo un cuarto de la electricidad se produce mediante fuentes de energía renovables que emiten ninguna o niveles bajos de gases contaminantes. También es relevante la contribución del uso del transporte pues la mayoría de los medios, tanto terrestres como marítimos y aéreos funcionan con

combustibles fósiles. Dentro de estos tres medios de transporte, los vehículos terrestres son los que más contribuyen a las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, puesto que su funcionamiento se alcanza a través de la combustión de petróleo (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). En menor medida, pero igual de relevante, es la contribución a la generación de gases de la minería y sus respectivos procesos industriales y maquinaria, dado que a menudo los procesos de las extracciones requieren altos niveles de quema de carbón, petróleo y gas. (UN, 2020).

Ya en 1970 se establecieron los primeros Estándares nacionales de calidad del aire ambiental y, desde entonces, la preocupación por la contaminación del aire y la consideración de ésta como una verdadera amenaza para los ecosistemas que conviven en la superficie terrestre se ha ido extendiendo a nivel global. Por ello, con el objetivo de proteger no solo la salud del ser humano, sino también los ecosistemas, la biodiversidad y medio ambiente se han ido adoptando en las últimas décadas planes, programas e iniciativas tanto a nivel internacional como nacional. A nivel europeo una de las primeras normativas adoptadas fue la Directiva 2001/81/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2001, sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos con la finalidad de limitar las emisiones de las siguientes partículas contaminantes: amoníaco (NH₃); óxidos de nitrógeno (NO_x); compuestos orgánicos volátiles (COV); dióxido de azufre (SO₂). Mediante esta Directiva y los de ella resultantes programas nacionales de reducción progresiva de las emisiones se consiguió avanzar positivamente.

Sin embargo, en 2013 la Comisión Europea avisó en su Comunicación del 18 de diciembre de 2013 “Aire Puro para Europa” (ETCA) que seguían existiendo importantes efectos nocivos causados por los procesos de acidificación, eutrofización del suelo y por el ozono en la baja atmósfera y que ponían en riesgo la salud humana y el medioambiente. En consecuencia, se aprobó la Directiva (UE) 2016/2284 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de diciembre, relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos cuyo objetivo es ajustar con mayor precisión los compromisos internacionales de la UE y de los Estados miembros. En este caso, esta Directiva no impone límites máximos, si no que establece claras reducciones para emisiones de los Estados miembros en cuanto a los niveles de contaminación se refiere. Además, también obliga a los países a elaborar, adoptar y aplicar programas nacionales de control de la contaminación

atmosférica, así como a monitorizar las emisiones atmosféricas antropogénicas y sus efectos sobre la salud y los ecosistemas terrestres y acuáticos. Para evaluar la eficacia de sus programas deben elaborar informes que demuestran el quehacer en la búsqueda de los requerimientos planteados (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico).

La normativa europea también prevé sanciones por el incumplimiento de sus disposiciones. Por ejemplo, el TJUE ha condenado a España en 2022 por incumplir reiteradamente la normativa de calidad del aire tanto en Madrid como en Barcelona, al sobrepasar los límites estipulados por la UE para la exposición al dióxido de nitrógeno (NO₂). Por el momento, no se ha impuesto ninguna sanción, pero el TJUE ha amenazado con imponer una multa si las infracciones continúan (Asunto C-125/20).

Los objetivos establecidos para 2030 por la Directiva 2016/2284 se refieren a cuatro de los cinco contaminantes previamente mencionados -SO₂, NO_x, NH₃ y PM_x-. Se fijaron las reducciones en 92% para el dióxido de azufre, 66% para los óxidos de nitrógeno, 21% para el amoníaco y 50% para las partículas volátiles. Para cumplir con dichos estándares marcados, España elaboró un Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica (PNCCA) en 2019 que incluye medidas, acciones y estrategias. Además, el Programa define objetivos para garantizar la reducción de las emisiones en la agricultura, la energía, la industria, el transporte por carretera, el transporte marítimo, la calefacción doméstica y la utilización de máquinas móviles no de carretera y disolventes.

En la Comunidad de Cantabria se aprobó la Estrategia de Acción frente al Cambio Climático de Cantabria 2018-2030 (Decreto 32/2018, de 12 de abril) en cumplimiento del objetivo marcado por España de reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero.

Cantabria prevé que, por sus características orográficas y climáticas de su territorio, está afectada principalmente por las alteraciones en las precipitaciones, temperaturas, velocidad del viento y elevación del nivel del mar (Gobierno de Cantabria, 2018). Estas condiciones meteorológicas influirán sobre los ecosistemas considerados más vulnerables de Cantabria: las lagunas, ríos y arroyos de alta montaña; los bosques caducifolios como hayedos y robledales; y los ecosistemas marinos.

Para poder mitigar los estos efectos del cambio climático, Cantabria se comprometió a reducir un 10% para 2020, un 26% para todo el territorio español para 2030 y un 80% las emisiones de los gases de efecto invernaderos para 2050 (respecto a los niveles de 2005). Además, también se establece la adopción de Planes de Adaptación en los sectores socioeconómicos y sistemas naturales que quedan afectados por las consecuencias del cambio climático. Por tanto, no se establecen objetivos cuantitativos específicos para Cantabria, si no que éstos se fijan en línea con los españoles y europeos.

La consecución de dichos objetivos requiere un sistema de seguimiento eficaz, pues se compone de un elevado número de medidas concretas definidas para su consecución. En este sentido, los avances en el cumplimiento de los objetivos se revisan cada dos años mediante la elaboración de informes de resultado bianuales que se trasladan a la Comisión Interdepartamental sobre el Cambio Climático, asistido por el Consejo Asesor de Cambio Climático y Medio Ambiente de Cantabria (creado por el Decreto 76/2021) que, a su vez, cuenta con dos observatorios específicos en materia de cambio climático y de economía circular y bioeconomía (Gobierno de Cantabria, 2021).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

1. CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN DE ESTUDIO

Este trabajo se centra en el estudio de la contaminación del aire de la Comunidad Autónoma de Cantabria. Cantabria es una de las 17 comunidades autónomas de España que limita al norte con el mar Cantábrico, al oeste con la Comunidad Autónoma de Asturias, al este con la Comunidad Autónoma del País Vasco y al sur con la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Su localización exacta es de -4.0333300 grados decimales de longitud (O4°1'59.99) y 43.2 grados decimales de latitud (N43°12'0). Por lo tanto, Cantabria se encuentra al norte de la Península Ibérica contando con una superficie total de 5321 km² y una longitud de sus costas que alcanza los 165,7 km. Como se va a explicar en este capítulo, la concreta localización de la Comunidad Autónoma y sus características geográficas tienen gran efecto en la concentración de partículas contaminantes de Cantabria (Gómez-Zotano, 2015).

Es una de las siete comunidades autónomas uniprovinciales de España, es decir, que está compuesta únicamente por una sola provincia, la Provincia de Santander, cuya capital es la ciudad de Santander.

Las unidades de relieve que presenta Cantabria se dividen en tres categorías generales (Características físicas de Cantabria, 2019):

1. La Marina: se trata de una franja litoral horizontal (de oeste a este) de uno 8-10 km de anchura, desde la costa marítima (zona de acantilados) y las laderas de las montañas. En ella se pueden encontrar playas, rías, marismas y acantilados. A pesar de tratarse de una zona relativamente llana, destacan algunas zonas abruptas, a título de ejemplo, Pena Cabarga, Monte Candina y Pico Cerrado.
2. La Montaña: sus principales características son los valles estrechos y profundos que se esparcen de norte a sur de manera paralela. Estos valles están separados por sierras de gran altitud y han sido creados por los ríos Deva, Nansa, Saja, Besaya, Pas, Miera, Ason y Aguera, todos ellos desembocan en el mar Cantábrico. Cantabria se asienta en la zona central de la Cordillera Cantábrica donde se encuentran las mayores elevaciones de la Comunidad Autónoma llamadas los Picos de Europa, siendo la más alta Torre Blanca con 2615 m de altitud.
3. Campoo y Valderredible: se ubica al sur de la Cordillera cantábrica y está formada por valles amplios y poco profundos.

En cuanto a la climatología, el norte de la Península Ibérica es un encuentro de muchas corrientes oceánicas y marítimas, lo que influye en las temperaturas y precipitaciones. Al encontrarse Cantabria expuesta a la Corriente del Golfo, que trae consigo corrientes de aguas calientes al mar Cantábrico, la Comunidad Autónoma de Cantabria cuenta con temperaturas más cálidas de lo que, en teoría, correspondería a su latitud. Tiene una temperatura media en el mes más frío de 9°C y en el mes más cálido de 20°C. Además, la precipitación total anual está entorno a los 1200 l/m² (AEMET). Lo que caracteriza la climatología de Cantabria son sus dos climas muy diferenciados. Por un lado, un clima oceánico atlántico húmedo que supone vientos dominantes del oeste cuya consecuencia son las masas de aire húmedas tanto polares como tropicales. Este tipo de clima incluye particularidades como temperaturas suaves, diferencias de temperaturas muy limitadas y persistentes precipitaciones. Por el otro lado, como la Cordillera Cantábrica actúa como barrera, el clima, pasado esta línea, es mucho más seco y de contrastes térmicos fuertes, características que corresponden a un clima mediterráneo (Gobierno de Cantabria).

Con respecto a la demografía de Cantabria, esta Comunidad Autónoma tiene una población de 582.796 habitantes (INE, 2020), lo que corresponde a un 1,25% de la población total de España, siendo la comunidad autónoma más pequeña después de La Rioja y las ciudades autonómicas Ceuta y Melilla. Su densidad de población es de 109,53 habitantes/km², ocupando el puesto número 23 de las provincias de España.

La actividad industrial está altamente desarrollada en Cantabria (Cubria, 2021). Como demuestra el estudio realizado por Sodercan (Sociedad para el desarrollo regional de Cantabria) y el Gobierno de Cantabria, esta región lleva muchos años y sigue experimentando una extraordinaria evolución industrial dado a los factores económicos, sociales, políticos y tecnológicos característicos en la Comunidad Autónoma. Cantabria se alza como una de las ubicaciones ideales y más atractivas para la industria, tanto a nivel nacional como europeo. En el ranking de empresas establecidas en Cantabria, llama la atención que, las 10 primeras realizan actividades industriales altamente contaminantes como la fabricación de acero y alambrón, la comercialización de gas y petróleo, la prestación de servicios de transporte y la transformación de plásticos de polietileno (Informa, 2022).

Datos que aporta el mencionado estudio explican el incremento en la concentración de partículas contaminantes. Los establecimientos industriales ubicados en Cantabria han crecido un 21,09% y la inversión industrial un 134,45% entre el año 2019 y 2021. Estos

valores sitúan a la región en la posición que lidera la evolución española y se asemejan a al nivel medio europeo (*Id.*).

Como se mencionó en el capítulo anterior, los vehículos son un gran factor influyente en la presencia de partículas contaminantes en la atmósfera. En 2021, Cantabria contaba con un 1,25% del parque total de vehículos contabilizados en España, posicionándose en el puesto número 28 después de Castellón y antes de Ciudad Real (Anuario Estadístico General de la Dirección General de Tráfico, 2021). Teniendo en cuenta la superficie y el número de habitantes de Cantabria, se trata de una cifra elevada en comparación con otras provincias de características similares como La Rioja (0,63%). De hecho, por cada 1.000 habitantes, la Comunidad Autónoma de Cantabria concentra un total de 746 vehículos, seguida por Murcia y Albacete. De ello, se puede concluir que el tráfico por carretera tiene un gran efecto en los niveles de contaminación por la emisión de gases de efecto invernadero por parte de los vehículos (ONU Habitat, 2018). Tal ha sido la preocupación acerca de este aspecto que el Gobierno de Cantabria, concretamente la Consejería de Innovación, Industria, Transporte y Comercio, ha aprobado el Plan de renovación de vehículos (Plan Renove Eficiente, 2020) con el objetivo de reducir el la emisión de partículas contaminantes, reducir el consumo de combustibles fósiles y rebajar la edad media de los vehículos.

En cuanto a la quema de residuos, el elemento más destacable es el proyecto de Solvay, un grupo químico internacional y mayor agente emisor de gases de efecto invernadero en la Comunidad de Cantabria, ubicado en Torrelavega de construir una planta de incineración de residuos como alternativa a la descarbonización de la planta (Solvay, 2020). El grupo Economistas en Acción estima que la incineradora quemaría 336.00 toneladas de residuos al año, cifra que supera la cantidad que genera Cantabria al año (García, 2020). La planta en sí ya genera 1.200.00 toneladas al año de CO₂, en términos relativos, el 20% de las emisiones totales de Cantabria (Ecologistas en Acción, 2020). Esta organización ha puesto de manifiesto su temor y dudas acerca del proyecto, pues considera que el objetivo de la empresa con el proceso de la quema de residuos sea obtener un beneficio económico (supone unos ingresos entre 20 y 40 euros por tonelada) en vez de cuidar el medioambiente. Además, también considera que es contrario a la Directiva Marco de Residuos.

Por los aspectos mencionados en este primer apartado, la Comunidad Autónoma de Cantabria se presenta como un objeto de estudio con condiciones y características muy diversas en cuanto a su nivel de contaminación. Por ello, ofrece una gran oportunidad para

estudiar la calidad del aire de esta región teniendo en cuenta diferentes variables como las medidas restrictivas tomadas a causa del COVID-19.

2. FUENTE DE LOS DATOS

La fuente de datos utilizada en este trabajo se compone de tres bases de datos diferentes que, posteriormente, se unen en una única para aplicar sobre ésta el modelo matemático. Los tres conjuntos de datos son, en primer lugar, el que recoge los datos acerca del nivel de contaminantes medido en las estaciones de la Red de Calidad del Aire de la Comunidad Autónoma de Cantabria; en segundo lugar, aquel acerca de indicadores climáticos presentados en las estaciones meteorológicas de Cantabria y, por último, el conjunto de datos que contiene las variables dicotómicas en relación con el confinamiento causado por la pandemia del Covid-19, así como sus distintas fases (fase 0, fase 1 y fase 2), los días del fin de semana (sábado y domingo), la presencia de polvo del Sahara y la combustión de biomasa.

1.1. Datos de calidad del aire

En cuanto a esta primera base de datos, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico proporciona anualmente datos sobre la calidad del aire de las diferentes Comunidades Autónomas del territorio español, sin perjuicio de que cada Comunidad Autónoma tiene competencia para responsabilizarse de la gestión de las redes de medición de datos de calidad del aire.

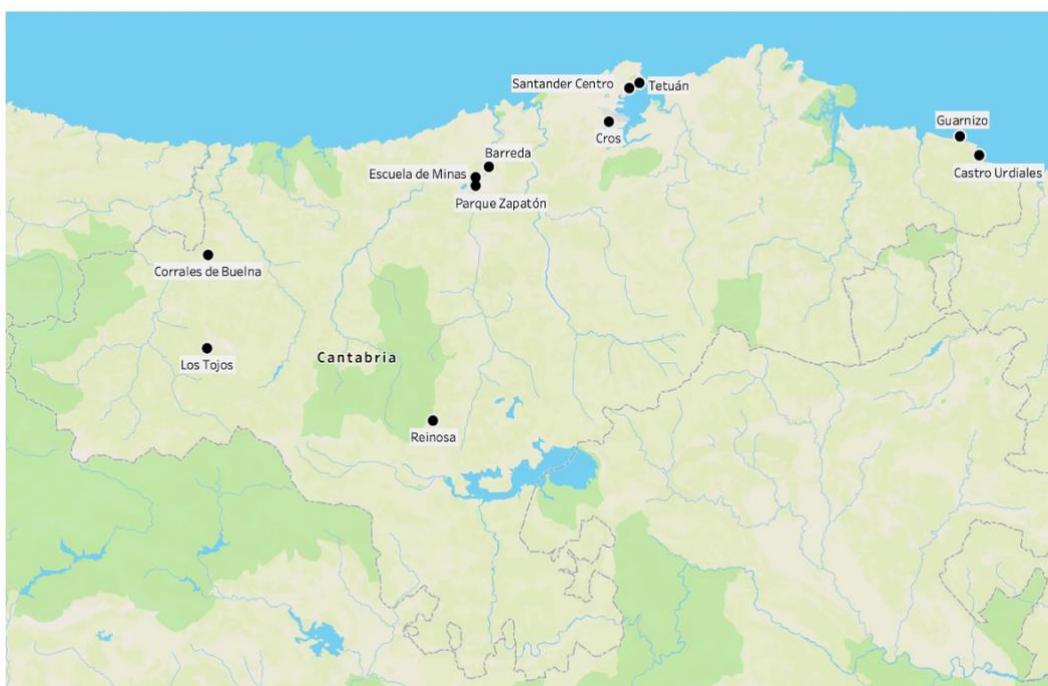
Cada Comunidad Autónoma cuenta con un número definido de estaciones de calidad del aire que son las encargadas de medir la concentración y los niveles de gases y partículas determinadas, de conformidad con el objetivo general de dar una visión general de la calidad del aire en España. Según el informe “Estadística de Calidad del Aire (Ficha 23041 del IOE)”, publicado por el Ministerio para la Transición Ecológica, cada Red de Calidad del Aire establece su formato para realizar la evaluación de la calidad del aire en su respectivo territorio, es decir, que la Red de Calidad del Aire de Cantabria evaluará la calidad del aire del territorio cántabro. Según los niveles de cada contaminante, dicha evaluación puede llevarse a cabo mediante mediciones fijas, indicativas, de modelizaciones o una combinación de ellas. Además, el territorio a tener en cuenta se divide en zonas y aglomeraciones. La primera se refiere a “porciones de territorio delimitada por la Administración competente y utilizada para evaluación y gestión de la calidad del aire”, frente a las segundas que son consideradas “conurbación de población superior a 250.000

habitantes o bien, cuando la población sea igual o inferior a 250.000 habitantes, con una densidad de población por km² que determine la Administración competente y justifique que se evalúe y controle la calidad del aire ambiente”.

El mismo informe explica la construcción de las estaciones de medición. Éstas son instalaciones remotas automáticas que están compuestas por una cabina en la que se guardan los sensores, equipos y aparatos utilizados para el registro de los niveles de las magnitudes medidas y la posterior transmisión de los datos recogidos. Los sensores son analizadores que miden los niveles de contaminantes que se encuentran en el aire.

El total de estaciones de medición de contaminación que se encuentran en la Comunidad Autónoma de Cantabria son 11 y se encuentran repartidas en el territorio de la siguiente forma:

Figura 1. Localización de estaciones de contaminación



Fuente: Elaboración propia con Tableau

La página web del Ministerio para la Transición Ecológica proporciona tres enlaces diferentes, según la periodicidad de la medición. El primero es el que contiene los datos horarios del año a tomar en consideración; el segundo, el de los datos diarios y el tercero el de los datos irregulares. Cada uno de estos enlaces contiene la información acerca de las mediciones de cada una de las partículas contaminantes. A día de hoy, se ofrecen datos oficiales de la Calidad del Aire desde 2001 hasta 2021.

El formato en los que se presenta los datos también viene explicado en la misma página web. Recogidos en un fichero csv por cada contaminante, tanto los datos horarios como los diarios e irregulares su metainformación basada en la estación (desde dónde se mide), magnitud (contaminante medido) y punto de muestreo (serie de datos que permite diferencias los casos en los que se mide desde un mismo sitio, pero con diferentes equipos de medición) está codificada.

El fichero xls de la metainformación cuyo nombre sigue la lógica “Metainformación - Estaciones y magnitudes 20XX”, según el año de medición. La pestaña “Estaciones” incluye tres categorías de datos, cada una con variables descriptivas distintas:

- 1) Identificación de la estación: cada estación tiene asignado un código que representa un punto de medición fijo. Por lo tanto, cada estación es una instalación que tiene coordenadas fijas y que lleva a cabo la medición de manera continuada en el tiempo. Se identifican estas estaciones mediante su código (“*COD_LOCAL*”), construido por el código INE de la provincia (dos cifras), el código INE del municipio (dos cifras) y el identificador de la estación (tres cifras). El mismo código también se establece a nivel europeo (“*COD_ESTACION_DEM*”), construido mediante el identificador del país (en caso de España “ES”), un código numérico y la letra “R” o “A” (“R” para las estaciones rurales remotas incluidas en la Red EMEP/VAG/CAMP y “A” para el resto de las estaciones).
- 2) Información general de la estación: las variables incluidas en esta sección, que por su nombre ya revelan la información que contienen, son *NOMBRE* de la estación, *FECHA_IN* de alta, *FECHA_FIN* en caso de que la estación se haya dado de baja, *N_RED* nombre de la red a la que pertenece la estación, *N_CCAA*, *N_PROVINCIA*, *N_MUNICIPIO* Comunidad Autónoma, provincia y municipio en la que se sitúa la estación provincia, *LATITUD_G*, *LONGITUD_G* latitud y longitud en grados decimales y *ALTITUD* sobre el nivel del mar en metros.
- 3) Clasificación de la estación: Conforme a la Decisión 2011/850/UE y su correspondiente Guía, existe la siguiente clasificación de las estaciones. En primer lugar, según el tipo de área, las estaciones pueden ser urbanas, suburbanas o rurales. En segundo lugar, según la tipología de la principal fuente de emisión que la influye, éstas pueden ser de tráfico, industriales o de fondo.
- 4) Contaminantes: la partícula que se mide se identifica con el código incluida en la pestaña de magnitudes dentro de la pestaña “Magnitudes” que corresponde a la establecida en la Guía Europea de la Decisión 2011/850/UE.

