



Facultad de Filosofía y Letras
Grado en Geografía y Ordenación del Territorio

Evaluación de la calidad del aire en el valle de Campoo
Assessment of air quality at Campoo Valley

Alfonso Cuevas Mantecón

Domingo F. Rasilla Álvarez

Curso 2015 / 2016

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. Estado de la cuestión y objetivos.	
1.2. Ámbito de Estudio.	
2. FUENTES DE INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA.....	17
3. RESULTADOS.....	20
3.1. Caracterización general de la calidad del aire.	
3.2. Evolución de los principales contaminantes (2001-2013).	
3.3. Ciclos temporales.	
3.4. Influencia de las condiciones atmosféricas en la calidad del aire.	
3.5. Análisis de episodios de superación de los valores límite.	
4. CONCLUSIONES.....	44
5. BIBLIOGRAFÍA.....	47
6. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....	49

RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto la valoración de la calidad del aire en el valle de Campoo. Para ello, se comparan los datos de la estación de la Red de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire del CIMA localizada en Reinosa con los de núcleos próximos, se analiza su relación con la dinámica atmosférica a escala local y regional y se infieren los probables focos de contaminación en la zona. Los resultados muestran que en valle de Campoo disfruta de una buena calidad del aire, salvo durante superaciones puntuales de ozono y PM10, si bien esta circunstancia constituye un problema generalizado en la península ibérica. Gran parte de la contaminación no se genera localmente, sino que es transportada tanto desde localidades próximas (Mataporquera, Velilla, valle del Besaya) como desde ámbitos suprarregionales (Norte de África, Europa Occidental).

Palabras clave: calidad del aire, ozono, partículas, contaminación transfronteriza.

ABSTRACT

This contribution is devoted to the assessment of the air quality at Campoo valley. Data from the main pollutants recorded at Reinosa are compared with other locations, their relationships with atmospheric dynamics at local and regional scale is analyzed, and the most probably pollutions sources are highlighted. Results show that Campoo enjoys a good air quality except during punctual exceedances of ozone and particles although this circumstance has become a general problem for the Iberian Peninsula. Most of the air pollutants are not of local origin, rather they have been transported either from nearby locations (Mataporquera, Velilla, Besaya valley), or distant sources (North Africa, Western Europe).

Key words: air quality, ozone, particles, transboundary air pollution

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ESTADO DE LA CUESTIÓN Y OBJETIVOS

La contaminación atmosférica puede definirse como “la presencia en el aire de materias o formas de energía que implican riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza y que pueden atacar a distintos materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables”. (Martínez y Díaz de Mera, 2004). La contaminación atmosférica no es un fenómeno reciente, pero se intensificó a partir de la Revolución Industrial, a causa del uso del carbón como fuente principal de energía, a lo que se sumó la generalización del transporte motorizado, gracias al motor de combustión alimentado con derivados del petróleo. Su impacto sobre el bienestar de los seres humanos se puso de manifiesto a lo largo del s. XX durante una serie de episodios, entre los que destacan el “Great Smog” de Londres, en 1952 o Donora (Pittsburgh, EEUU en 1948). El primero es considerado el episodio más grave del s. XX, afectando a unas 100.000 personas, de las que fallecieron 12.000. Su importancia también radica en la definición de un tipo de contaminación específica, el “smog” (smoke+fog), al acervo científico, basada en la abundancia de dióxido de sulfuro y partículas sulfurosas en la atmósfera urbana (Rosenberg J., 2016).

En la relación de contaminantes más relevantes se incluyen el dióxido de sulfuro (SO_2), los óxidos de nitrógeno ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), el ozono troposférico (O_3), los compuestos orgánicos volátiles (VOC) y las partículas (PM). Existen otros compuestos liberados a la atmósfera, como el dióxido de carbono (CO_2) y el metano cuyo efecto tiene una amplitud global al incidir sobre el efecto invernadero y el calentamiento global, por lo que se suelen estudiar por separado.

Los efectos negativos de la contaminación atmosférica son muy diversos, desde la degradación de edificios y monumentos (Cowell and Apsimon, 1996) hasta el empobrecimiento de la visibilidad y calidad paisajística (Hyslop and White, 2008), pero los relacionados con el medio ambiente (Lovett et al., 2000), y la salud (WHO, 2003; Gurjar et al., 2010) son los más significativos, generando problemas tanto a corto como a largo plazo. Son numerosos los estudios que relacionan la exposición a elevados índices de contaminación atmosférica con diversas patologías, entre las que cabe citar enfermedades respiratorias como la neumonía, enfermedades crónicas como el asma o el cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares etc... En casos extremos, la exposición continua eleva los niveles de mortalidad muy por encima de sus valores

habituales: se calcula que alrededor de 7 millones de persona murieron de forma prematura en 2012 por la contaminación atmosférica, de las cuales el 88% se produjeron en países con ingresos bajos o medianos. Trabajos recientes plantean que una reducción de la contaminación por partículas de 70 a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ reduciría un 15% el número de defunciones (OMS, 2014).