En este trabajo se van a utilizar únicamente los datos horarios, es decir, aquellos datos medidos cada hora. Por lo tanto, por cada contaminante, el fichero csv muestra la provincia, el municipio, la estación, la magnitud, el punto de muestreo, el año, el mes y el día en el que se realiza la medición. A continuación, cada registro contiene la información de un día por cada hora cuya referencia es UTC, es decir, 24 datos. A los diferentes periodos muestreados se les asigna el fin del muestro, de modo que, por ejemplo, el periodo muestreado entre las 13:00 y 14:00 se asigna a la hora 14.

La siguiente tabla muestra la lista de contaminantes que se miden en las estaciones de calidad del aire:

Tabla 1. Lista de contaminantes

MAGNITUD	NOMBRE	ABREVIATURA	UNIDAD
1	DIÓXIDO DE AZUFRE	SO ₂	µg/m ³
6	MONÓXIDO DE CARBONO	CO	mg/m ³
7	MONÓXIDO DE NITRÓGENO	NO	µg/m ³
8	DIÓXIDO DE NITRÓGENO	NO ₂	µg/m ³
	PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN		
9	<2,5	PM _{2,5}	µg/m ³
	PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN		
10	<10	PM ₁₀	µg/m ³
	ÓXIDOS EN NITRÓGENO		
12	TOTALES	NO _x	µg/m ³
14	OZONO	O ₃	µg/m ³
17	ARSENICO (PM ₁₀)	AS	ng/m ³
19	PLOMO (PM ₁₀)	Pb	µg/m ³
27	BENZO(A)PIRENO (PM ₁₀)	BAP	ng/m ³
28	CADMIO (PM ₁₀)	Cd	ng/m ³
30	BECENO	C ₆ H ₆	µg/m ³
62	NÍQUEL (PM ₁₀)	NI	ng/m ³

Fuente. Elaboración propia

1.2. Datos del clima

Los datos relativos a la climatología se obtienen mediante la página web *AEMET OpenData*. Se trata de una API REST que ha sido desarrollada por la propia AEMET para poder acceder y compartir la información meteorológica y climatológica recogida por la AEMET en el territorio español. Así lo establece la Ley 37/2007, de 16 de noviembre, sobre reutilización de la información del sector público. A estos datos se pueden acceder bien a través del acceso general o a través del acceso para desarrolladores.

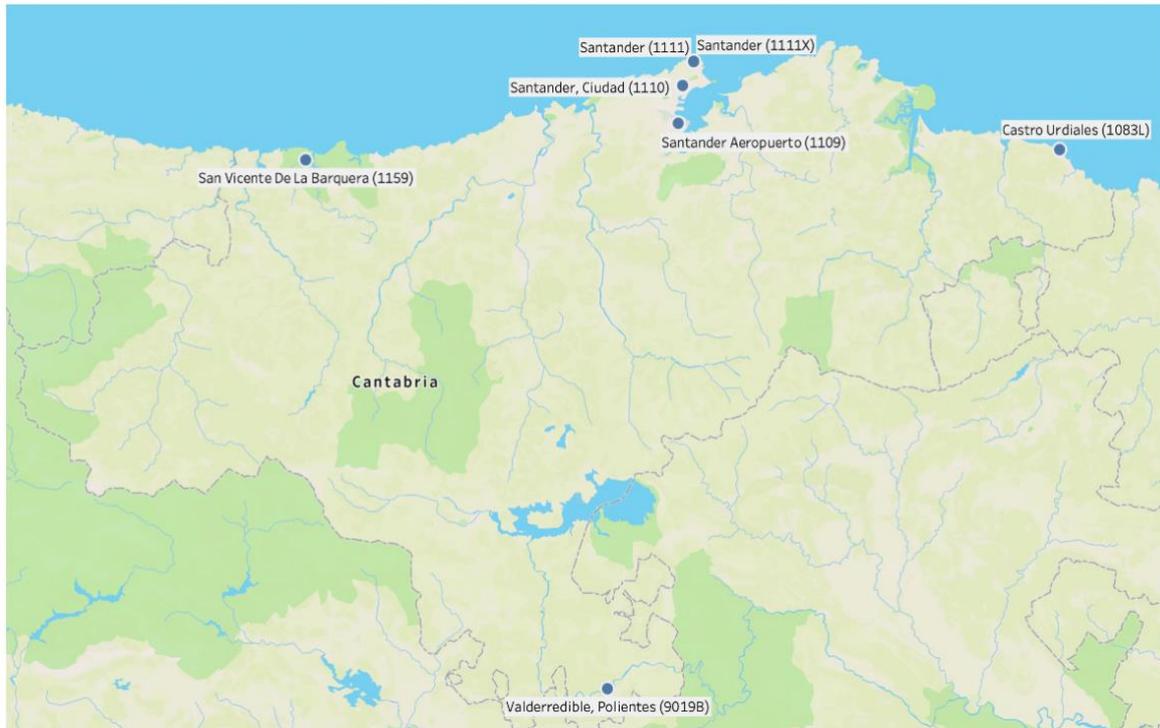
Concretamente, una API, tal y como lo define la AEMET, es un “conjunto de subrutinas, funciones y procedimientos que ofrece cierto ente (en este caso, AEMET) para ser utilizado por un software de un tercero para la obtención de datos, información, documentos...” (AEMET OpenData, s.f.). Partiendo de este concepto, una API REST es una API que es un servicio que permite utilizar un servicio web del que no somos propietarios a través de unas funciones de manera segura y dentro de una aplicación propia.

De forma gratuita, esta API REST permite descargar los datos que vienen listados en el Anexo II de la Resolución de 30 de diciembre de 2015 de AEMET, por la que se establecen los precios públicos que han de regir la prestación de servicios meteorológicos y climatológicos. Una vez establecida la provincia, la estación de medición y el periodo de tiempo concreto que se quiere estudiar, el contenido de la extracción es el siguiente:

- Fecha del registro, número indicativo correspondiente de la estación climatológica concreta, nombre de la estación, provincia en la que se encuentra la estación y la altitud de la estación sobre el nivel del mar.
- Temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima en grados Celsius. Únicamente para la temperatura máxima y mínima se recoge también la hora y minuto en la que se han registrado dichas temperaturas.
- Precipitación diaria.
- Racha máxima del viento, hora y minuto de la racha, velocidad media del viento y la dirección que toma el viento.

Las 7 estaciones climatológicas que se toman en consideración para los datos del clima son las que se encuentran en la Comunidad Autónoma de Cantabria. Su localización se muestra en la siguiente Figura:

Figura 2. Localización de estaciones del clima



Fuente : Elaboración propia con Tableau

1.3. Datos sobre fuentes naturales

Además de los datos de la calidad del aire y los datos del clima, en este estudio se añaden dos datos adicionales: por un lado, la presencia o no de polvo del desierto del Sahara (“SAHARAN_DUST”) y, por el otro lado, la presencia o no de combustión de biomasa (“COMBUSTION_BIOMASA”). Ambos datos se obtienen del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Estos dos datos pueden influir en la superación de los niveles en el aire de algunas de las partículas contaminantes, concretamente, de PM₁₀ y/o PM_{2.5} por lo que se decide analizarlas también en este estudio.

Los datos son publicados en un informe anual bajo la Actuación 1 “Detección de episodios naturales de aportes transfronterizos de partículas (episodios africanos), y de otro tipo de episodios naturales” del Encargo del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD) al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) para la “Detección de Episodios Naturales de Aportes Transfronterizos de Partículas y otras Fuentes de Contaminación de Material Particulado, y de Formación de Ozono Troposférico (17caes010)”.

Los datos con los diferentes episodios ocurridos son compartidos siguiendo el formato de tablas mensuales para el año concreto que están, a su vez, divididas en distintas áreas

geográficas del territorio de España. Estas áreas son Canarias, Suroeste, Sureste, Levante, Centro, Noroeste, Norte, Noreste y Baleares; la Comunidad Autónoma de Cantabria de ubica en la zona Norte. Cada sección perteneciente a cada uno de los meses del año explica los aspectos meteorológicos más relevantes y describe cada uno de los episodios de transporte de material particulado mineral de origen norte africano.

Por lo tanto, se han extraído los datos para la zona Norte para los episodios de presencia de polvo del Sahara y de combustión de biomasa para los años 2012 a 2021.

3. MÉTODO DE ANÁLISIS

3.1. Modelo de regresión teórico

La regresión lineal múltiple ajusta modelos lineales compuestos por una variable dependiente y más de una variable independiente, estudiando así la relación entre éstas (Montero, 2016). Por tanto, el valor de la variable dependiente se determina a través del conjunto de las demás variables, las independientes. Se utiliza fundamentalmente para predecir el valor de la variable dependiente y para estudiar la influencia que tienen las variables independientes, también llamadas predictores, sobre la dependiente, como es el caso de este trabajo (Amat, 2016).

El modelo utilizado para estudiar la hipótesis planteada es la regresión lineal múltiple, que se anota matemática a través de la siguiente fórmula:

Ecuación 2.1: Modelo de regresión lineal múltiple

$$Y = b_0 + b_1x_{1j} + b_2x_{2j} + \dots + b_kx_{kj} + u_j$$

Fuente: Elaboración propia

b_0 : ordenada en el origen, de modo que indica el valor de la variable dependiente Y cuando todas las variables independientes son cero.

b_j : efecto promedio que tiene el incremento en una unidad de la variable independiente x_j sobre la variable dependiente Y , cuando las demás variables se mantienen constantes. Se denominan coeficientes parciales de regresión. La magnitud de estos coeficientes no indica su importancia a la hora de estudiar su influencia en la variable dependiente Y , pues depende de las unidades en las que se mide la variable independiente x_j . Para poder medir la influencia,

se suelen estandarizar estos coeficientes antes de ajustar el modelo (se sustrae la media y se divide entre la desviación estándar).

u_j : error o residuo calculado como la diferencia entre el valor observado y el que efectivamente estima el modelo.

Para la mejor realización de este modelo hay que tener una serie de condiciones en consideración, que son las mismas que para los modelos lineales simples añadiendo alguna concreta (*Id.*).

1. No colinealidad o multicolinealidad. las variables predictoras deben ser independientes. Esto no ocurre cuando están linealmente relacionados uno con otro o con varios o cuando uno es la combinación lineal de otro.
2. Relación lineal. Las variables independientes numéricas deben estar linealmente relacionadas con la variable dependiente, mientras que las no numéricas se mantienen constantes.
3. Distribución normal de los residuos. Su distribución debe ser normal con media cero.
4. Homocedasticidad. Hace referencia a la variabilidad constante de los residuos, es decir, su varianza.
5. No autocorrelación. Todos valores de cada observación deben ser independientes entre sí.
6. Valores atípicos. Deben ser identificados para tener en consideración su influencia en el modelo.

Los resultados obtenidos a través de la herramienta de programación R y su interfaz RStudio son los siguientes (Anderson, 2019):

- *Residuals*: se trata de las diferencias entre las respuestas observadas y su correspondiente predicción de la variable dependiente calculada.
- *Estimate*: son las estimaciones de los coeficientes del modelo.
- *Std Error*: es el error estándar de cada coeficiente del modelo.
- *t value*: representa el valor del estadístico de prueba.
- *Pr(>|t|)*: se refiere al valor-p para las pruebas de hipótesis de que los coeficientes son cero. En el caso de que sea menor que el nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula y, en consecuencia, existe significación.
- *Signif codes*: corresponde al nivel de significancia de las variables independientes. Cuanto mayor sea el número de estrellas, mayor es su contribución.

- *Residual standard error*: representa la estimación de la desviación estándar.
- *Multiple R-squared*: es la proporción de la variación explicada por las variables independientes.
- *F-statistics*: el estadístico F permite contrastar la hipótesis de que los coeficientes de las variables independientes son cero.
- *p-value*: representa la importancia del modelo donde la hipótesis nula es que todos los coeficientes del modelo son cero. Si es menor que el nivel de significancia se puede inferir que hay una relación entre la variable independiente y la dependiente.

3.2. Visualización de datos con Tableau

Tableau es la herramienta que se ha decidido utilizar en este trabajo para poder visualizar tanto los datos extraídos como los resultado obtenidos a través del modelo. Se trata de una plataforma que no solo permite visualizar, sino también analizar los datos deseados en formato visual. Es ampliamente utilizada tanto por expertos como por *amateurs* porque combina su interfaz gráfica con elementos que se utilizan normalmente en las herramientas de *Business Intelligence*, convirtiendo este software en una herramienta que ayuda a comprender grandes cantidades de datos. Las visualizaciones interactivas y a tiempo real son fáciles de generar en poco tiempo, pues los datos se pueden cargar en el sistema o se pueden establecer conexiones con *datasets*, creando combinaciones entre diferentes fuentes de datos (Pérez, 2021). Entre las fuentes más utilizadas cabe mencionar Excel, csv y archivos de texto. Por tanto, Tableau ofrece la capacidad de poder crear visualizaciones atractivas a partir de volúmenes de datos muy elevados, pues es capaz de identificar diferentes campos y formatos y permite la posibilidad de realizar modificaciones en la base de datos, además de calcular nuevas variables (Hinojosa, 2016).

A la hora de crear gráficas, Tableau cuenta con una amplia gama de ofertas desde gráficos de líneas, de barras, de burbujas, de pendiente, de área, diagramas de dispersión, de caja y vigotas, de árbol, tablas de resaltado, histogramas, mapas, etc. Su método de arrastrar y soltar variables es relativamente intuitivo de modo que, los usuarios hasta menos expertos y con conocimientos limitados, son capaces de operar con los datos para presentarlos visualmente en las gráficas y darles un significado. Automáticamente, Tableau intenta identificar la categoría de los campos de la base de datos que se quiere utilizar: es capaz de distinguir entre valores de texto, numéricos, de fecha y hora, booleanos, geográficos, etc. No obstante, siempre se puede indicar manualmente el tipo de dato del que se trata. Una vez elegido el formato de la gráfica, se pueden añadir dimensiones a las gráficas a través de

colores, textos, etiquetas, formas y tamaños. De esta forma, las visualizaciones se vuelven mucho más ricas al poder representar diferentes aspectos en una misma gráfica. Por último, se pueden agregar varias visualizaciones a un mismo *dashboard* para generar un producto final en formato de presentación electrónica.

Para la realización de este trabajo se ha utilizado Tableau principalmente para la elaboración de mapas.

CAPÍTULO III. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

1. CONJUNTO DE DATOS

1.1. Variable dependiente: contaminantes

Como se ha explicado con anterioridad, la base de datos que proporciona el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico incluye un número elevado de partículas contaminantes que tienen en consideración a la hora de medir, analizar y evaluar la contaminación del aire tales como CO, NO, SO₂ y SH₂. Sin embargo, este Trabajo se va a focalizar en el estudio de las siguientes partículas de contaminación: PM₁₀, O₃ y NO₂, concretamente, para el periodo de tiempo que abarca desde enero de 2012 hasta enero de 2022.

1.1.1. Partículas PM10

Las partículas PM₁₀ forman parte de la categoría de materias particuladas presentes en la atmósfera y son las partículas sólidas o líquidas compuestas por diferentes elementos y de tamaño (Prisma, 2023). Dentro de esta categoría de materias particuladas, las diversas partículas se diferencian, en primer lugar, por las fracciones en relación con su tamaño y, en segundo lugar, porque varían ampliamente en su composición química y física en función de la fuente que las emiten (Gobierno de Valladolid, s.f.). Las partículas PM₁₀ son aquellas que tienen un tamaño de partícula (diámetro aerodinámico) entre 10 y 2,5 micras. Asimismo, los componentes que se encuentran en mayor medida en estas partículas son los sulfatos, nitratos, amonio, sodio y cloro, carbón elemental, metales, partículas de polvo y alérgenos, componentes minerales y agua. A diferencia de las partículas PM_{2,5}, las partículas PM₁₀ no penetran tan profundamente en los pulmones ni poseen gravísimos riesgos para la salud humana. No obstante, aunque, una vez inhaladas estas partículas, se expulsan con mayor facilidad a través de las mucosidades o de la tos que las partículas PM_{2,5}, siguen provocando efectos dañinos para la salud (OMS, 2013).

Estas partículas se clasifican en primarias y secundarias: en el primer caso, son emitidas directamente a la atmósfera y, en el segundo, se forman a través de reacciones entre contaminantes de la atmósfera o a través de la condensación. Teniendo en cuenta las partículas primarias, su principal fuente emisora es la combustión del carbón (Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, s.f.).

El origen de las partículas PM₁₀ pueden ser naturales o antropogénicas, dependiendo de si son generadas por fenómenos naturales o por el hombre. Las principales fuentes emisoras de las partículas primarias son los procesos de combustión, las operaciones de trituración, abrasión o molienda y el polvo levantado por los vehículos al circular (WHO, 2005). No obstante, en ciertas épocas del año, estas partículas también provienen de tareas agrícolas y de tormentas de polvo que se originan principalmente en el desierto del Sahara. En cuanto a las secundarias, éstas se desarrollan mayoritariamente a partir de productos de baja volatilidad generadas dentro de la atmósfera como la oxidación de dióxido de azufre a ácido sulfúrico.

Las partículas PM₁₀ afectan a más personas que cualquier otro contaminante (Murcia Salud, 2010). El factor relevante en cuanto al riesgo de estas partículas es el nivel de exposición, por lo que tanto las zonas urbanas como las industriales y rurales están afectadas por sus efectos nocivos. Generan, sobre todo, enfermedades cardiovasculares y respiratorias, como el cáncer de pulmón y la mortalidad por una exposición crónica está calculada en un 15-20% en ciudades con niveles elevados de contaminación. Cuanto menor sea su tamaño, más problemas causan, pues la probabilidad de su inhalación, penetración y transmisión a la sangre es mayor (*Id.*). Un elemento clave para poder medir la peligrosidad sobre la salud de las partículas es su tiempo de permanencia (Eurofins, 2022), que también está íntimamente relacionado con su tamaño: cuanto menor diámetro, más tiempo de permanencia presentan las partículas y, por ende, mayor peligro conllevan.

En España, se registran niveles altos de PM₁₀. Por ello, en desarrollo de la Directiva 2008/50/ CE, el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, en su Anexo I, establece los objetivos de calidad del aire para los distintos contaminantes. Su Apartado C indica los valores límite de las partículas PM₁₀ en condiciones ambientales para la protección de la salud, figando los siguientes dos límites: en primer lugar, en 24 horas no se podrá pasar el valor de 50 µg/m³ (este valor no podrá superarse en más de 25 ocasiones por año) y, en segundo lugar, en un año civil el valor establecido es de 40 µg/m³.

1.1.2. Ozono (O₃)

El Ozono se puede encontrar tanto en la capa estratosférica como en la troposférica de la atmósfera, categorizándolo en “bueno” y “malo” dependiendo de su ubicación. El primero se sitúa a una distancia de 10 a 50 km de la superficie de la Tierra, dónde crea una capa

protectora contra los rayos solares ultravioleta (de ahí que se considere mejor que el segundo). El segundo se encuentra en la capa más próxima a la superficie de la Tierra, es decir, en aquella que respiramos directamente (Comunidad de Madrid, s.f.). Este tipo de ozono se considera un contaminante secundario al ser consecuencia de las reacciones fotoquímicas del óxido de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (contaminantes primarios). Esto es, se genera por la emisión de otros contaminantes que derivan del tráfico, las industrias y las calefacciones, mayoritariamente.

Puesto que el ozono desaparece en el momento en el que reacciona con otros compuestos, por ejemplo, el óxido de nitrógeno (NO) se transforma en dióxido de nitrógeno (NO₂), los niveles de ozono tienden a ser más bajos en zonas urbanas con mayor contaminación, dado sus elevados niveles de compuestos (OMS, 2013), originados, por ejemplo, por el tráfico.

Los niveles más elevados de ozono se registran, normalmente, a finales de la primavera y durante los meses de verano, puesto que las condiciones climáticas son muy propensas a la creación de ozono por sus días soleados, ausencia de viento y altas temperaturas. Además, durante el día la concentración de ozono es mucho mayor que por la noche. Por ello, España es uno de los países europeos que más sufre de niveles elevados de ozono (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.). Actualmente, el nivel legislado como objetivo a largo plazo está en 120 µg/m³ como máximo diario de las medias móviles octohorarias dentro de un año civil y AOT40 = 6.000 µg/m³ · h como valor acumulado de mayo a julio (Real Decreto 102/2011 en cumplimiento de la Directiva 2008/50/CE).

En cuanto a sus efectos nocivos sobre la salud, el ozono es considerado un potente oxidante que puede ocasionar graves daños en el sistema respiratorio y cardiovascular al, por un lado, irritar el sistema respiratorio y, por otro lado, reducir la función pulmonar. Sus efectos dañinos están estrechamente relacionados con los niveles de concentración en la atmósfera, la duración de la exposición a este gas, la intensidad de la actividad en exteriores, la sensibilidad personal de cada persona y la existencia de enfermedades previas (Ministerio de Transición Ecológica, s.f.). Ecologistas en Acción ha calculado la muerte por contaminación por ozono en España en 1.800 personas anuales.

1.1.3. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Este contaminante se origina principalmente por actividades humanas (contaminante antropogénico) como el tráfico rodado (75% según el Inventario Nacional de Emisiones), las emisiones de determinadas industrias y las grandes instalaciones de combustión (Madrid Salud, s.f.). Se forma por la oxidación del nitrógeno atmosférico N₂ a altas temperaturas. Al ser estas sus fuentes mayoritarias, los niveles más elevados de dióxido de nitrógeno se encuentran en áreas urbanas y en las proximidades de las vías de comunicación con mayor tránsito de vehículos (Ministerio para la Transición Ecológicas y el Reto Demográfico, s.f.).

Niveles elevados de este contaminante pueden ser muy perjudiciales para la salud, al irritar los pulmones y disminuir su capacidad funcional, lo que puede generar la aparición de infecciones respiratorias. Los valores límite establecidos en el Real Decreto 102/2011 en desarrollo de la Directiva 2008/50/CE es de 200 µg/m³ como valor medio en 1h que no debe superarse en más de 18 ocasiones por año civil y 30 µg/m³ en un año civil.

1.2. Variables independientes

Las variables independientes que se han incluido en este trabajo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Lista de las variables independientes empleadas en el modelo

NOMBRE	TIPO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
TEMP_MEDIA	Numérica continua	Grados Celsius (°C)	Temperatura media diaria
VELOCMED_VIENTO	Numérica continua	Metros por segundo (m/s)	Velocidad media del viento
PREC	Numérica continua	Milímetros (mm)	Precipitación diaria media de 07:00h a 07:00h
LOCKDOWN	Dicotómica	1/0	Periodo de confinamiento doméstico. Los valores comprendidos corresponden con la Fase 1: entre los días 14 de marzo y 20 de junio de 2020 (99 días).
SATURDAY	Dicotómica	1/0	Sábado
SUNDAY	Dicotómica	1/0	Domingo
HOLDIAYS	Dicotómica	1/0	Festivo
SAHARAN_DUST	Dicotómica	1/0	Episodios naturales de transporte de material particulado en suspensión desde el norte de África.
COMBUSTION_BIOMASA	Dicotómica	1/0	Combustión de biomasa en incendios forestales

Fuente. Elaboración propia

1.2.1. Valores climatológicos

Los fenómenos climatológicos que generan un mayor efecto sobre la contaminación atmosférica son la temperatura, las precipitaciones y los vientos (Sanz y Galán, 2022), de modo que están tres variables se han incluido en el modelo como variables independientes para poder analizar el efecto que tienen sobre los niveles de contaminantes.

En primer lugar, la temperatura tiene un efecto generalmente negativo sobre los niveles de contaminación atmosférica. Característico de los días de verano es la creación de una capa de niebla que, lejos de ser gotas de agua, es ozono a nivel de la superficie de la tierra, dado que temperaturas elevadas favorecen su origen, la producción fotoquímica. Esta es generada por el proceso de reacción entre los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles y la luz solar. Además, temperaturas muy altas pueden generar y mantener incendios forestales que generan humo y PM₁₀ (IQAir Staff Writers, s.f.). El fenómeno que también puede llegar a influenciar de manera determinante en los niveles de contaminación es la inversión de temperatura que se produce cuando “se forma aire cálido sobre aire más frío en el suelo” (*Op. cit.*). De tal forma, la contaminación queda atrapada en la zona donde se produce tal fenómeno impidiendo su dispersión. Por el contrario, temperaturas muy bajas conllevan una mayor combustión para el funcionamiento de la calefacción.

En segundo lugar, el viento también es uno de los factores que más influencia tienen en el transporte y dispersión de las partículas contaminantes (Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial, 2004). En concreto, la velocidad e intensidad del viento afecta en gran medida los niveles de contaminación atmosférica que se puede dar en un área específica. La relación es la siguiente, cuanto mayor sea la velocidad e intensidad del viento, menor será la concentración de las partículas, pues el viento diluye y dispersa de manera muy rápida los contaminantes. Por tanto, el volumen de aire que puede llegar a desplazar el viento por unidad de tiempo en una determinada zona es mayor a medida que su velocidad incrementa (Venegas y Mazzeo, 2012).

Por último, la lluvia también puede ayudar a disminuir la concentración de partículas contaminantes en el aire, aunque no es tan efectiva como el viento. Cuanto mayores y más gruesas sean las partículas, más fácil y rápido es que la lluvia pueda depositarlas y asentarlas en el suelo (Ramos, 2018). En muchas ocasiones, la estabilidad meteorológica genera la inmovilización de las partículas como el dióxido de carbono, el nitrógeno o el dióxido de azufre. De tal modo, las precipitaciones ayudan a disolver los gases y la concentración de las

partículas suspendidas en el aire, disminuyendo su concentración. Sin embargo, la lluvia también puede ser un factor muy nocivo cuando reacciona los gases generados por la quema de combustibles (dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno) reaccionan con el oxígeno y el vapor del agua, originando el fenómeno denominado lluvia ácida (National Geographic, 2023). Esta lluvia se caracteriza por presentar elevados niveles de ácido sulfúrico y nítrico y también se puede dar en forma de nieve. entre sus mayores consecuencias cabe destacar la disminución de nutrientes esenciales del suelo, la liberación de aluminio y el incremento del nivel ácido en los acuíferos.

1.2.2. Lockdown

Desde un punto de vista sanitario, social y económico la pandemia generada por el Covid-19 ha marcado un antes y un después en la historia de España. Ante la imperiosa necesidad de detener su propagación, contagio y expansión, el Gobierno español se vio obligado a tomar medidas orientadas a la contención de la movilidad de las personas y la separación física en el ámbito social y económico (La Moncloa, 2020). Como medida por excelencia, las autoridades españolas aprobaron el Real Decreto, de 14 de marzo, por el que se establece el estado de alarma cuyo objetivo era imponer medidas restrictivas de movilidad y actividad económica, prorrogado hasta el 9 de mayo en tres ocasiones.

España ha sido uno de los países más afectados por el virus Covid-19 y sus consecuencias. Las cifras de contagio y mortalidad ascendieron en abril de 2020 hasta 210.000 y 24.000, respectivamente, representando uno de los “peores botes de coronavirus del mundo” (Reuters Staff, 2020), de modo que la implementación del plan para levantar el confinamiento en dirección hacia la “nueva normalidad” se efectuó muy cautelosamente. El presidente del Gobierno español, Pedro Sánchez, anunció el 28 de abril de 2020 la aprobación de un plan de desescalada (Plan para la Transición hacia una Nueva Normalidad) que consta de 4 fases consecutivas. No obstante, aunque debía de haber cierta coordinación, el pasar de una fase a otra se decidía por Comunidad Autónoma, avanzando cada una a un ritmo diferente en función de la capacidad del sistema sanitario, situación epidemiológica, medidas de protección en espacios públicos, datos de movilidad y socioeconómicos (Consejo de Ministros, 2020).

Las 4 fases del Plan, cuyo objetivo es recuperar la vida cotidiana y la actividad económica con foco en los riesgos a la salud y los desbordamiento del sistema sanitario, son las siguientes:

- Fase 0 (preparación): permite la movilidad fuera del domicilio, el ejercicio individual sin contacto y la apertura de locales y establecimientos con cita previa.
- Fase I (inicial): apertura parcial de actividades económicas como los pequeños comercios, las terrazas de los restaurantes con un aforo límite del 30%, los hoteles y alojamientos turísticos con excepción de las zonas comunes, así como las actividades agrarias, deportivas profesionales y los lugares de culto.
- Fase II (intermedia): prevé la apertura de aquellas actividades no permitidas durante la fase anterior. Entre ellas cabe destacar los espacios interiores de los restaurantes con una ocupación del 30% y garantías estrictas de separación, la reapertura de los centros educativos en septiembre y la celebración de actos y espectáculos culturales también con un aforo del 30%.
- Fase III (avanzada): en esta fase se permite la movilidad general con la recomendación de llevar una mascarilla en espacios abiertos y el transporte público. En cuanto a los locales, el aforo se incrementa al 50%.

Como consecuencia de esta restricción a la movilidad y la actividad cotidiana se calculó que la contaminación descendió a la mitad en la mayoría de las ciudades de España (Planells, 2020), principalmente, por la disminución del uso de los vehículos de combustión. El contaminante en el que este descenso fue más notable fue en el dióxido de nitrógeno, alcanzando únicamente el 40% de su valor límite tan solo unos días tras decretar el estado de alarma (Greenpeace, 2020).

1.2.3. Fin de semana y festivos

Se ha demostrado que la contaminación atmosférica varía mucho dependiendo del día de la semana, mostrando, por tanto, un patrón semanal que se repite ininterrumpidamente bajo condiciones de normalidad. El efecto fin de semana es un fenómeno que describe la, en primer lugar, reducción de la concentración de partículas contaminantes como el NO_x, CO y PM₁₀, y, en segundo lugar, el aumento de ozono en zonas urbanas. El primer de los casos se produce debido a la disminución de la actividad humana en comparación con los días laborales (Parra, 2017), pues se generan menores emisiones antropogénicas. Sin embargo, en el segundo de los casos, menores concentraciones de partículas contaminantes provocan el efecto contrario en cuanto al ozono, generando coherentemente mayores niveles de

concentración durante el fin de semana, dado que, como se ha expuesto, el ozono desaparece al reaccionar con sus precursores.

En cuanto al efecto fin de semana, hay que tener presentes una serie de consideraciones (Dumont, 1996). En primer lugar, la reducción de las emisiones de los componentes contaminantes como el NO_x se debe principalmente a la disminución de la intensidad del tráfico de vehículos durante los sábados y domingos, principalmente en las zonas urbanas. Al ser el componente que, tras su reacción con él, hace que el O_3 desaparezca, aumentan los niveles de este último. En segundo lugar, dado que la actividad humana comienza en horas más tardías de la mañana durante los fines de semana en comparación con los días laborables, las emisiones de NO_x se emiten en un sistema fotosintéticamente más activo, generando mayores niveles de ozono. En tercer lugar, al contrario que las primeras horas del día, durante las noches del fin de semana se produce un incremento de emisiones por el aumento de vehículos que circulan en este momento. Por último, durante las noches, la capa más baja de la atmósfera que está en contacto con la superficie terrestre se vuelve más estable por las bajadas de temperatura, impidiendo que se muevan las masas de aire. Este fenómeno genera que, al comenzar el día, la capa alta que se encuentra por encima de la baja y que está cargada de contaminantes desciende a la superficie al calentarse la capa baja y desaparecer la estabilidad.

1.2.4. Fuentes naturales

Como se ha explicado anteriormente, las partículas contaminantes pueden tener dos tipos de fuentes, naturales y antropogénicas. Como se ha visto, la categoría antropogénica se encuentran principalmente los procesos de combustión de industrias, la quema de biomasa y el uso doméstico y el tráfico. No obstante, resulta relevante conocer también la categoría de fuentes naturales. Los ejemplos más característicos de las fuentes naturales son las “erupciones volcánicas, el polvo arrastrado por el viento, el aerosol de sal marina y las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de las plantas” (European Environment Agency, s.f.). Las que tienen mayor influencia en los actuales niveles elevado de contaminación son, por un lado, la actividad volcánica por su producción de partículas de sulfuro, clorina y ceniza y, por el otro lado, los fuegos forestales que generan humo y monóxido de carbono (Metcalf, 2008).

En la Península Ibérica, los materiales particulados PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en suspensión son los contaminantes que se crean en mayor medida por fuentes naturales, especialmente por las

advecciones de polvo que proviene del Sahara. Su incremento puede alcanzar el 110% para el primer material particulado y 104% para el segundo (Díaz et al., 2017). Su frecuencia es común y periódica, apareciendo un 9,6% de los días en la zona noroeste de la Península, 30,1% en la sureste, 18,2% en la región del centro y 22,4% en las Islas Canarias (Díaz et al., 2017). Se calcula que se movilizan unas 40 millones de toneladas de polvo del Sahara al año (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021). Su aparición está muy relacionada con altas temperaturas, produciéndose, por tanto, con mayor frecuencia en los meses de junio, julio y agosto y con menor frecuencia en los meses de invierno cuando las temperaturas son más bajas. No obstante, este fenómeno puede presentarse en todas las épocas del año (Russo et al., 2020).

Las partículas del polvo sahariano son de origen mineral generadas mayoritariamente por la erosión de las rocas (Griffin, 2007). Dentro de estos minerales se encuentra el cuarzo, los óxidos y los carbonatos, el hierro, el titanio y el vanadio, aunque también pueden aparecer nitratos y sulfatos (Tobías et al., 2011). Los días que se produce la advección, la tasa de morbi-mortalidad asociada a las PM₁₀ y a otros contaminantes como el NO₂ y el O₃ aumenta en comparación con los días en los que no se produce una intrusión de este polvo (Moreira et al., 2019).

Otra consecuencia, además del aumento del material particulado, de la aparición de polvo del Sahara que tiene gran influencia sobre la contaminación del aire es la modificación de la estructura atmosférica (Pandolfi et al., 2014). La altura de la capa de mezcla disminuya generando una menor dispersión de todos los contaminantes presentes en ella, lo que, a su vez, incrementa los niveles de concentración de dichos contaminantes como los óxidos de nitrógenos (Salvador et al., 2019). Como se ha explicado, la intrusión del polvo sahariano tiene lugar normalmente cuando las temperaturas son altas, lo que también es un factor que influye en el aumento de ozono troposférico (García et al., 2015).

La intrusión de polvo sahariano más reciente se produjo en marzo de 2022 impulsada por la borrasca denominada Celia y elevó la calidad del aire a la categoría de “extremadamente desfavorable” en muchas zonas de España por sus altos niveles de PM₁₀ (Dirección General de Salud Pública de la Comunidad de Madrid, 2022).

En segundo lugar, otra fuente natural de la contaminación atmosférica es la combustión de biomasa para la producción de electricidad. Las biomásas son consideradas materiales de

origen orgánico que no se han sometido a un proceso de fosilización. A pesar de que, en comparación con los combustibles fósiles, la combustión de biomasa no influye demasiado en la contaminación ambiental y está incluida entre las fuentes renovables, sigue emitiendo ciertos contaminantes como óxidos de nitrógenos, monóxido de carbono, partículas y dióxido de azufre (Carrasco, 2008). La emisión de estos gases, a su vez, incrementan también los niveles de ozono y la aparición de lluvia ácida.

Las emisiones que genera esta combustión dependen del tipo de materia prima que utilice, la tecnología de combustión y los dispositivos de control de las emisiones (Renewable Energy Magazine, 2018). Hoy en día, la instalación de filtros, ciclones, precipitadores electrostáticos o la combustión en lecho fluidificado puede reducir significativamente la emisión de contaminantes atmosféricos. También se ha demostrado que las fuentes menos contaminantes para biomasa son las que proceden de restos agrícolas, recursos forestales o residuos urbanos, frente a la biomasa originada mediante la deforestación de bosques y selvas o la transformación de ecosistemas silvestres en nuevas tierras de cultivo (Energías Renovables, 2015).

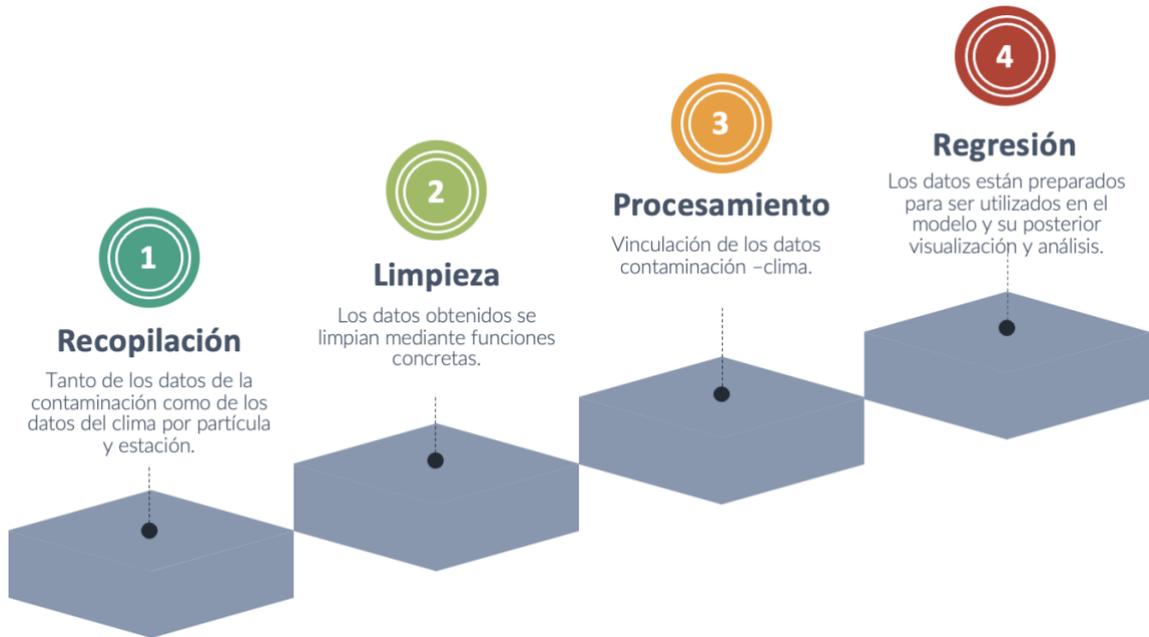
La primera planta para la producción de energía eléctrica a partir de residuos naturales para biomasa que se construyó en la Comunidad de Cantabria fue en 2012 en Reocín.

2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS CON MATLAB

Con el objetivo de obtener una base de datos que incluye las variables que se han expuesto en el apartado anterior se siguió un proceso de limpieza, filtrado y unión de los tres bases de datos en Matlab: la que recoge los niveles de contaminación (calidad del aire), los datos meteorológicos y los datos de las fuentes naturales. Se decidió utilizar este programa por la manejabilidad que ofrece a la hora de tratar grandes volúmenes de datos. Inicialmente, los datos se encuentran para cada partícula y estación y para cada hora, de modo que, antes de ser tratados, constan de un volumen muy elevado de registros.

La siguiente figura se ha elaborado para esquematizar el proceso que se ha seguido para la recogida y tratamiento de los datos.

Figura 3. Pasos para el tratamiento de los datos



Fuente. Elaboración propia.

La primera fase consiste en recopilar los datos relativos a la calidad del aire y los datos meteorológicos disponibles en la web de la AEMET, ambos para la Comunidad Autónoma de Cantabria y el periodo temporal de 2012 a 2022. Por un lado, los datos de la contaminación en Cantabria se han obtenido de la base de datos de la totalidad de las estaciones que pertenecen a las Redes de Calidad del Aire en España mediante el código de la Comunidad Autónoma. Los datos están ordenados anualmente por carpetas cuyo contenido es un fichero en formato *.csv* por cada estación. La extensión de la extracción de los datos se limitó a través de los años del periodo de estudio y los contaminantes NO_2 , PM_{10} y O_3 . Al obtener los datos por cada hora, se calculó el valor medio diario de la concentración de cada una de las partículas tomadas en consideración y cada uno de los años del periodo de estudio. Además, los datos no válidos, identificados con una “N” se eliminaron de la base de datos para incluir únicamente aquellos marcados con una “V”. En algunos casos faltaban datos, de modo que se procedió a su estimación, asignando el valor más cercano de contaminación y temporal.

Por el otro lado, para los datos del clima, se accedió a la web de la AEMET y, mediante una clave API previamente proporcionada, se descargaron los archivos en formato *JSON* para cada estación de la Cantabria y para el periodo de estudio seleccionado.

Por último, la extracción de los datos para las variables del polvo del Sahara y de la Combustión de Biomasa se realizó a través de los informes anuales de episodios naturales elaborados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno español. Su formato es en *.pdf*, de modo que la obtención de los datos necesarios para el estudio fue manual. Además, se elaboró una tercera base de datos con estos datos junto a las demás variables dicotómicas (*dummy*).

El segundo paso que se tomó fue la limpieza de las bases de datos obtenidas. Sobre estas se aplicaron una serie de funciones para poder trabajar con las bases de datos de manera más eficiente y efectiva. Estos procesos se basaron principalmente nombrar los contaminantes de la misma forma para poder identificarlos rápidamente pues en algunos ficheros estaban nombrados bajo sus nombres y en otros con sus abreviaturas; quitar acentos de las palabras; imponer como criterio de separación decimal una coma (sistema español) en vez de un punto (sistema anglosajón) y, como se ha mencionado ya, rellenar los datos que faltaban.

En tercer lugar, se realizó la vinculación de los datos de contaminación y clima. Para ello, se tuvo que transformar primeramente el formato de los datos, pues cada línea de la base de datos debe representar un día para cada estación y magnitud y cada columna corresponde a cada una de las 24 horas del día. Inicialmente, los datos estaban estructurados por filas para las horas del día y por columnas los niveles de contaminación registrados. Por lo tanto, se tuvo que efectuar una transposición. Una vez realizada, se pudieron vincular las tablas de datos fijando como punto de unión la variable fecha, que es común a los tres conjuntos de datos. Para establecer el nexo entre las estaciones climatológicas y los datos sobre la calidad del aire, se calculó la distancia entre los dos grupos de estaciones para asignar a cada estación de contaminación la estación climatológica más cercana.

Como resultado, se obtuvo un archivo Excel por cada estación y contaminante para el periodo de tiempo entre 2012 y 2022. Cada uno de los fichero contienen las siguientes variables: nivel diario del contaminante, temperatura media, velocidad media del viento, precipitación media, confinamiento, fase 0, fase I, fase II, sábado, domingo, polvo del Sahara y combustión de biomasa. Estos datos ya pueden ser utilizados para el modelo de regresión en la última fase del trabajo con el software R y RStudio. Posteriormente, se analizan los resultados y se visualizan con Tableau para obtener las conclusiones.

3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO ECONOMETRICO

Tras el tratamiento de los datos, se cuenta con el número de estaciones de medición que representan los niveles de concentración a nivel diario y para cada una de las partículas contaminantes y con las variables que puede llegar a influir en estos niveles de contaminación. Con este trabajo se pretende analizar el efecto que pueden llegar a tener las mencionadas variables sobre el nivel de contaminación de cada una de las partículas a tener en consideración.

Para poder modelar el nivel de concentración de la partícula p en la estación s se ha utilizado la siguiente ecuación en función de las variables independientes expuestas:

Ecuación 3.1: Modelo econométrico de la concentración de cada partícula contaminante p en cada estación c

$$Z = \ln(C_{ps}) = \alpha_{ps} + \beta_{xps} * X_{ps} + \gamma_{yps} * Y_{ps} + \varepsilon_{ps}$$

Fuente: Elaboración propia

La definición de los conjuntos e índices es la siguiente: P es el conjunto de partículas medidas en la Comunidad Autónoma de Cantabria, de manera que p es cada una de las partículas del conjunto P ($p \in P$); S es el conjunto de las estaciones de medición de la calidad del aire e la Comunidad Autónoma de Cantabria, por lo que s representa cada una de las estaciones del conjunto S ($s \in S$).

Teniendo en cuenta el modelo econométrico, C_{pst} representa el nivel de concentración medio diario del contaminante p en la estación s ; Z es el logaritmo neperiano de la variable dependiente C ; β_{ps} actúa como término independiente del modelo y ε_{pst} equivale a un término de error, es decir recoge los residuos del modelo. Se ha decidido tomar logaritmos de los niveles de contaminación porque su distribución está sesgada teniendo a la derecha, además que, esto permite interpretar los efectos estimados en términos porcentuales.

El vector X engloba el conjunto de variables lineales que, en este trabajo, corresponden con las variables meteorológicas que se han tenido en cuenta: la temperatura media, la velocidad media del viento y las precipitaciones. Por tanto, los coeficientes representan los efectos marginales sobre la variable independiente C_{ps} , de tal manera que, un incremento en una unidad de la variable, por ejemplo, temperatura media, supone un incremento de su coeficiente $\beta_{Temp_media_{ps}}$ % en la concentración de la partícula p en la estación s en C_{ps} .

Del mismo modo, el vector Y está compuesto por las variables dicotómicas incluidas en el estudio, esto es, las que únicamente toman valor 1 o 0: Lockdown, Saturday, Sunday, Holidays, Saharan_Dust, Combustion_Biomasa. Los coeficientes que acompañan a estas variables γ_{yps} , de nuevo, representan el efecto marginal en el nivel de concentración de partículas contaminantes recogido por la variable independiente C_{ps} si sucede o no el evento al que corresponden las variables dicotómicas. Estas variables dicotómicas se interpretan como $100 * (e^{(\beta)} - 1)$. Por ejemplo, un incremento en una unidad de la variable Saharan_Dust cuando toma el valor 1, supone un incremento de su coeficiente $\gamma_{Saharan_Dust_{ps}}$ % en la concentración de la partícula p en la estación s en C_{ps} .

4. ELABORACIÓN DE MAPAS DE ZONIFICACIÓN

Para la visualización de los datos y su posterior análisis espacial, se trasladaron los resultados obtenidos al diseño de mapas de zonificación utilizando la herramienta de visualización descrita Tableau. Resulta de relevante interés realizar este tipo de análisis de los resultados, a la hora, por ejemplo, de evaluar si niveles elevados de contaminación de la partícula contaminante NO_2 son observables principalmente en zonas urbanas, de gran desarrollo industrial o de elevado movimiento de vehículos rodados. También puede ser de gran ayuda para otras partículas que están influenciadas por actividades antropogénicas delimitadas en zonas concretas del territorio de Cantabria. Además, se puede observar si la distribución de los niveles de concentración de las partículas tenidas en cuenta en función de las diferentes variables independientes del modelo difiere en distintas zonas del área geográfico en cuestión. Por ejemplo, se podrá analizar si los niveles de concentración de las partículas contaminantes son diferentes en el interior del territorio en comparación con la zona de la costa.

Como consecuencia, cada uno de los mapas muestra la relación entre las variables independientes enumeradas y la concentración del contaminante en cada una de las estaciones de calidad del aire en la Comunidad Autónoma de Cantabria.

Se utiliza el código de colores rojo-verde incluyendo todas las diferentes tonalidades de estos colores. Respecto de cada una de las variables independientes, por un lado, el verde significa un descenso de los niveles de concentración del contaminante en cuestión en los lugares concretos, diferenciando entre las tonalidades del verde, donde cuanto más oscuro mayor es el efecto, es decir, mayor será la disminución de contaminación. Por el otro lado,

el rojo representa un aumento en los niveles de concentración de la partícula contaminante y, de nuevo, cuando más intenso sea el rojo, mayor será su incremento.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

1. ANÁLISIS NÚMÉRICO: TENDENCIAS DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN

A continuación, se muestran los resultados globales de la regresión efectuada y se analiza la relación entre los niveles de contaminación de las partículas NO, O y PM y las variables independientes seleccionadas para el modelo, presentando los resultados en tablas y gráficos para las estaciones de la Comunidad Autónoma de Cantabria. Como se ha explicado anteriormente, los coeficientes de las variables dummy se interpretan como $100 * (e^{(\beta)} - 1)$.

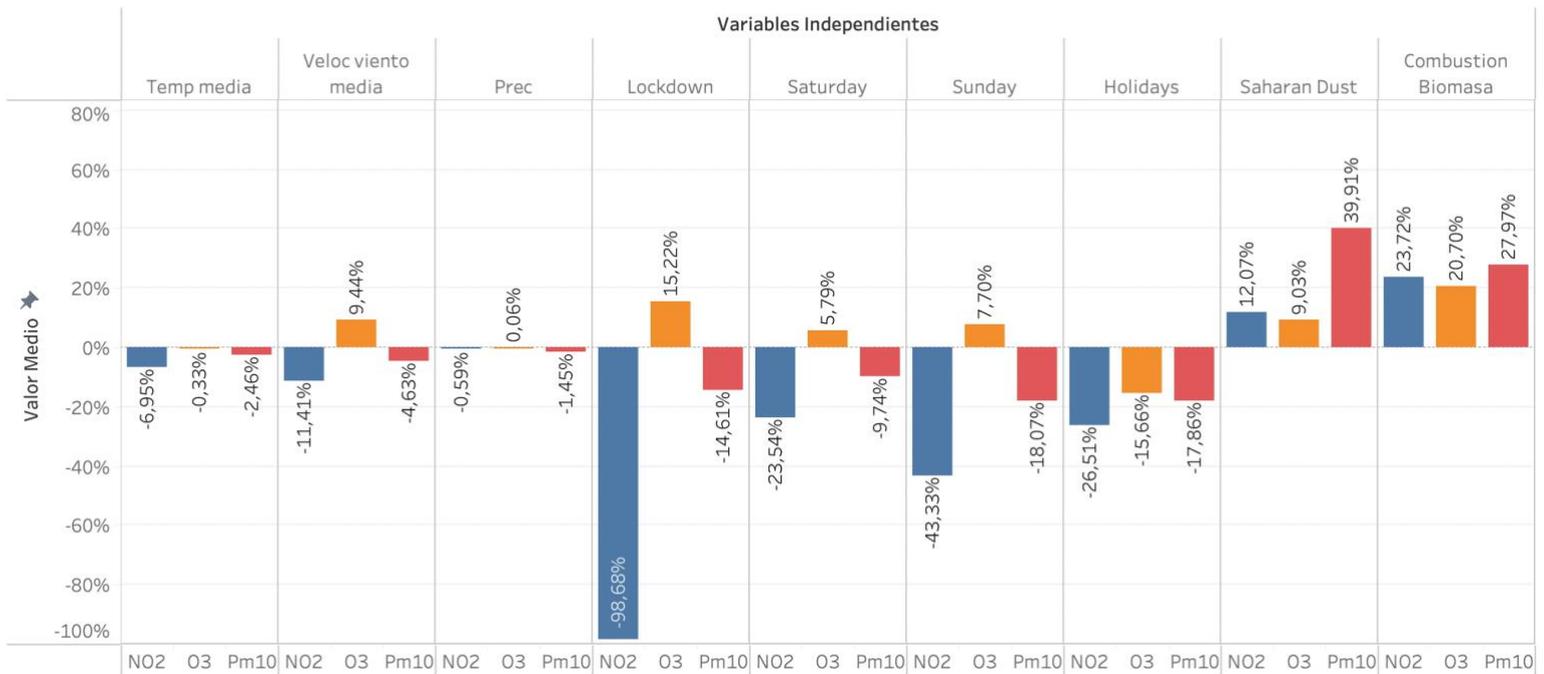
Para considerar las estimaciones como significativas el p-valor que se ha decidido tomar es 0,05, por lo tanto, aquellas estimaciones cuyos p-valor sean inferiores a 0,05 serán consideradas como significativas. Además, como se ha explicado, al tomar logaritmos, se pueden interpretar los coeficientes de las variables independiente en porcentaje. Por ejemplo, el coeficiente que corresponde a la variable TMEP_MEDIA para el contaminante NO₂ es como valor medio de todas las estaciones y, al tener un p-valor menor que 0,05, se puede interpretar que la estimación es significativa y decrece/crece en un % de media.

Por otra parte, el error estándar medio que se ha obtenido por cada contaminante está por debajo de 0,1, lo que indica que los resultados muestrales efectivamente son representativos de la población: 0,041 para el NO₂, 0,034 para el O₃ y 0,036 para el PM₁₀.

En primer lugar, se analizan de manera general y conjunta los resultados medios del efecto que tienen cada una de las variables independientes y los resultados medios sobre los diferentes niveles de concentración de las partículas contaminantes que se tienen en cuenta en este trabajo.

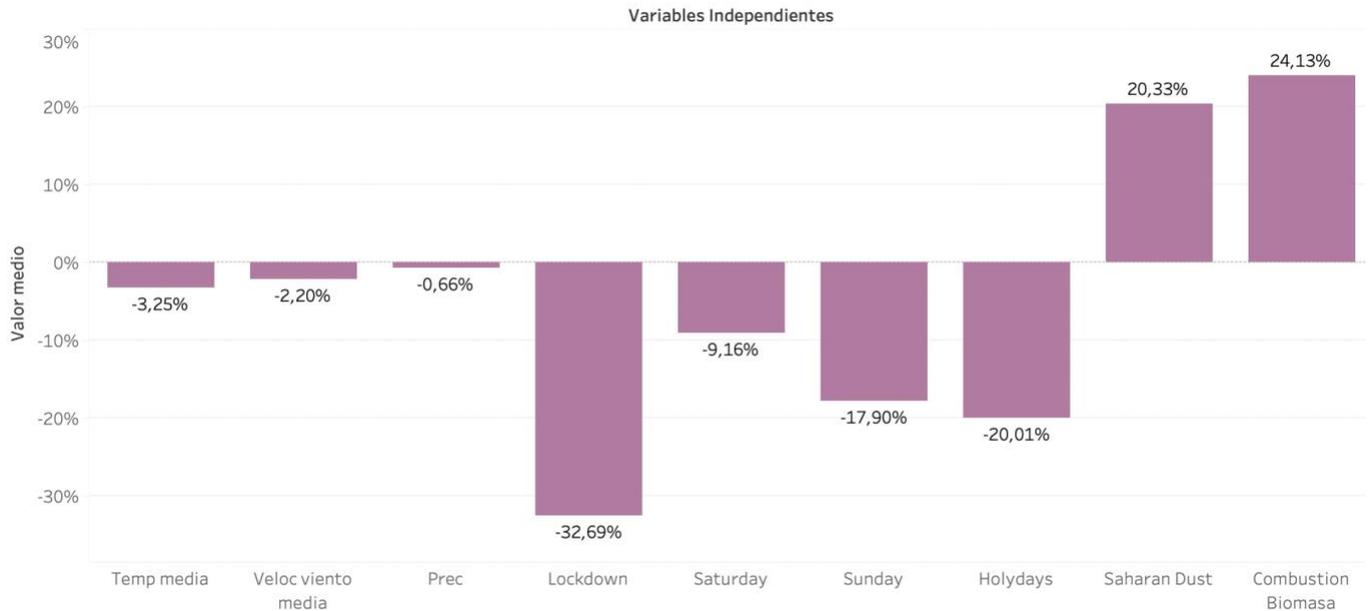
Las siguientes figuras recogen esta información:

Figura 4. Efecto promedio por partícula contaminante de las variables independientes



Fuente. Elaboración propia

Figura 5. Efecto promedio general de las variables independientes



Fuente. Elaboración propia

De forma general se puede establecer que las variables con efecto positivo sobre la concentración de las tres las partículas contaminantes NO₂, O₃ y PM₁₀ son el polvo del Sahara y la Combustión Biomasa. Por un lado, en los días con presencia de polvo sahariano la concentración aumenta en un 13%, 9% y 49% y, por el otro lado, los días en los que se produce

combustión de biomasa el incremento de los contaminantes es del 27%, 23% y 32% respectivamente. En línea de lo expuesto en otros capítulos, las variables independientes Velocidad media del viento, Precipitación, Lockdown, Saturday y Sunday también tienen un efecto positivo concretamente sobre la partícula contaminante O_3 , pues, al producirse un descenso de sus precursores (como el NO_2) su capacidad de desaparecer a través la reacción con otros compuestos es menor. También se ha expuesto que, durante el confinamiento y los fines de semana, la reducción del tráfico y de la actividad industrial tiene una influencia positiva sobre el ozono.

Por el otro lado, el resto de las variables independientes tiene un efecto negativo sobre los niveles de concentración de las partículas contaminantes en cuestión. Especialmente significativa es la variable Lockdown en cuanto a su efecto negativo sobre el NO_2 de 62,7%. Tal y como se ha explicado, durante el periodo de confinamiento en 2020 en nuestro país se decretó el estado de alarma con el fin de reducir al máximo los contagios, la propagación y la expansión del COVID-19 mediante medidas como la prohibición de movilidad y la limitación de las actividades únicamente a aquellas consideradas como esenciales. Durante este tiempo el tráfico rodado, la actividad industrial y otras actividades influyentes se vieron reducidas al mínimo. La figura claramente demuestra que estas medidas conllevaron un descenso importante no solo en los niveles de concentración de NO_2 , siendo este efecto el más notable, sino también en los de PM_{10} en un 13,6%. Calculando la media general de la variable Lockdown, que se visualiza en la Figura 5, ésta tuvo un efecto negativo del 27,9% sobre los niveles de concentración de las partículas.

Llamativos también son los efectos de las variables Saturday, Sunday y Holidays que suponen una reducción media del 9%, 16% y 18% respectivamente, siendo la partícula contaminante más afectada por estas variables el NO_2 con un 21%, 35% y 23% respectivamente.

Respecto a las variables climatológicas, se puede observar que su relación con la concentración de contaminantes es inversamente proporcional, lo que quiere decir que tanto la temperatura media como la velocidad media del viento y la precipitación afectan negativamente por cada unidad adicional de estas variables. Así, por cada grado Celsius adicional, la concentración de partículas contaminantes desciende un 3%, por cada m/s adicional un 2% y por cada mm adicional un 1%. Para la temperatura y la velocidad del viento medias genera más efecto, de nuevo, sobre el NO_2 , tal y como se ha explicado, y el efecto de la precipitación es más notorio sobre los niveles de concentración de PM_{10} .

En segundo lugar, para poder identificar patrones generales, este trabajo muestra el valor medio de los resultados de los coeficientes estimados de cada estación en función de las variables independientes y para cada partícula contaminante. De esta forma, se obtiene un coeficiente que resume el efecto que tiene la variable independiente sobre la concentración de la partícula contaminante en cuestión. Además, se añade también el número de muestras para cada partícula contaminante, pues no en todas las estaciones se recogen datos de todos los contaminantes. En cuanto a las diferentes variables independientes, se analizan aquellas cuyo efecto es más notorio.

La variable independiente Lockdown, es decir, el confinamiento por la pandemia generada por el virus Covid-19, generó un efecto especialmente dramático en la concentración de NO₂, suponiendo una reducción del 62,7%. Además, este resultado fue negativo y significativo en la totalidad de estaciones de control evaluadas de la Comunidad Autónoma de Cantabria. En el caso de las partículas PM₁₀, el parámetro estudiado también supuso una reducción de sus niveles de concentración, pero no tan elevada como en el caso anterior (disminución del 13,6%). En más de la mitad de las estaciones el efecto fue negativo y significativo, mientras que únicamente en un 9% de ellas el efecto fue positivo y estadísticamente significativo. El confinamiento tuvo el efecto contrario en los niveles de concentraciones del O₃, pues esta variable se asoció positivamente con su concentración. No obstante, su efecto medio no fue demasiado notorio: las concentraciones de este contaminante aumentaron un 16,4% durante los meses de confinamiento, esto es, de marzo a junio de 2020. Asimismo, frente a un efecto negativo y significativo en un 12,5% de las estaciones, en un 62,5% el efecto fue positivo y significativo.

En cuanto a la temperatura media diaria, la relación con los tres contaminantes fue una reducción relativamente leve de sus niveles de concentración. Un aumento de un grado Celsius de la temperatura conllevó un incremento del 6,9% en el caso de NO₂, del 0,5% para los niveles de O₃ y del 2,5% en la concentración de PM₁₀. El coeficiente estimado fue negativo y significativo tanto para el NO₂ como las partículas PM₁₀, en ambos casos por encima de 90%, aunque mayor en el primer caso, alcanzando la totalidad de las estaciones. Por el contrario, el efecto de la temperatura media fue heterogéneo para el O₃, pues esta variable supuso un efecto positivo significativo en el 12,5% de las estaciones, pero uno negativo significativo en el 25% de ellas.

Considerando la variable velocidad media del viento, su relación con el contaminante NO₂ y las partículas en suspensión PM₁₀ es negativa, disminuyendo un 11,4 y un 4,6%

respectivamente. En ambos casos, el porcentaje de significación negativo fue total en todas las estaciones de control. Si se analiza la evolución del O₃, se puede apreciar que el efecto de esta variable sobre el ozono fue diferente representando así una excepción al patrón de comportamiento expuesto. Se asoció positivamente la velocidad del media del viento con sus niveles de concentración, sin embargo, su efecto fue pequeño, aumentando por cada unidad de metro por segundo, *ceteris paribus*, un 9,4% de media. Este resultado fue positivo y muy significativo en el 87,5% de las estaciones y negativo y significativo en ninguna de ellas.

El efecto de las precipitaciones fue muy leve en todos los contaminantes evaluados y, de nuevo, se vuelve a observar el mismo patrón sobre los diferentes contaminante. Un aumento de lluvia se asocia a un efecto negativo en la concentración de NO₂ y PM₁₀, siendo menor en el primer caso (reducción del 0,6%) que en el segundo (reducción del 1,5%). Del mismo modo, el efecto fue negativo y significativo en menos estaciones para el NO₂ (66,67%) que para las partículas PM₁₀ (100%). En ambos casos, este efecto fue determinante, pues en ninguna de las estaciones se pudo observar un efecto positivo y significativo. Por el contrario, el O₃ se relaciona positivamente con un aumento de lluvia, pero su efecto es muy reducido, pues únicamente incrementa un 0,1% por cada milímetro de lluvia. A pesar de este resultado, resulta llamativo que en ninguna de las estaciones evaluadas el efecto fue ni positivo y significativo ni negativo y significativo.

El efecto del fin de semana sigue el patrón que se ha expuesto con anterioridad. La contaminación por las partículas NO₂ y PM₁₀ disminuye durante estos días, siendo el efecto mayor y más notorio para el NO₂. Así, teniendo en cuenta la variable independiente Saturday, la reducción para el NO₂ es de un 20,9% y un 9,2% para el PM₁₀. En cambio, la disminución aumenta drásticamente en la relación con la variable Sunday, observando una bajada notoria, concretamente, del 35,1% y 16,6% respectivamente. Por tanto, se puede decir que la variable independiente Sunday conlleva un mayor efecto negativo sobre estos dos contaminantes que la variable Saturday. Los resultados fueron muy negativos y significativos en la totalidad de las estaciones en ambos días del fin de semana para el NO₂ y en un 72,73% de las estaciones en referencia a la variable Saturday y un 100% en cuanto a la variable Sunday para las partículas PM₁₀. En este caso, el comportamiento fue también contrario al descrito para los otros dos contaminantes para el O₃. Se asocio el efecto del fin de semana positivamente a este último contaminante, en el que el aumento se intensifico un 2% de primer día del fin de semana al otro, creciendo de un 6% a un 8%. Su efecto fue mucho menor comparado con el NO₂ y el PM₁₀,

siendo únicamente positivo y significativo en 12,5% de las estaciones de control evaluadas para la variable Saturday y 37,5% para la variable Sunday.

Comparado con este efecto, los contaminantes NO₂ y PM₁₀ siguen el mismo comportamiento en cuanto a la variable Holidays, pero, en este caso, el efecto sobre la concentración del O₃ también es negativo, si bien en menor medida. El NO₂ disminuye un 263,2%, el PM₁₀ un 16,4% y el O₃ un 14,5% en los días festivos. Los resultados fueron negativos y significativos en el 8,33%, 63,64% y 62,5% respectivamente y, únicamente, en referencia al contaminante O₃ se puede observar un efecto positivo y significativo en el 12,5% de las estaciones de control evaluadas.

Atendiendo a las fuentes naturales que influyen en los niveles de contaminación y comenzando por la variable Saharan Dust, esta variable independiente muestra un efecto positivo en los tres contaminantes, NO₂, O₃ y PM₁₀, apreciando un efecto principalmente en el incremento de los niveles de concentración del último. De este modo, en la totalidad de las estaciones evaluadas se midió un efecto positivo y significativo, aumentando la concentración de PM₁₀ un 49% a raíz de la presencia del polvo sahariano. Después de las partículas volátiles, el efecto mayor se observa sobre los niveles de concentración de NO₂, ya que este contaminante incrementa un 12,9% con un porcentaje positivo y significativo menos elevado (66,67% de las estaciones evaluadas). Por último, las advecciones de polvo del Sahara generaron un efecto menor en el O₃ de la Comunidad Autónoma de Cantabria con un porcentaje negativo y significativo bastante leve comparado con los otros dos (37,5%). Su incremento es del 9,4%, 40% menor que el PM₁₀ y 3,4% que el NO₂.

Seguidamente, la presencia de combustión de biomasa tuvo un efecto relativamente parecido que el polvo del Sahara. Se asoció positivamente con la concentración de los tres contaminantes y en medidas relativamente parecidas: 26,7% para el NO₂, 23% para el O₃ y 32,3% para el PM₁₀. De nuevo, el contaminante más afectado por la presencia de combustión es el PM₁₀. La significancia de los resultados varió entre el 87,5% (O₃), el 90,91% (PM₁₀) y el 100% (NO₂).

Tabla 3. Resultados de la regresión por contaminante en Cantabria. Las columnas 3 y 5 representan el valor medio de los coeficientes estimados por los modelos de regresión de cada variable independiente (columna de variables independientes) en relación con cada variable dependiente (contaminante).

VARIABLES INDEPENDIENTES	DESCRIPCIÓN	NO ₂	O ₃	PM ₁₀
TEMP_MEDIA (°C)	Valor medio Negativo y significativo (%) Positivo y significativo (%)	-0,069 100% 0%	-0,003 25% 12,5%	-0,025 90,91% 0%
VELOCMED_VIENTO (m/s)	Valor medio Negativo y significativo (%) Positivo y significativo (%)	-0,114 100% 0%	0,094 0% 87,5%	-0,046 100% 0%
PREC (mm)	Valor medio Negativo y significativo (%) Positivo y significativo (%)	-0,006 66,67% 0%	0,001 0% 0%	-0,015 100% 0%
LOCKDOWN (1: sí, 0: no)	Valor medio Negativo y significativo (%) Positivo y significativo (%)	-0,987 100% 0%	0,152 12,5% 62,5%	-0,146 54,55% 9,09%
SATURDAY (1: sí, 0: no)	Valor medio Negativo y significativo (%) Positivo y significativo (%)	-0,235 100% 0%	0,058 0% 12,5%	-0,097 72,73% 0%
SUNDAY (1: sí, 0: no)	Valor medio Negativo y significativo (%) Positivo y significativo (%)	-0,433 100% 0%	0,077 0% 37,5%	-0,181 90,91% 0%
HOLIDAYS (1: sí, 0: no)	Valor medio Negativo y significativo (%) Positivo y significativo (%)	-0,265 83,33% 0%	-0,157 62,5% 12,5%	-0,179 63,64% 0%
SAHARAN_DUST (1: sí, 0: no)	Valor medio Negativo y significativo (%) Positivo y significativo (%)	0,121 0% 66,67%	0,090 0% 37,5%	0,399 0% 100%
COMBUSTION_BIOMASA (1: sí, 0: no)	Valor medio Negativo y significativo (%) Positivo y significativo (%)	0,237 0% 100%	0,207 0% 87,5%	0,280 0% 90,91%
Nº de modelos		6	8	11

Fuente. Elaboración propia

2. ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS DATOS

La finalidad de este apartado es realizar un análisis a nivel local, esto es, analizar la relación entre las variables independientes y los niveles de concentración de los contaminantes NO₂, O₃ y PM₁₀ en las diferentes zonas del territorio de la Comunidad de Cantabria. Para ello, se representan los resultados en formato de mapas de zonificación en las siguientes figuras. Se ofrece esta perspectiva geográfica respecto a cada una de las variables independientes y para la totalidad de las partículas contaminantes analizadas en este trabajo. Las figuras están estructuradas de la siguiente forma: cada una de las 3 figuras representadas a continuación muestran las estimaciones por estación de control correspondientes a Cantabria. Esto es, se pretende dar perspectiva gráfica al efecto de tres de las variables independientes incluidas en el modelo para los tres contaminantes analizados, NO₂, O₃, PM₁₀. La Figura 1 observa la variables independiente del confinamiento (Lockdown), la Figura 2 el domingo (Sunday) y la Figura 3 el polvo del Sáhara (Saharan Dust). A su vez, cada una de las figuras incluye 3 paneles que representan el efecto para los tres contaminantes mencionados, el panel (a) para el NO₂, el (b) para el O₃ y el (c) para el PM₁₀. Asimismo, se utiliza una escala de colores desde verde oscuro, que pone de manifiesto los efectos negativos notorios, hasta el rojo oscuro que representa los efectos positivos más llamativos.

Comenzando por el efecto de la variable independiente del confinamiento, a pesar de que el patrón de comportamiento del alcance del efecto de las medidas adoptadas durante el periodo de confinamiento ya se ha podido observar en el apartado del análisis numérico, la Figura 1 permite ofrecer una perspectiva geográfica de los resultados. De nuevo, se puede ver como la variable independiente del confinamiento tiene efectos negativos en las distintas zonas del territorio sobre el NO₂ y el PM₁₀ y positivos respecto del O₃. La diferencia de los resultados se debe, probablemente, a la severidad y estrictez de las medidas restrictivas adoptadas durante el periodo de confinamiento.

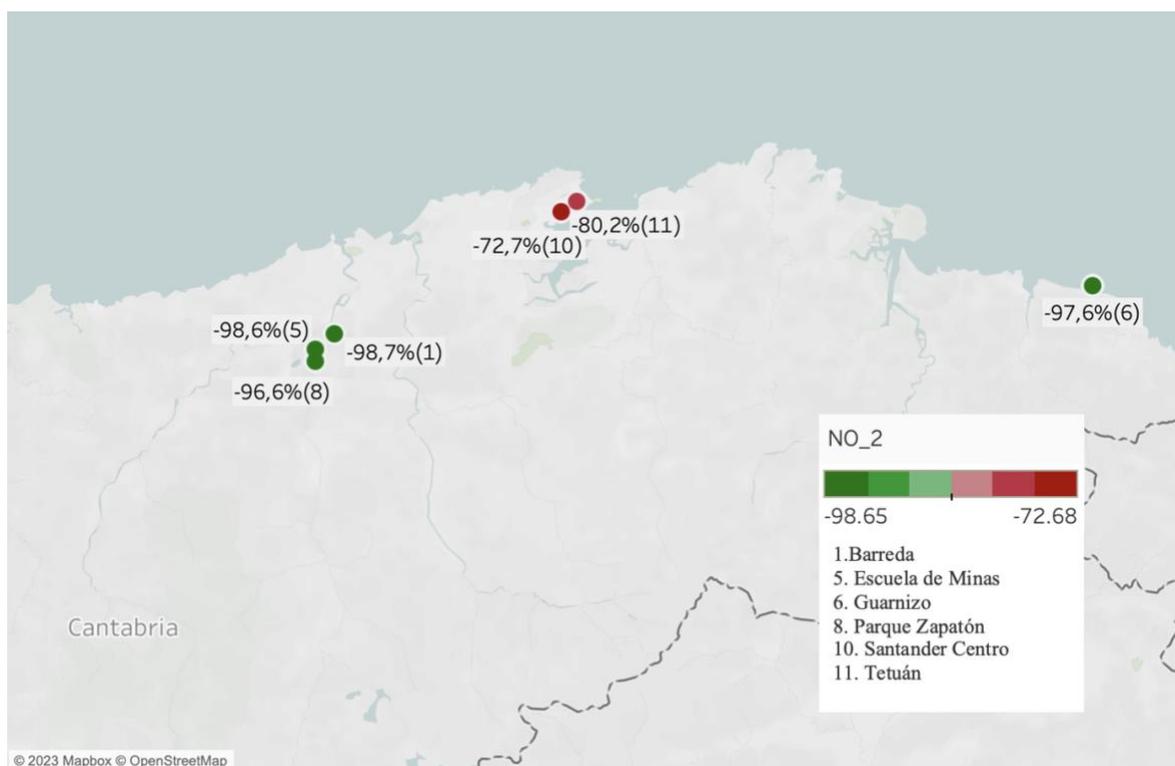
El panel (a) de la Figura 6 muestra que la imposición del confinamiento tuvo los efectos más pronunciados sobre los niveles de contaminación de NO₂. En concreto, los resultados más drásticos (alrededor del 62%) se observaron en 4 de las estaciones evaluadas: Barreda, Escuela de Minas, Guarnizo y Parque Zapatón. Resulta llamativo porque una de ellas se encuentra directamente en la costa este de Cantabria, mientras que las tres restantes se sitúan más en el interior oeste. No obstante, corresponden con las zonas más desarrolladas industrialmente del territorio, lo que explica los descensos tan significativos de la partícula

en cuestión. No deja de sorprender que los efectos no sean tan extremos en la ciudad de Santander, pues, inicialmente, se podría pensar que es ahí donde se concentran las mayores instalaciones industriales y los niveles más altos de tráfico rodado. No obstante, es en la capital donde las medidas de confinamiento fueron más flexibles permitiendo niveles mínimos de funcionamiento y concentrando en esta zonas las principales actividades esenciales. Por tanto, es explicable que se registrasen descensos no tan pronunciados como en el resto de las estaciones.

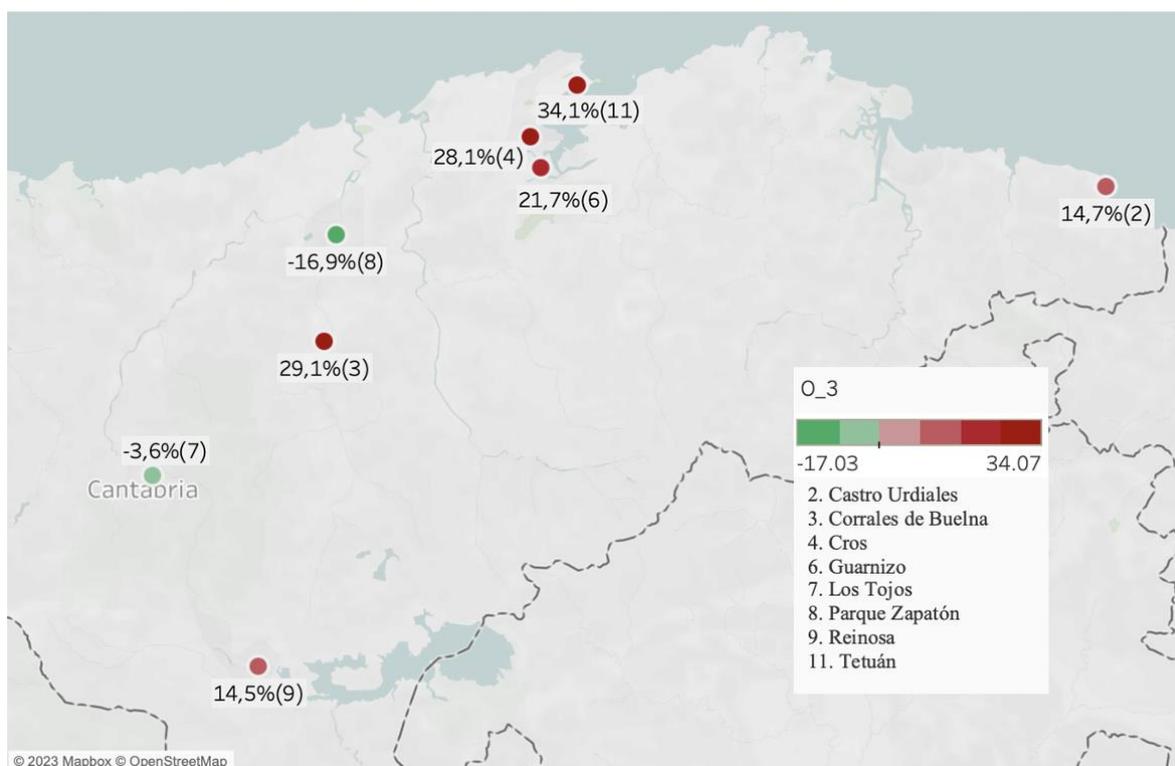
De nuevo, el patrón de comportamiento del contaminante O₃ fue opuesto al del NO₂ y, como se verá a continuación, al del PM₁₀. Como muestra el panel (b), en 5 de las 7 estaciones se recogieron un incremento de la concentración de ozono, siendo las estaciones que conforman las excepciones Los Tojos y Parque Zapatón con un descenso del 3,5% y 15,5% respectivamente, ambas situadas en el interior de la Comunidad Autónoma. Destaca el efecto positivo de la estación de Tetuán (40,6%), seguido por Corrales de Buelna (33,8%) y Cros (32,4%). En estas estaciones se concentra la mayor zona industrial de Cantabria, en concreto, en el área formado por la ciudad de Santander (cerca de la estación de Tetuán) y Torrelavega (en las proximidades de la estación de Cros). Por lo tanto, el fuerte incremento del nivel de concentración de ozono troposférico en esta zona se justifica por el descenso de compuestos con los que reacciona y desaparece y la reducción del transporte durante el periodo de confinamiento. Cuanto menos urbana sea una zona y menor contaminación tenga, mayor serán los niveles de O₃. Las demás estaciones, si bien también registraron aumentos, el efecto positivo fue más moderado oscilando entre 15,6% (Reinosa) y 24,2% (Guarnizo).

El efecto sobre el contaminante PM₁₀ fue también fuertemente negativo, pero mucho menos pronunciado que sobre el NO₂, tal y como muestra el panel (c) de la Figura 6. Únicamente se pueden apreciar dos estaciones, Los Tojos (21,9%) y Cros (0,3%), en las que el efecto del confinamiento fue positivo. En el resto del territorio, la disminución de la contaminación osciló entre 29,4% (Barreda) y 3,3% (Tetuán). Los resultados negativos son muy heterogéneos, ya que se mueven en dos polos extremos, por un lado, en reducciones del 26% y, por el contrario, del 2%, de media respectivamente. Esta diferencia territorial se podría explicar, presumiblemente, porque la reducción de los niveles de PM₁₀ es más drástica en zonas rurales de Cantabria dado que hay menos población que en las proximidades de las grandes ciudades donde las medidas para frenar la expansión del Covid-19 fueron impuestas de forma más estricta y generalizada que en las zonas rurales.

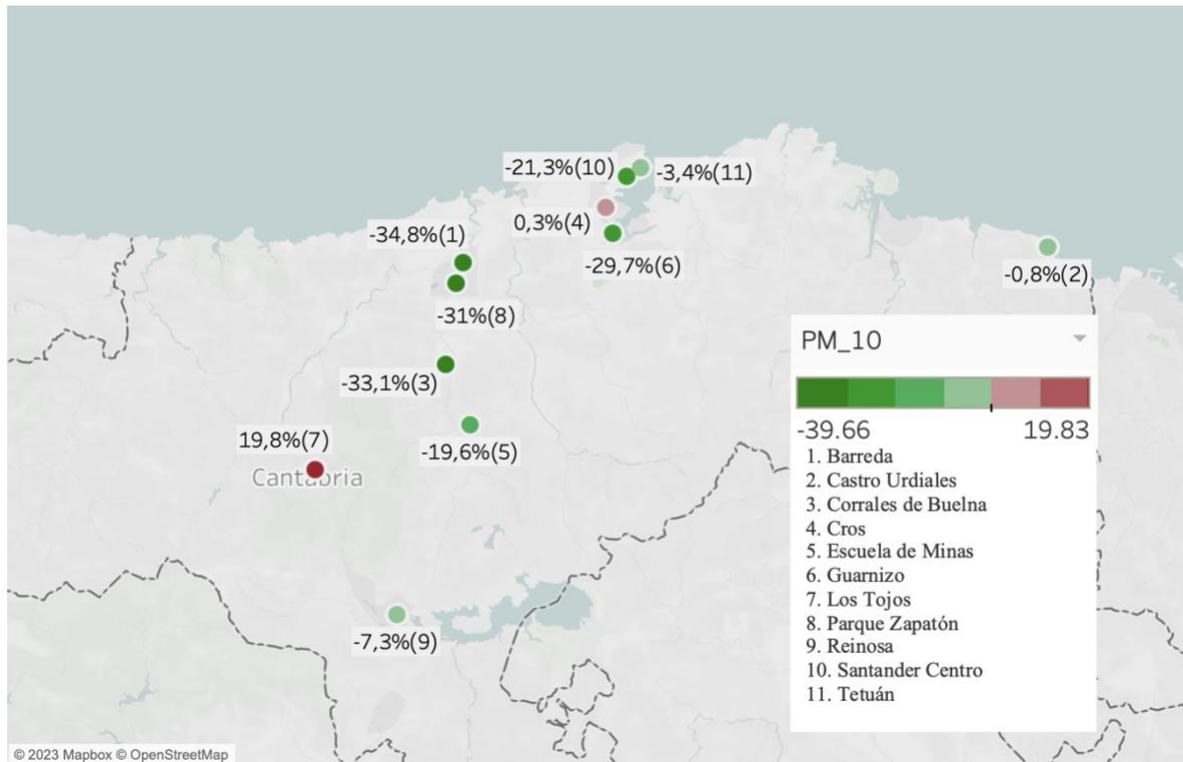
Figura 6. Los paneles (a), (b) y (c) representan la estimación del efecto del confinamiento por cada estación de Cantabria; (a) respecto al NO₂, (b) respecto al O₃ y (c) respecto al PM₁₀.



(a) Efecto del confinamiento en el NO₂.



(b) Efecto del confinamiento en el O₃.

(c) Efecto del confinamiento en el PM_{10} .

Fuente. Elaboración propia.

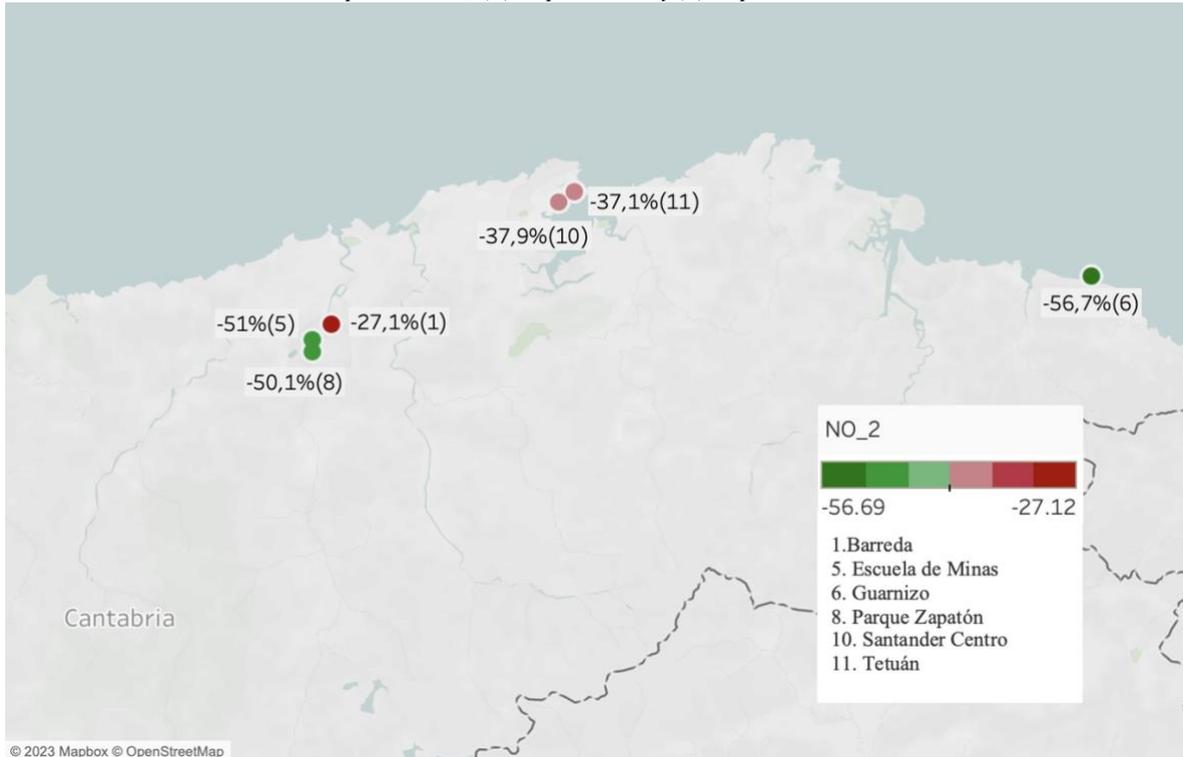
En segundo lugar, la Figura 2 permite realizar un análisis acerca del efecto que tiene el domingo en comparación con el resto de los días de la semana sobre los niveles de contaminación de la Comunidad de Cantabria. En cuanto al NO_2 , el efecto del domingo sobre los niveles de contaminación de este contaminante en particular es claramente negativo, pues todas las estaciones recogieron un descenso relevante de partículas, destacando Guarnizo (43,3%), Escuela de Minas (40%) y Parque Zapatón (39,4%). Este contaminante muestra la mayor relación dependiente respecto de la variable Sunday. NO_2 es un contaminante que se caracteriza por emitirse a través de las emisiones de los vehículos, especialmente aquellos de combustión diésel. De este modo, como consecuencia de que los domingos se produce una disminución del flujo del tráfico rodado, esta variable se relaciona negativamente con los niveles de contaminación del NO_2 . Es más, en las zonas rurales, la reducción es más drástica que en las urbanas, pues las personas prescinden en mayor medida de sus vehículos por no necesitar desplazarse con tanta habitualidad. No obstante, el descenso de esta partícula en la calidad del aire es de las más notorias respecto de todas las variables tomadas en consideración para el modelo.

Teniendo en cuenta el O_3 , el efecto es opuesto en comparación con los otros dos contaminantes analizados. Esto es, se produce un aumento de la concentración de ozono troposférico en la totalidad del territorio estudiado, excepto en la estación Los Tojos, que

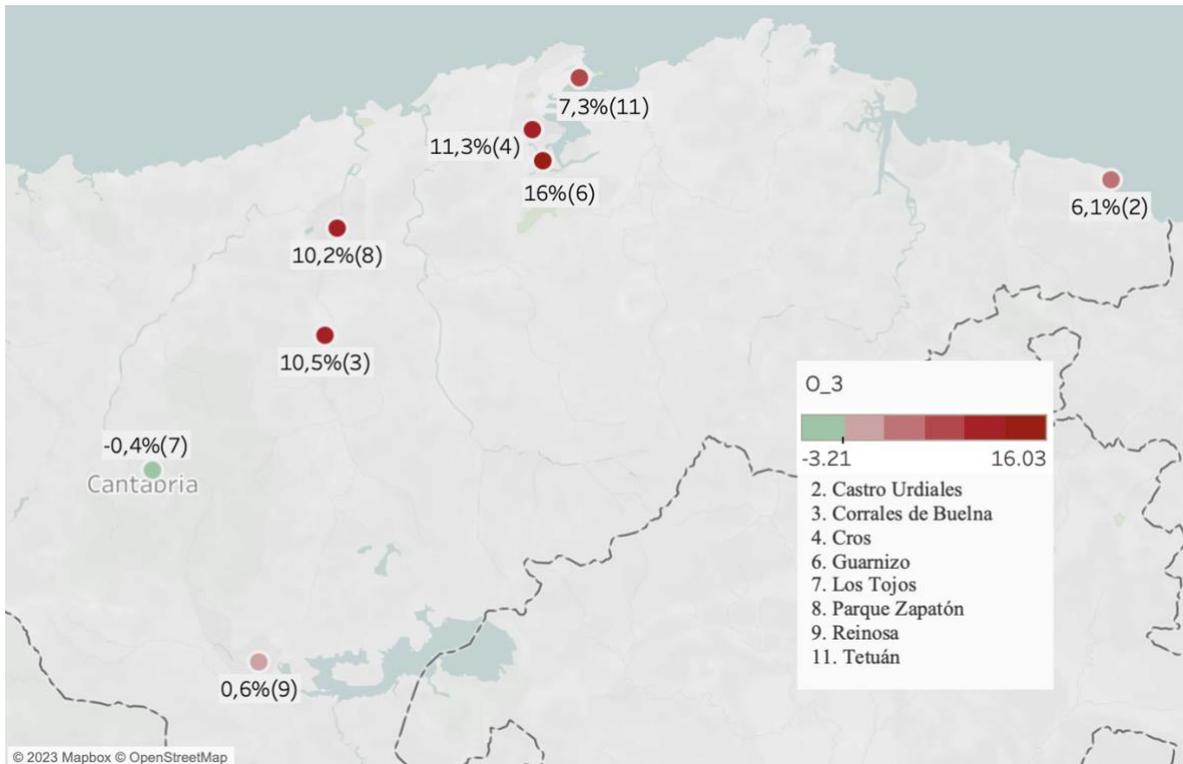
registra un descenso, pero muy leve de 0,4%. No es destacable por la reducción que supone, sino por ser la excepción en comparación con el resto de las estaciones. Los niveles de contaminación positivos oscilan entre 6,3% (Corrales de Buelna) y 17,4% (Guarnizo). Por tanto, no llegan a aumentar en la misma escala que se reduce la contaminación de NO₂ y PM₁₀, pues su descenso es mucho mayor. Los mayores incrementos se registran en la periferia de la ciudad de Santander, considerada la mayor zona urbana de Cantabria, y en zonas más rurales. Su justificación puede venir dada por las altas temperaturas y las mayores horas de sol que se registran en estas zonas, pues el O₃ aumenta con la radiación solar. Además, como ya se ha explicado, el tráfico rodado es menor durante el fin de semana, en especial el domingo, de modo que no se emiten niveles demasiado elevados de compuestos con los que reacciona el ozono troposférico y desaparece.

Finalmente, la partícula PM₁₀ sigue un patrón de comportamiento relativamente parecido al del NO₂. En este caso no hay excepciones, puesto que en la totalidad de las estaciones evaluadas se recoge un descenso de la contaminación generada por PM₁₀. La reducción máxima se registra en Corrales de Buelna (28,1%) y la mínima en Tetuán (11,7%). Cantabria es una Comunidad Autónoma altamente industrial, cuyas instalaciones quedan paralizadas durante el fin de semana. Este aspecto podría explicar el descenso tan notorio de la presencia de estas partículas en la calidad del aire del territorio. De hecho, las mayores reducciones se registran en la zona industrial previamente indicada, entre la ciudad de Santander y Torrelavega.

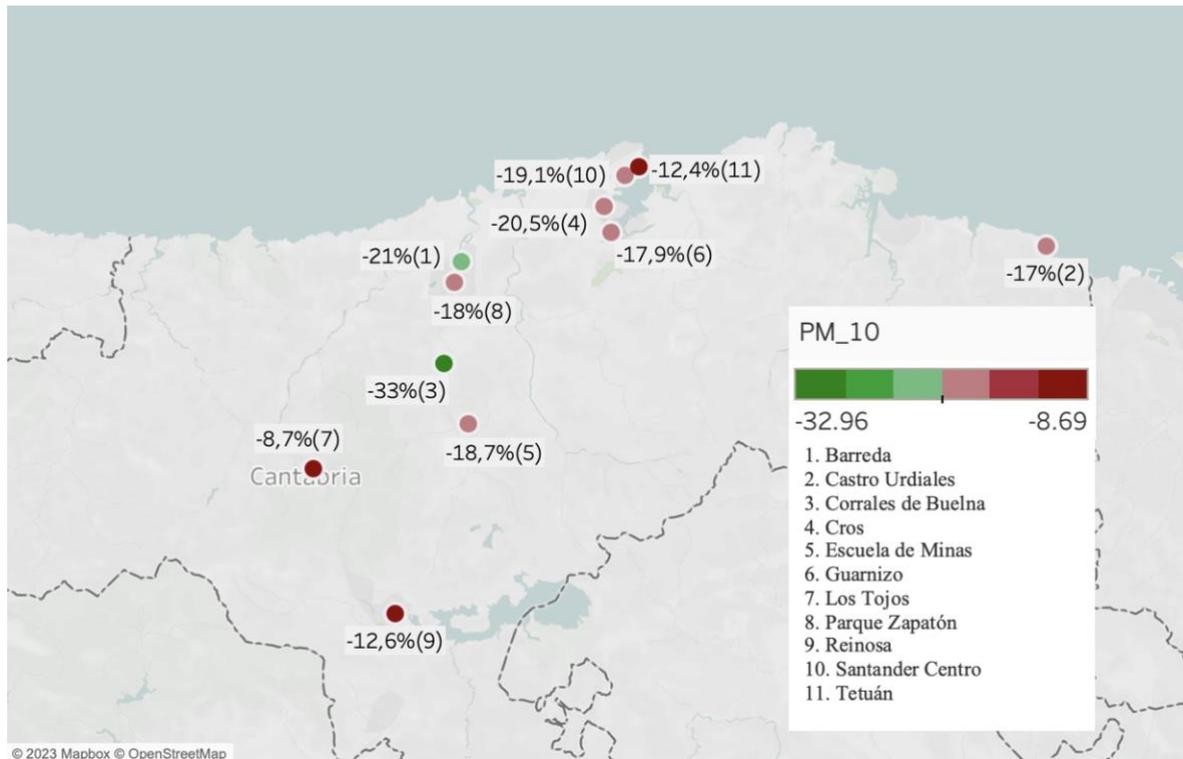
Figura 7. Los paneles (a), (b) y (c) representan la estimación del efecto del domingo por cada estación de Cantabria; (a) respecto al NO_2 , (b) respecto al O_3 y (c) respecto al PM_{10} .



(a) Efecto del domingo en el NO_2 .



(b) Efecto del domingo en el O_3 .

(c) Efecto del domingo en el PM₁₀.

Fuente. Elaboración propia.

Por último, mediante la Figura 8 se analiza el efecto de la intrusión del polvo sahariano en las partículas contaminantes NO₂, O₃ y PM₁₀. A diferencia del resto de variables independientes estudiadas, las advecciones del polvo del Sáhara generan un aumento de los tres contaminantes en la totalidad de las estaciones evaluadas, variando en la intensidad del incremento. No obstante, el aumento más llamativo se registró para el contaminante PM₁₀, siendo la diferencia entre el máximo recogido para las partículas NO₂ y O₃ y el mínimo para PM₁₀ casi del 42%.

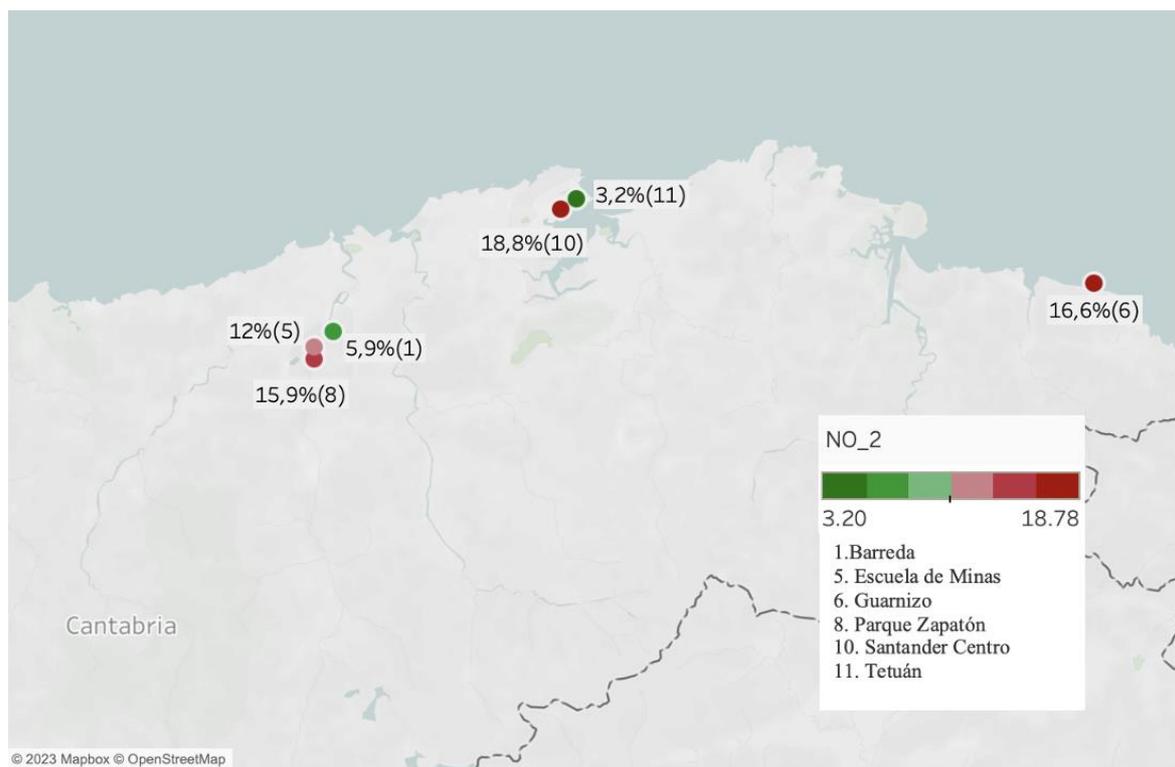
Entrando más en detalle, respecto del NO₂, la mayoría de los resultados oscilan entre el 12,7% (Escuela de Minas) y el 20,7% (Santander Centro). Únicamente dos de las estaciones, Tetuán y Barreda, registran valores más moderados, 3,3% y 6,1% respectivamente. Las estaciones con aumentos mayores de niveles de NO₂ en el aire se caracterizan por estar ubicadas en zonas donde las condiciones climatológicas favorecen también la presencia de mayores niveles de presencia de polvo del Sáhara. Se trata de áreas donde las precipitaciones son escasas y la velocidad del viento baja comparado con otras zonas más expuestas al Mar Cantábrico como la estación de Guarnizo (que recoge un aumento del 18,1%). Por lo tanto, estas condiciones pueden justificar la diferencia entre las estaciones que muestra el panel (a). La dispersión del polvo del Sahara, su advección y, consecuentemente, el nivel de partículas

NO₂ está muy relacionado con las variables climatológicas, pues a mayor precipitaciones y vientos, más se favorece la dispersión del polvo proveniente del Desierto del Sáhara y menor es su adhesión a dichas partículas.

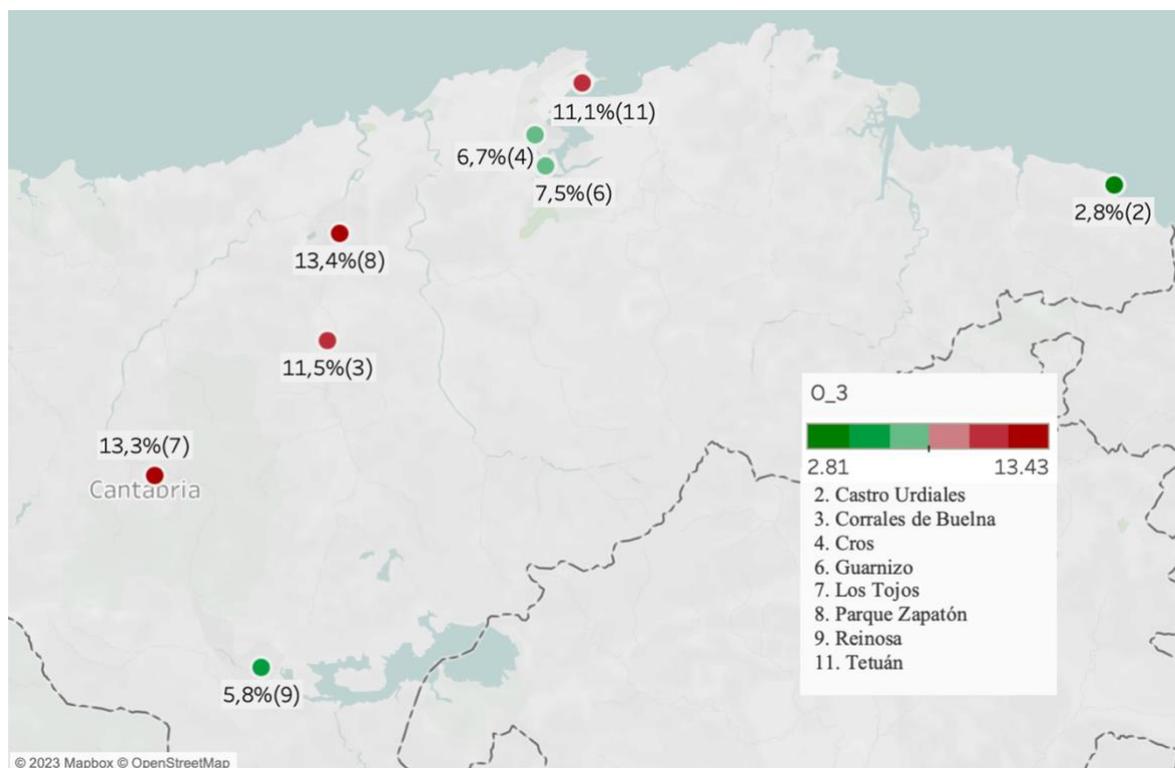
El efecto, también positivo, en las concentraciones de O₃ fueron muy similares a los resultados explicados en el párrafo anterior en referencia al NO₂. No obstante, en comparación, estos resultados son ligeramente más moderados, oscilando el resultado registrado entre un mínimo de 2,84% (Guarnizo) y un máximo de 14,2% (Los Tojos). Llama la atención que los coeficientes para el ozono troposférico son contrarios a los del NO₂ en la mayoría de las estaciones. Es decir, en las estaciones donde se registraron aumentos más fuertes de NO₂, recogen aumentos menores de O₃ y viceversa. Sin embargo, no sorprende por lo explicado previamente: cuando mayor sea el nivel de NO₂ menor es el de O₃ porque tiene niveles mayores de componentes con los que reacciona y desaparece.

La intrusión de polvo del Sáhara tuvo un mayor efecto sobre las partículas PM₁₀. La media del aumento de este contaminante fue del 49,2%, lo cual se sitúa muy por encima de los otros dos contaminantes analizados. El resultado más moderado se registró en la estación de Tetuán (31,7%) y el más acusado en Los Tojos (73,3%). El contaminante PM₁₀, al ser componentes sólidos y líquidos que se encuentran flotando en el aire, su relación positiva con el polvo del desierto del Sáhara es predecible, dado que el polvo está formado por pequeñas partículas de arena que son transportadas desde la zona sahariana. De nuevo, se puede reconocer un gran efecto de las condiciones meteorológicas en la presencia de polvo sahariano y su efecto sobre las partículas PM₁₀. Las estaciones que recogieron los dos resultados más acusados se encuentran en el interior de la Comunidad Autónoma de Cantabria donde las precipitaciones son menores y los vientos menos fuertes que en la costa. No obstante, la estación de Guarnizo es una excepción a esta regla general, pues, ubicada en la costa este del territorio, registra un aumento del 66,7% de PM₁₀ como consecuencia del polvo del Sáhara.

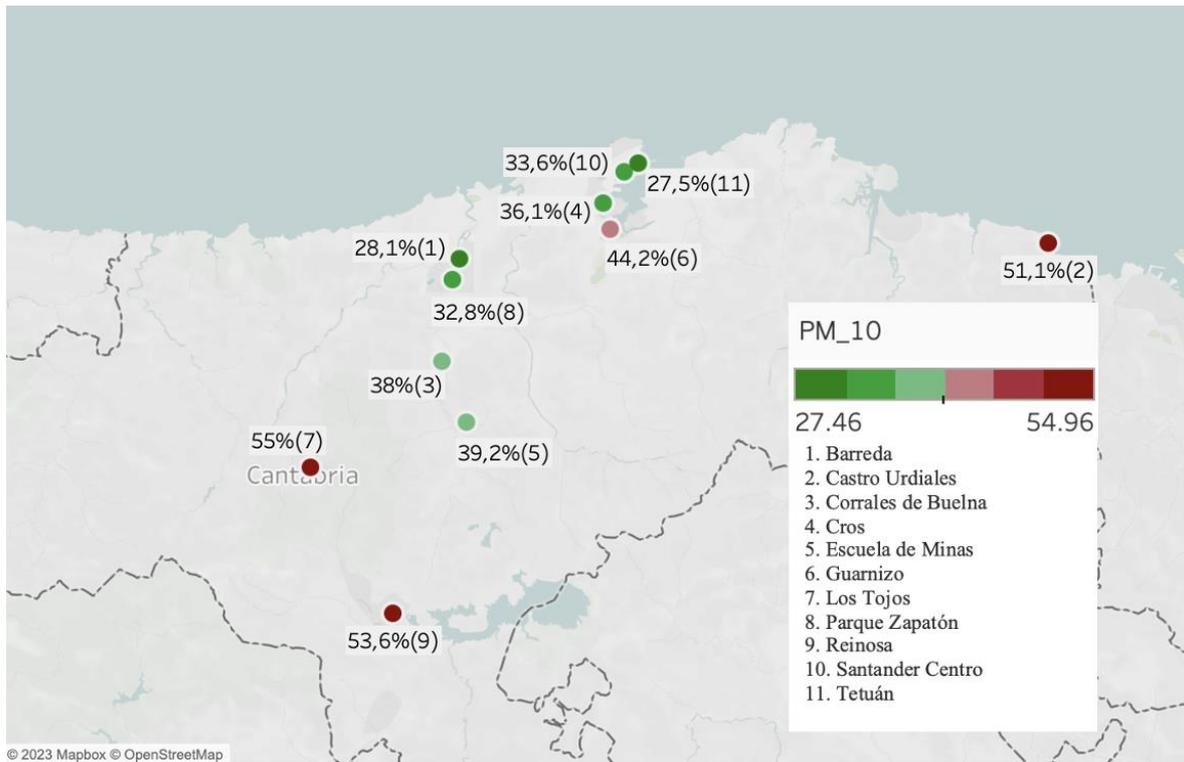
Figura 8. Los paneles (a), (b) y (c) representan la estimación del efecto de las advecciones del polvo del Sáhara por cada estación de Cantabria; (a) respecto al NO₂, (b) respecto al O₃ y (c) respecto al PM₁₀.



(a) Efecto de las advecciones del polvo del Sáhara en el NO₂.



(b) Efecto de las advecciones del polvo del Sáhara en el O₃.



(c) Efecto de las advecciones del polvo del Sáhara en el PM₁₀.

Fuente. Elaboración propia.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

El presente trabajo parte de la hipótesis de que las medidas implementadas para frenar la pandemia generada por el Covid-19 durante el periodo de confinamiento impuesto por el estado de alarma, decretado por el Gobierno español el día 15 de marzo de 2020 y por el que se estableció una cuarentena que terminó oficialmente el 21 de junio de ese mismo año, tuvieron una fuerte incidencia sobre la contaminación atmosférica y calidad del aire, en concreto, de la Comunidad Autónoma de Cantabria. Para este punto de partida se quiere analizar si y en qué medida las restricciones a las actividades económicas y humanas, en concreto, la actividad industrial y el tráfico rodado, generan un efecto sobre los niveles de determinados contaminantes presentes en la atmósfera. A la hora de extraer los datos y llevar a cabo el análisis para cuestionar la hipótesis planteada se toma como periodo de muestreo los años de 2012 a 2022. Se compara tanto el periodo previo al confinamiento como el periodo posterior en el que las limitaciones se van relajando y flexibilizando.

Tras realizar el análisis y obtener los resultados mediante la aplicación del modelo basado en una regresión lineal múltiple, resulta claro que el objetivo que se ha planteado ha sido alcanzado y la hipótesis de investigación es verdadera. A pesar de que los tres contaminantes evaluados, NO, O₃ y PM₁₀ muestran un patrón de comportamiento distinto, este trabajo pone de manifiesto que, en efecto, existe una relación directa entre las actividades humanas y los niveles de contaminación de diferentes partículas que se encuentran en la atmósfera. De media, el contaminante NO₂ disminuyó un 11%, el PM₁₀ un 2,2% y, por el contrario, el O₃ aumentó un 6,6%.

Una de las conclusiones más relevantes a las que llega este trabajo es que, a pesar de que las medidas para frenar la expansión de la pandemia se implementaron en igualdad de condiciones y de la misma manera en todo el territorio de Cantabria, las reducciones y los aumentos de los niveles de concentración de las diferentes partículas no fueron las mismas y, a su vez, el modelo arroja resultados heterogéneos en las diferentes zonas del territorio estudiado. El trabajo toma en consideración un máximo de 11 estaciones de control localizadas en Cantabria que miden los niveles de las partículas en el aire, pero no todas las estaciones recogen resultados de los tres contaminantes evaluados.

La diferencia fundamental se observa entre las estaciones que se encuentran en la costa de la Comunidad Autónoma y las que se sitúan en el interior de la misma. Las causas de esta observación pueden ser (i) que los contaminantes son muy distintos entre sí, variando en sus orígenes, composiciones y comportamientos; (ii) que los mayores índices de actividad industrial, otras actividades humanas y del tráfico rodado se encuentran en las zonas junto a las grandes ciudades como Santander que tienden a estar más desarrolladas económicamente que las zonas rurales y (iii) que hay otras variables que influyen en sus aumentos o disminución, notoriamente las condiciones meteorológicas, esto es, las precipitaciones, la temperatura y el viento. Su intensidad, frecuencia y cantidad tienen una gran influencia en las alteraciones de los niveles de contaminantes como ha podido probar también este trabajo. Cuanto mayores son las tres variables meteorológicas, menores son los niveles de NO₂ (6,3%) y de PM₁₀ (2,8%) y mayor será la concentración de O₃ (3,1%).

Muy llamativo ha resultado ser la disminución del contaminante NO₂ como consecuencia de las limitaciones a la actividad económica, focalizando un descenso mayor en las zonas urbanas que en las rurales, pues ahí se encuentran las principales instalaciones industriales y se concentra el mayor número de vehículos. Este contaminante llegó a descender un 62,7% durante el periodo de confinamiento en la zona de Torrelavega que se caracteriza por ser, junto a la ciudad de Santander, el epicentro de la industria cántabra. Además, se observó de manera clara que la reducción fue más acusada en la zona oeste e interior del territorio en comparación con la costa y el este, dado que ahí se encuentran las principales instalaciones industriales. El confinamiento supuso una paralización de los servicios y actividades no esenciales, de modo que las actividades más contaminantes y las que emiten más NO₂ se vieron obligadas a parar.

Parecido patrón de comportamiento demostró tener el contaminante PM₁₀, no obstante, sus resultados fueron menos bruscos y más homogéneos en términos geográficos. Su descenso medio fue del 13,6% durante el periodo de confinamiento. Las variables que más influencia han demostrado tener sobre estas partículas volátiles son, por un lado, la intrusión de polvo del Sáhara por ser, en efecto, partículas adheridas al aire y, por el otro lado, las condiciones meteorológicas en especial las precipitaciones y la velocidad del viento pues permite limpiar el aire y desconcentrar la acumulación de partículas. Así, los aumentos máximos registrados estaban alrededor del 65% y los mínimos del 35%, creando un rango

bastante estrecho. Esto se debe, presumiblemente, a la cercanía de la Península Ibérica con el continente africano.

El efecto fin de semana, concretamente, el domingo, también muestra una relación estrecha con la disminución tanto del NO₂ como del PM₁₀, siendo la primera mayor que la segunda por una diferencia del 19%. Es evidente, de forma similar al confinamiento, pero en menor medida, la actividad industrial y el tráfico rodado se ve reducido durante este día, de modo que las emisiones de los mencionados contaminantes son muy leves.

Por el contrario, el O₃ tuvo el efecto inverso al del NO₂ y PM₁₀ en casi todas las variables incluidas en el modelo, excepto en la temperatura media, los días festivos y las dos relativas a fuentes naturales, el polvo del Sáhara y la combustión de biomasa. Especial atención merece el aumento que genera la variable confinamiento. Por formarse principalmente a través de procesos de reacción con otros componentes (como los óxidos de nitrógeno), una reducción de estos precursores conlleva la disminución, por tanto, de sus niveles de concentración atmosférica. Además, se trata de un componente muy relacionado con los factores climatológicos. Una exposición mayor a la radiación solar y a temperaturas elevadas favorece su presencia, de modo que, España, al tener temperaturas tan elevadas, es más propensa a tener niveles elevados de ozono troposférico. No obstante, a diferencia de otros territorios del país, Cantabria no se caracteriza por tener temperaturas tan altas, de modo que el nivel ozono es menor que en otras zonas de la Península Ibérica. Con las variables domingo y polvo del Sáhara, el O₃ también aumentó, pero en menor medida, creciendo un 8% y 9% respectivamente.

A través de los resultados obtenidos, también se puede confirmar que las variables meteorológicas tienen una ligera relación con los niveles de contaminación del aire, esto es, ayudan a reducir la presencia de contaminantes, pero en menor medida que el resto de las variables. En referencia a la temperatura media, la velocidad del viento media y las precipitaciones la disminución que logran son del 3%, 2% y 1% respectivamente. Por tanto, el clima de Cantabria supone un obstáculo a la eliminación y depuración del aire.

Estos resultados pueden ser de gran utilidad a la hora de diseñar e implementar medidas verdaderamente eficaces para la reducción de la contaminación y la mejora de la calidad del aire en Cantabria y el resto de España. Este trabajo pone de manifiesto los factores que tienen

mayor influencia en los niveles de contaminantes y que, por tanto, deben tenerse en cuenta para planificar la estrategia más eficiente cuyo objetivo sea disminuir la contaminación. Ejemplos de estos factores son la limitación a las actividades industriales, la reducción del tráfico rodado, el clima característico de Cantabria y su localización geográfica. Además, resultaría muy interesante y favorecedor hacer distinciones en cuanto a las diferentes zonas críticas del territorio (por ejemplo, las zonas urbanas), pues algunas de ellas, como se ha mencionado, y por su concentración de instalaciones industriales, de población o de vehículos, pueden requerir medidas adicionales y más estrictas para lograr el objetivo planteado.

Las limitaciones a las que se ha enfrentado este trabajo son, en primer lugar, que no se ha realizado un análisis detallado de todas las variables incluidas en el modelo; en segundo lugar, que algunos niveles de significación obtenidos eran demasiado bajos y, por último, que se podrían haber incluido más variables en el modelo que podrían haber mostrado una influencia significativa sobre los niveles de contaminación.

No obstante, este trabajo deja abierta la posibilidad a nuevas líneas de investigación. Además de replicar este estudio al resto del territorio español para poder unificar y armonizar las medidas para frenar la contaminación y alcanzar niveles de calidad del aire moderados y deseados, se puede ampliar el estudio mediante la inclusión de otras variables en el modelo. Concretamente para Cantabria, resultaría de gran interés tener en cuenta el relieve que caracteriza esta zona. Siendo la Cordillera Cantábrica la más extensa de España con 480km de longitud, ésta podría tener gran relación con la disminución o aumento de los contaminantes. Influye determinantemente no solo en el clima de la zona que la rodea, sino también en la dispersión de partículas, pues actúa como obstáculo fomentando la concentración de contaminantes. Asimismo, existen otras variables ofrecidas por la AEMET que se podrían incluir en el modelo tales como la dirección del viento, la humedad, la insolación o la radiación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARTÍCULOS ACADÉMICOS

Ancell, R. y Célis, R. (2012). *Termopluviometría de Cantabria durante el periodo 1981-2010*. AEMET.

(https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/421/7/NT_10_AEMET.pdf)

Arrieta, A.J. (2016). Dispersión de material particulado (PM₁₀), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16 (2), pp. 43-54.

Ballester, F. (2005). Contaminación Atmosférica, Cambio Climático y Salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79 (2). <https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v79n2/colaboracion3.pdf>.

Benabides, H.O y León, G.E. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>.

Ceballos, M. A., Segura, P., Muñoz, P., Gutiérrez, Ed, Gracia, J.C., Ramos, P., Reaño, M., García, B., García, M., Prima, H., Aranda, J.A., Veiras, X., Bárcena, J., Belmonte, P., Luengo, P., Navascués, E., Orihuel, M., Hernández, K., Cabo, J. (2020). *La Calidad del aire en el Estado español durante 2019*. Ecologistas en Acción. <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2020/06/informe-calidad-aire-2019.pdf>.

Cerrillo, A. (2016). *La Tierra ha perdido el 58% e sus animales en los últimos 40 años*. *Natural*. <https://www.lavanguardia.com/natural/20161027/411372645010/58-animales.html>.

Cubria, L. (2007). *Cantabria, un lugar donde invertir*. Gobierno de Cantabria.

diabetes mortality in the US. *Environ Research*, vol. 165, pp. 330-336.

Díaz, J., Linares, C., Carmona, R., Russo, A., Ortiz, C., Salvador, P. y Trigo, R. (2017). Saharan dust intrusions in Spain: Health impacts and associated synoptic conditions.

Environmental Research. Vol. 156, pp. 455-467.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.047>.

Fernández, A (2020). *Así ha bajado la contaminación durante el estado de alarma por el coronavirus*. Greenpeace. <https://es.greenpeace.org/es/noticias/asi-ha-bajado-la-contaminacion-durante-el-estado-de-alarma-por-el-coronavirus/>

García R, Díaz J, Trigo RM, Hernández E, Dessai S. Extreme summer temperatures in Iberia: health impacts and associated synoptic conditions. *Annales Geophysicae*. 2005;23:239-251.

Gómez-Zotano, J., Alcantara-Manzanares, J., Olmedo-Cobo, J. A. y Martínez-Ibarra, E. (2015). La sistematización del clima mediterráneo: identificación, clasificación y caracterización climática de Andalucía (España). *Revista de Geografía Norte Grande*, n. 61, pp. 161-180.

Griffin DW. Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health. *Clin Microbiol Rev*. 2007 Jul; 20(3): 459–477.

Hojosa, E. (2016). *Introducción a la edición y visualización de datos inmediatos*. Universidad Internacional de Andalucía.

Lee, T., Markowitz, E. y Leiserowitz, A. (2015). Predictors of public climate change awareness and risk perception around the world. *Revista Nature Climate Change*, 5 (11). DOI:10.1038/nclimate2728.

Lim, C. C. (2018). Association between long-term exposure to ambient air pollution and

Montero. R (2016): Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada. Universidad de Granada. España.

Moreira I, Linares C, Follos F, Sárnchez-Martínez G, Vellón JM, Díaz J. Short-Term Effects of Saharan Dust Intrusions and Biomass combustion on Birth Outcomes in Spain. *Science of the Total Environment*. 20 January 2020, 134755. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134755.

Oyarzún, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 26, pp. 16-25.

Pandolfi M, Tobias A, Alastuey A, Sunyer J, Schwartz J, Lorente J, Pey J, Querol X. Effect of atmospheric mixing layer depth variations on urban air quality and daily mortality during Saharan dust outbreaks. *Sci Total Environ* 2014 Oct 1;494-495:283-9.

Parra, R. (2017). Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 9(15).

Pérez L, Tobías A, Querol X, Künzli N, Pey J, Alastuey A et al. Coarse particles from Saharan dust and daily mortality. *Epidemiology* 2008; 19:1-8.

Querol, X. (2008). *Calidad del aire, partículas en suspensión y metales*. SciELO Public Health.

Roca, R. (2021). La contaminación del aire vuelve a los niveles anteriores al COVID. *Periódico de La Energía*. <https://elperiodicodelaenergia.com/la-contaminacion-del-aire-vuelve-a-los-niveles-anteriores-al-covid/>.

Russo A, Soussa PM, Duraó RM, Ramos AM, Salvador P, Linares C, Díaz J, Trigo RM. Saharan dust intrusions in the Iberian Peninsula: Predominant synoptic conditions. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137041. *Science of the Total Environment* 717 (2020)137041.

Salvador P, Molero F, Fernández AJ, Tobías A, Pandolfi M, et al., Synergistic effect of the occurrence of African dust outbreaks on atmospheric pollutant levels in the Madrid metropolitan area. *Atmos Res* 2019; 226:208-218.

Tobías A, Pérez L, Díaz J, Linares C, Pey J, Alastruei A, Querol X. Short-term effects of particulate matter on total mortality during Saharan dust outbreaks: A Case-Crossover analysis in Madrid (Spain). *Science of Total Environment*. 2011a; 412-413:386-389.

Turrión, E. (2020). Preguntas y respuestas: la contaminación atmosférica en España durante la Covid-19. *Newtral*. <https://www.newtral.es/contaminacion-aire-espana-pandemia/20201126/>.

Venegas, L. y Mazzeo, N (2012). *La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera*. Repositorio Institucional de la UNLP.

2. INFORMES

Admin (2015). Impactos medioambientales del uso de biomasa para obtención de energía. *Energías Renovables*. <https://www.energiasrenovablesinfo.com/biomasa/impactos-medioambientales-biomasa/>

AEMA, CCI y OMS (2011). *Los impactos del cambio climático en Europa: una evaluación basada en indicadores*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/impactos%20cambio%20climatico_tcm30-185070.pdf .

AEMET (2017). *Parámetros estadísticos*. https://www.aemet.es/documentos/es/datos_abiertos/Estadisticas/Estadisticas_meteorofenologicas/evmf_parametros.pdf.

AEMET (s.f.) *AEMET OpenData*. <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/info>.

AEMET (s.f.). *Análisis estacional. Cantabria*. https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/analisis_estacional?k=can.

Banco Mundial (2022). *Lo que hay que saber sobre el cambio climático y la contaminación atmosférica*. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/09/01/what-you-need-to-know-about-climate-change-and-air-pollution>.

Copernicus: Europe's eyes on Earth (2022). *La mejora de la calidad del aire durante el primer confinamiento en Europa habría evitado más de 800 muertes*. Atmosphere Monitoring Service. https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2022-01/CAMS_ECMWF%20LSHTM%20study_ES.pdf.

Dirección General de Salud Pública, Consejería de Sanidad (2020). *Intrusiones de polvo del Sahara y calidad del aire*. Comunidad de Madrid. https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/sanidad/samb/intrusiones_de_polvo_del_sahara_y_calidad_del_aire_16_03_2022.pdf.

Dirección General de Salud Pública: Indicadores de Contaminación atmosférica (s.f.). *Calidad del aire: Ozono (O₃) troposférico*. https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/sanidad/samb/c_atm_o3.pdf.

Dirección General de Tráfico (2021). *Anuario Estadístico General*. https://www.dgt.es/export/sites/web-DGT/.galleries/downloads/dgt-en-cifras/publicaciones/Anuario_Estadistico_General/Anuario-estadistico-general2021.pdf.

Ecologistas en Acción (2022). *La contaminación por ozono en el Estado español durante 2022*. <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/2022/10/contaminacion-ozono-2022-informe.pdf>.

European Environment Agency (2020). *Contaminación Atmosférica*. <https://www.eea.europa.eu/es/pressroom/newsreleases/themes/air/intro>.

European Environment Agency (s.f.). *El Medio ambiente en Europa: segunda evaluación. Capítulo 5. Ozono troposférico*. file:///Users/EugeniaMartinez/Downloads/5es%20(1).pdf.

Fundación General de la Universidad Complutense de Madrid (2012). *Cambio Global España 2020/50. Cambio climático y salud*. <https://salud-ambiental.com/wp-content/uploads/varios/Informe%20Salud%20y%20Cambio%20Climatico.pdf>.

Gobierno de Cantabria (s.f.). *Informe de Sostenibilidad Ambiental 2009-2012*. https://www.cantabria.es/documentos/PlanCarreteras/04_Identificacion_y_valoracion_de_impactos-26_50.pdf.

IPCC (2014). *Cambio climático 2014: Informa de síntesis*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf.

Ministerio de Sanidad (2020). *Plan para la Transición hacia una nueva normalidad*. <https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/resumenes/Documents/2020/PlanTransicionNuevaNormalidad.pdf>.

Ministerio del Medio ambiente (2022). *La contaminación del aire y su relación con el cambio climático*. <https://mma.gob.cl/la-contaminacion-del-aire-y-su-relacion-con-el-cambio-climatico/>.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020). *Evaluación de la calidad del aire en España*. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informeevaluacioncalidadaireespana2020_tcm30-529210.pdf.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2019). *Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica*. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/primerpncca_2019_tcm30-502010.pdf.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2019). *Estadística de Calidad del Aire (Ficha 12041 del IOE): Informe metodológico estandarizado*. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/ims_7104_ca_v1_tcm30-502328.pdf.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s.f.). *Iniciativas europeas*. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/pol-med/iniciativas_europeas.aspx.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s.f.). *Ozono*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/ozono.aspx>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s.f.). *Óxidos de Nitrógeno*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.aspx>.

MITECO (2021). *Plan marco de acción a corto plazo en caso de episodios de contaminación del aire ambiente por partículas inferiores a 10 micras (pm10), partículas inferiores a 2,5 micras (pm 2,5) dióxido de nitrógeno (no2), ozono (o3) y dióxido de azufre (so2)*. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/09072021planepisodios_tcm30-529218.pdf.

NASA (2020). *NASA, NOAA Analyses Reveal 2019 Second Warmest Year on Record*. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-2019-second-warmest-year-on-record>.

NIH (s.f.). *La Contaminación del Aire y Su Salud*. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/contaminacion-causo-9-millones-muertes-2019_18277.

OMS (2022). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

ONU Habitat (s.f.). *Contaminación, automóviles y calidad del aire*.
<https://onuhabitat.org.mx/index.php/contaminacion-automoviles-y-calidad-del-aire>.

UN Acción por el Clima (s.f.) *Causas y efectos del cambio climático*.
<https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>.

3. RECURSOS DE INTERNET

Aprobación definitiva del Estudio de Detalle para permitir superar la altura para la futura edificación de la planta de producción de energía a través de combustibles alternativos CDR/CSR. Expediente 1072/2021 (BOC 25 de enero de 2022, núm. 16).

Ayuntamiento de Valladolid (s.f.). *Material particulado PM10/PM2,5*. Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid.

Calidad del aire de Cantabria (s.f.). *Estaciones de medida*.
<https://airecantabria.com/estaciones.php>.

Comisión Europea (2021). *¿Cómo sería vivir en un mundo con contaminación cero?*.
https://spain.representation.ec.europa.eu/noticias-eventos/noticias-0/como-seria-vivir-en-un-mundo-con-contaminacion-cero-2021-06-09_es.

Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité De Las Regiones (2013). *Programa «Aire Puro» para Europa*.

Consejo de Ministros (2020). *El Gobierno aprueba un plan de desescalada que se prolongará hasta finales de junio*. La Moncloa.
https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/resumenes/Paginas/2020/280420-consejo_ministros.aspx.

Consejo de Ministros (2020). *Plan de desescalada*. La Moncloa.

Decreto 32/2018, de 12 de abril, por el que se aprueba la Estrategia de Acción frente al Cambio Climático 2018-2030. (BOC 20 de abril de 2018, núm. 78).

Decreto 50/2021, de 10 de junio, por el que se regula la concesión directa de subvenciones del Plan RENOVE, para la renovación de la flota de vehículos en Cantabria (BOC 15 de junio de 2021, núm. 114).

Directiva (UE) 2016/2284 del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de diciembre de 2016 relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, por la que se modifica la Directiva 2003/35/CE y se deroga la Directiva 2001/81/CE. (DOUE 17 de diciembre de 2016).

Directiva 2001/81/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2001, sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos (DOCE 27 de noviembre de 2001, núm 309).

Ecologistas en acción (2022). *La contaminación del aire por ozono repunta en España por efecto del cambio climático*. <https://www.ecologistasenaccion.org/211310/la-contaminacion-del-aire-por-ozono-repunta-en-espana-por-efecto-del-cambio-climatico/>.

Europa Press Cantabria (2022). *Cantabria activa el protocolo de contaminación al superarse el nivel de ozono en Los Tojos*. <https://www.europapress.es/cantabria/noticia-cantabria-activa-protocolo-contaminacion-superarse-nivel-ozono-tojos-20220713185629.html>.

Geografía Física de Cantabria (s.f). *Características físicas de Cantabria*. Editorial SM

Gobierno de Cantabria (s.f). El Gobierno de Cantabria crea el Consejo Asesor de Cambio climático y Medio ambiente de Cantabria. *Cantabria.es*. https://www.cantabria.es/web/comunicados/detalle/-/journal_content/56_INSTANCE_DETALLE/16413/16764064.

Greenpeace (2019). *Efectos del cambio climático en el medio ambiente*. <https://es.greenpeace.org/es/en-profundidad/asi-nos-afecta-el-cambio-climatico/efectos-del-cambio-climatico-en-el-medio-ambiente/>.

IQAir Staff Writers (s.f.). *Cómo el viento y el clima afectan a la contaminación del aire*. <https://www.iqair.com/es/newsroom/wind-weather-air-pollution>.

Junta de Andalucía: consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul (s.f). *Calidad del aire y cambio climático: dos variables de una misma ecuación*. <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/atmosfera/la-calidad-del-aire/calidad-del-aire-y-cambio-climatico-dos-variables-de-una-misma-ecuacion>.

Ley 37/2007, de 16 de noviembre, sobre reutilización de la información del sector público. (BOE 17 de noviembre de 20107, núm. 276).

Madrid Salud (s.f.). *Dióxido de nitrógeno y salud*.
<https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Servicios-sociales-y-salud/Salud/Dioxido-de-nitrogeno-y-salud/?vgnextoid=7f9c7fb3af761510VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnnextchannel=0815c8eb248fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD>.

Murcia Salud (s.f.) *Materia particulada (PM₁₀ y PM_{2,5})*.
<https://www.murciasalud.es/pagina.php?id=244308&idsec=1573>.

National Geographic (s.f.). *¿Qué es la lluvia ácida y por qué se produce?*
<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/lluvia-acida>.

National Geogrphic España (2020). El planeta, el principal beneficiado por el coronavirus.
https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/planeta-principal-beneficiado-por-coronavirus_15325.

Prisma (2023). *Qué son las partículas PM₁₀ y cómo se generan en la atmósfera*. Eurofins.
<https://www.eurofins-environment.es/es/category/atmosfera/#:~:text=Las%20part%C3%ADculas%20entre%20%20y,tama%C3%B1o%2C%20llegando%20incluso%20a%20semanas>.

Race (2022). *Las propuestas de España y Europa para reducir la contaminación en sus ciudades*. <https://www.race.es/protocolos-anticontaminacion-en-espana-y-europa>.

Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire (BOE 29 de enero de 2011, núm. 25).

Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo, por el que se declara el estado de alarma para la gestión de la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19 (BOE 14 de marzo de 2020, núm. 67).

Redacción (2021). El Gobierno de Cantabria crea el Consejo Asesor de Cambio Climático y Medio Ambiente de Cantabria. *El Faradio*. <https://www.elfaradio.com/2021/09/23/el-gobierno-de-cantabria-crea-el-consejo-asesor-de-cambio-climatico-y-medio-ambiente-de-cantabria/>.

Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (s.f.) *Partículas PM₁₀*. <https://prtr-es.es/Particulas-PM10,15673,11,2007.html>.

Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021 por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifican los Reglamentos (CE) nº 401/2009 y (UE) 2018/1999 («Legislación europea sobre el clima») (DOUE 9 de julio de 2021, núm. 243).

Reuters Staff (2020). *La cifra diaria de muertos por Covid-19 en España toca su nivel más bajo en casi seis semanas*. Reuters. <https://www.reuters.com/article/salud-coronavirus-espana-idESKBN22C1FI>.

Sentencia del Tribunal de Justicia (Sala Sexta), de 22 de diciembre de 2022, Asunto C.125/20.

Universitat Politècnica de València (2020). *Castellón, Alicante y Valencia, entre las más beneficiadas*. <https://www.upv.es/noticias-upv/noticia-11938-castellon-alic-es.html>.

ANEXOS

1. RESULTADOS PARA LA REGRESIÓN PARA EL NO2 POR ESTACIÓN

BARREDA				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4,554	0,075	60,866	0,000
TEMP_MEDIA	-0,072	0,004	-18,254	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,061	0,009	-6,462	0,000
PREC	-0,006	0,002	-2,879	0,004
LOCKDOWN	-0,987	0,062	-18,957	0,000
SATURDAY	-0,145	0,051	-2,817	0,005
SUNDAY	-0,271	0,051	-5,280	0,000
HOLYDAYS	-0,180	0,103	-1,755	0,079
SAHARAN_DUST	0,059	0,054	1,092	0,275
COMBUSTION_BIOMASA	0,328	0,069	4,788	0,000

ESCUELA DE MINAS				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4,233	0,064	66,332	0,000
TEMP_MEDIA	-0,062	0,003	-18,500	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,123	0,008	-15,303	0,000
PREC	-0,012	0,002	-7,066	0,000
LOCKDOWN	-0,986	0,053	-21,410	0,000
SATURDAY	-0,236	0,044	-5,402	0,000
SUNDAY	-0,510	0,044	-11,645	0,000
HOLYDAYS	-0,287	0,087	-3,279	0,001
SAHARAN_DUST	0,120	0,046	2,590	0,010
COMBUSTION_BIOMASA	0,261	0,059	4,460	0,000

GUARNIZO				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4,195	0,058	72,695	0,000
TEMP_MEDIA	-0,061	0,003	-20,126	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,144	0,007	-19,741	0,000
PREC	-0,007	0,002	-4,569	0,000
LOCKDOWN	-1,037	0,048	-21,656	0,000
SATURDAY	-0,278	0,040	-7,032	0,000
SUNDAY	-0,567	0,040	-14,306	0,000
HOLYDAYS	-0,410	0,079	-5,191	0,000
SAHARAN_DUST	0,166	0,042	3,982	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,241	0,053	4,558	0,000

PARQUE ZAPATON				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4,203	0,081	52,125	0,000
TEMP_MEDIA	-0,085	0,004	-20,065	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,137	0,010	-13,437	0,000
PREC	-0,008	0,002	-3,689	0,000
LOCKDOWN	-0,966	0,067	-15,615	0,000
SATURDAY	-0,238	0,055	-4,310	0,000
SUNDAY	-0,501	0,055	-9,049	0,000
HOLYDAYS	-0,221	0,110	-2,002	0,046
SAHARAN_DUST	0,159	0,058	2,719	0,007
COMBUSTION_BIOMASA	0,276	0,074	3,729	0,000

SANTANDER CENTRO				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4,569	0,066	69,402	0,000
TEMP_MEDIA	-0,058	0,003	-16,685	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,105	0,008	-12,675	0,000
PREC	-0,004	0,002	-1,956	0,051
LOCKDOWN	-0,727	0,055	-13,306	0,000
SATURDAY	-0,213	0,045	-4,727	0,000
SUNDAY	-0,379	0,045	-8,394	0,014
HOLYDAYS	-0,307	0,090	-3,406	0,001
SAHARAN_DUST	0,188	0,048	3,938	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,161	0,060	2,669	0,008

TETUÁN				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4,267	0,074	57,990	0,000
TEMP_MEDIA	-0,078	0,004	-21,081	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,115	0,008	-15,053	0,000
PREC	0,002	0,002	1,126	0,260
LOCKDOWN	-0,802	0,050	-15,955	0,000
SATURDAY	-0,174	0,042	-4,178	0,000
SUNDAY	-0,371	0,042	-8,885	0,000
HOLYDAYS	-0,185	0,083	-2,227	0,026
SAHARAN_DUST	0,032	0,044	0,727	0,468
COMBUSTION_BIOMASA	0,156	0,056	2,793	0,005

2. RESULTADOS PARA LA REGRESIÓN PARA EL O3 POR ESTACIÓN

CASTRO URDIALES				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4,003	0,054	74,467	0,000
TEMP_MEDIA	-0,012	0,003	-4,332	0,000
VELOCMED_VIENTO	0,064	0,007	9,414	0,000
PREC	-0,001	0,002	-0,577	0,564
LOCKDOWN	0,147	0,042	3,531	0,000
SATURDAY	0,052	0,035	1,503	0,133
SUNDAY	0,061	0,035	1,765	0,078
HOLYDAYS	-0,127	0,069	-1,833	0,067
SAHARAN_DUST	0,028	0,037	0,767	0,444
COMBUSTION_BIOMASA	0,207	0,046	0,458	0,000

CARRALES DE BUELNA				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,067	0,062	49,554	0,000
TEMP_MEDIA	0,006	0,003	1,802	0,072
VELOCMED_VIENTO	0,128	0,008	16,417	0,000
PREC	0,002	0,002	1,307	0,191
LOCKDOWN	0,291	0,051	5,661	0,000
SATURDAY	0,062	0,042	1,471	0,141
SUNDAY	0,105	0,042	2,479	0,013
HOLYDAYS	-0,217	0,085	-2,559	0,011
SAHARAN_DUST	0,115	0,045	2,569	0,010
COMBUSTION_BIOMASA	0,197	0,057	3,474	0,001

CROS				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,443	0,054	63,726	0,000
TEMP_MEDIA	0,000	0,003	-0,123	0,902
VELOCMED_VIENTO	0,109	0,007	15,989	0,000
PREC	0,001	0,001	0,480	0,631
LOCKDOWN	0,281	0,045	6,277	0,000
SATURDAY	0,063	0,037	1,713	0,087
SUNDAY	0,113	0,037	3,041	0,002
HOLYDAYS	-0,089	0,074	-1,200	0,230
SAHARAN_DUST	0,067	0,039	1,723	0,085
COMBUSTION_BIOMASA	0,168	0,050	3,381	0,001

GUARNIZO				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,018	0,071	42,403	0,000
TEMP_MEDIA	-0,002	0,004	-0,406	0,685
VELOCMED_VIENTO	0,136	0,009	15,176	0,000
PREC	0,000	0,002	0,057	0,955
LOCKDOWN	0,217	0,059	3,676	0,000
SATURDAY	0,106	0,049	2,168	0,030
SUNDAY	0,160	0,049	3,280	0,001
HOLYDAYS	-0,109	0,098	-1,118	0,264
SAHARAN_DUST	0,075	0,052	1,450	0,147
COMBUSTION_BIOMASA	0,276	0,065	4,222	0,000

LOS TOJOS				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4,363	0,025	177,190	0,000
TEMP_MEDIA	-0,022	0,002	-14,542	0,000
VELOCMED_VIENTO	0,035	0,005	6,552	0,000
PREC	0,001	0,001	0,597	0,551
LOCKDOWN	-0,036	0,028	-1,279	0,201
SATURDAY	0,002	0,023	0,078	0,937
SUNDAY	-0,004	0,024	-0,161	0,872
HOLYDAYS	-0,099	0,047	-2,114	0,035
SAHARAN_DUST	0,133	0,025	5,331	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,140	0,031	4,437	0,000

PARQUE ZAPATÓN				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,145	0,064	49,273	0,000
TEMP_MEDIA	0,010	0,003	2,955	0,003
VELOCMED_VIENTO	0,122	0,008	15,181	0,000
PREC	0,001	0,002	0,801	0,424
LOCKDOWN	-0,169	0,053	-3,185	0,001
SATURDAY	0,077	0,044	1,760	0,079
SUNDAY	0,102	0,044	2,325	0,020
HOLYDAYS	-0,267	0,087	-3,048	0,002
SAHARAN_DUST	0,134	0,046	2,904	0,004
COMBUSTION_BIOMASA	0,232	0,059	3,955	0,000

REINOSA				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,773	0,033	113,634	0,000
TEMP_MEDIA	0,001	0,002	0,617	0,538
VELOCMED_VIENTO	0,100	0,007	13,882	0,000
PREC	0,002	0,002	1,067	0,286
LOCKDOWN	0,145	0,038	3,793	0,000
SATURDAY	0,042	0,032	1,340	0,180
SUNDAY	0,006	0,032	0,180	0,857
HOLYDAYS	-0,170	0,063	-2,698	0,007
SAHARAN_DUST	0,058	0,034	1,712	0,087
COMBUSTION_BIOMASA	0,158	0,042	3,719	0,000

TETUÁN				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,775	0,077	49,349	0,000
TEMP_MEDIA	-0,007	0,004	-1,914	0,056
VELOCMED_VIENTO	0,061	0,008	7,657	4,190
PREC	-0,002	0,002	-0,838	0,402
LOCKDOWN	0,341	0,052	6,520	0,000
SATURDAY	0,058	0,043	1,344	0,179
SUNDAY	0,073	0,043	1,675	0,094
HOLYDAYS	-0,175	0,087	-2,021	0,043
SAHARAN_DUST	0,111	0,046	2,426	0,015
COMBUSTION_BIOMASA	0,280	0,058	4,822	0,000

3. RESULTADOS PARA LA REGRESIÓN PARA EL PM10 POR ESTACIÓN

BARREDA				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,769	0,047	80,114	0,000
TEMP_MEDIA	-0,035	0,002	-14,063	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,045	0,006	-7,532	0,000
PREC	-0,011	0,001	-8,460	0,009
LOCKDOWN	-0,348	0,039	-8,905	0,000
SATURDAY	-0,123	0,032	-3,809	0,000
SUNDAY	-0,210	0,032	-6,501	0,000
HOLYDAYS	-0,122	0,064	-1,899	0,058
SAHARAN_DUST	0,281	0,034	8,236	0,051
COMBUSTION_BIOMASA	0,261	0,043	6,051	0,000

CASTRO URDIALES				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,280	0,068	48,206	0,000
TEMP_MEDIA	-0,026	0,004	-7,092	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,047	0,009	-5,494	0,000
PREC	-0,018	0,002	-7,788	0,000
LOCKDOWN	-0,008	0,053	-0,156	0,876
SATURDAY	-0,095	0,044	-2,157	0,031
SUNDAY	-0,170	0,044	-3,865	0,000
HOLYDAYS	-0,254	0,088	-2,907	0,004
SAHARAN_DUST	0,511	0,046	11,010	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,294	0,059	4,989	0,000

CORRALES DE BUELNA				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,878	0,057	67,910	0,000
TEMP_MEDIA	-0,038	0,003	-12,557	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,071	0,007	-9,821	0,000
PREC	-0,017	0,002	-10,887	0,000
LOCKDOWN	-0,331	0,047	-6,984	0,000
SATURDAY	-0,152	0,039	-3,879	0,000
SUNDAY	-0,330	0,039	-8,407	0,013
HOLYDAYS	-0,212	0,078	-2,709	0,007
SAHARAN_DUST	0,380	0,041	9,186	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,336	0,052	6,412	0,000

CROS				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4,078	0,072	57,022	0,000
TEMP_MEDIA	-0,042	0,004	-11,102	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,080	0,009	-8,829	0,000
PREC	-0,018	0,002	-8,925	0,000
LOCKDOWN	0,003	0,059	0,057	0,955
SATURDAY	-0,111	0,049	-2,263	0,024
SUNDAY	-0,205	0,049	-4,174	0,000
HOLYDAYS	-0,302	0,098	-3,086	0,002
SAHARAN_DUST	0,361	0,052	6,959	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,297	0,066	4,531	0,000

ESCUELA DE MINAS				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,806	0,062	61,841	0,000
TEMP_MEDIA	-0,038	0,003	-11,647	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,052	0,008	-6,710	0,000
PREC	-0,016	0,002	-9,618	0,000
LOCKDOWN	-0,196	0,051	-3,839	0,000
SATURDAY	-0,105	0,042	-2,495	0,013
SUNDAY	-0,187	0,042	-4,414	0,000
HOLYDAYS	-0,240	0,084	-2,851	0,004
SAHARAN_DUST	0,392	0,045	8,791	0,001
COMBUSTION_BIOMASA	0,296	0,056	5,244	0,000

GUARNIZO				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,568	0,063	56,797	0,000
TEMP_MEDIA	-0,021	0,003	-6,214	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,051	0,008	-6,401	0,000
PREC	-0,014	0,002	-7,884	0,000
LOCKDOWN	-0,297	0,052	-5,690	0,000
SATURDAY	-0,107	0,043	-2,478	0,013
SUNDAY	-0,179	0,043	-4,145	0,000
HOLYDAYS	-0,212	0,086	-2,458	0,014
SAHARAN_DUST	0,442	0,046	9,710	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,387	0,058	6,716	0,000

LOS TOJOS				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2,152	0,049	44,064	0,000
TEMP_MEDIA	-0,004	0,003	-1,455	0,146
VELOCMED_VIENTO	-0,021	0,011	-2,027	0,043
PREC	-0,023	0,003	-7,846	0,000
LOCKDOWN	0,198	0,056	3,527	0,000
SATURDAY	-0,044	0,047	-0,940	0,348
SUNDAY	-0,087	0,047	-1,862	0,063
HOLYDAYS	-0,135	0,093	-1,456	0,146
SAHARAN_DUST	0,550	0,050	11,067	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,373	0,062	5,972	0,000

PARQUE ZAPATON				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,561	0,046	77,906	0,000
TEMP_MEDIA	-0,030	0,002	-12,604	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,050	0,006	-8,653	0,002
PREC	-0,013	0,001	-10,248	0,000
LOCKDOWN	-0,310	0,038	-8,171	0,085
SATURDAY	-0,088	0,031	-2,816	0,005
SUNDAY	-0,180	0,031	-5,742	0,000
HOLYDAYS	-0,125	0,063	-2,002	0,046
SAHARAN_DUST	0,328	0,033	9,893	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,291	0,042	6,951	0,000

REINOSA				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2,777	0,042	65,570	0,000
TEMP_MEDIA	-0,010	0,003	-3,701	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,051	0,009	-5,528	0,000
PREC	-0,011	0,003	-4,534	0,000
LOCKDOWN	-0,073	0,049	-1,489	0,137
SATURDAY	-0,059	0,040	-1,464	0,144
SUNDAY	-0,126	0,040	-3,105	0,002
HOLYDAYS	-0,104	0,081	-1,294	0,196
SAHARAN_DUST	0,536	0,043	12,447	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,337	0,054	6,224	0,000

SANTANDER CENTRO				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,653	0,049	74,524	0,000
TEMP_MEDIA	-0,022	0,003	-8,361	0,000
VELOCMED_VIENTO	-0,030	0,006	-4,931	0,000
PREC	-0,011	0,001	-8,240	0,000
LOCKDOWN	-0,213	0,041	-5,239	0,000
SATURDAY	-0,115	0,034	-3,432	0,001
SUNDAY	-0,191	0,034	-5,669	0,000
HOLYDAYS	-0,196	0,067	-2,915	0,004
SAHARAN_DUST	0,336	0,036	9,460	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	0,262	0,045	5,818	0,000

TETUÁN				
	Estimate	Std, Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3,057	0,052	58,770	0,000
TEMP_MEDIA	-0,006	0,003	-2,288	0,022
VELOCMED_VIENTO	-0,012	0,005	-2,198	0,028
PREC	-0,007	0,001	-5,150	0,000
LOCKDOWN	-0,034	0,036	-0,947	0,344
SATURDAY	-0,072	0,029	-2,460	0,014
SUNDAY	-0,124	0,030	-4,203	0,000
HOLYDAYS	-0,061	0,059	-1,037	0,300
SAHARAN_DUST	0,275	0,031	8,821	0,000
COMBUSTION_BIOMASA	-0,057	0,039	-1,435	0,152