Aunque la contaminación es un problema global, ya que afecta tanto a países en desarrollo como a países desarrollados, las áreas más afectadas son Asia Sudoriental y en el Pacífico Occidental, al igual que las grandes áreas metropolitanas (OMS, 2014). Este problema se ha agravado en los últimos años por el crecimiento urbano y la deslocalización de las actividades más contaminantes a los países en vías de desarrollo. Ejemplo paradigmático de los problemas que afrontan las economías de estos países es el caso de Pekín, donde la quema de carbón para la calefacción, el tráfico masificado de una metrópoli de más de 11 millones de habitantes, y la llegada de aerosoles desde los desiertos de Asia Central suele generar situaciones de alarma sanitaria con relativa frecuencia. Cabe señalar, por último, que el impacto de la contaminación atmosférica es diferente según los grupos de edad, constituyendo grupos de riesgo los niños y ancianos.

La situación en España es mejor, habiendo mejorado la calidad del aire con respecto a la situación existente durante las décadas de los años 80 y 90. A pesar de ello, las grandes ciudades, como Madrid y Barcelona, todavía registra superaciones de los valores límite de NO_2 , O_3 y partículas, relacionados fundamentalmente con el tráfico (Orío y Pallarés, 2013). Se calcula que aún, unas 25 mil personas mueren en España por la contaminación atmosférica y que 1/3 de los españoles respira aire contaminado. Recientes estudios muestran que hay una asociación entre el riesgo de ictus y la presencia de partículas en suspensión (Otero, 2016) incluso en Cantabria (Santurtún, 2014).

La contaminación atmosférica, muy variable tanto en el espacio como en el tiempo, y responde tanto a causas antrópicas como naturales. Los niveles de inmisión, es decir, la cantidad de contaminantes a los que están expuestos los seres vivos, plantas y objetos, dependen tanto de las emisiones como de la capacidad de dispersión, tanto horizontal como vertical, de la atmósfera, así como de otros procesos como la deposición seca o húmeda, etc. Por lo tanto, para estudiar la contaminación atmosférica es necesario conocer tanto los niveles de emisión como los mecanismos que colaboran en el aumento o disminución de los niveles de inmisión. Como se ha señalado en líneas anteriores, no toda la contaminación atmosférica está causada por el ser humano, pudiendo clasificarse las fuentes en naturales (vegetación, incendios, volcanes, polvo

del desierto) y antropogénicas; éstas últimas se subdividen a su vez en fuentes fijas (calefacciones domésticas, industrias, tratamiento de residuos) y móviles (automóviles, aviones, barcos etc...). La diversidad de orígenes permite clasificar a su vez los compuestos contaminantes en compuestos primarios y secundarios. Los primarios proceden directamente de las fuentes de emisión, pudiendo a su vez clasificarse en gaseosos (dióxido de azufre -SO₂-, monóxido de carbono -CO-, óxidos de nitrógeno -Nox-, hidrocarburos -HC- o dióxido de carbono -CO₂-) o no gaseosos (aerosoles -partículas procedentes de combustiones, erupciones volcánicas, incendios forestales, intrusiones de material desértico- y metales pesados). Los compuestos secundarios se originan en la propia atmósfera, a partir de reacciones químicas que transforman los contaminantes primarios (ozono -O₃-, dióxido de nitrógeno -NO₂-, ácido nítrico -HNO₃- etc). Por otro lado, la dispersión de los contaminantes depende de varios factores, entre los que destacan la topografía y el clima. Una situación de lluvia y vientos en una zona abierta favorecerá la dispersión de los contaminantes, mientras que una inversión térmica en un valle cerrado la dificultará.

Dados los impactos negativos causados por la contaminación atmosférica, las autoridades de los diferentes países han promulgado numerosas leyes con el objetivo de prevenir, vigilar y reducir la contaminación atmosférica. Actualmente, la normativa vigente en España y en Cantabria, en materia de calidad del aire es la siguiente:

- Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2004.
- - Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- Decreto 50/2009, de 18 de junio, por el que se regula el control de la contaminación atmosférica industrial en la comunidad Autónoma de Cantabria

Esta normativa, por ejemplo, regula los niveles valores de referencia de los distintos contaminantes. También establecen los procedimientos para realizar una correcta evaluación de la calidad del aire, indican las técnicas de medida de referencia, los criterios de ubicación de estaciones de medida e incluso la calidad exigida a los modelos matemáticos utilizados en evaluación de la calidad del aire.

Debido a la diversidad de compuestos contaminantes, con orígenes diversos, y cuya concentración depende tanto de las actividades humanas como de la dinámica atmosférica local y regional, es conveniente que el análisis de la calidad del aire se realice teniendo en cuenta el marco territorial. En relación a los objetivos del Grado Geografía y Ordenación del Territorio, los estudios sobre contaminación atmosférica pueden proporcionar alternativas y soluciones a problemas detectados en esos ámbitos territoriales (identificación de focos y actividades, recomendación de acciones como prohibición, traslado o implantación de medidas correctoras etc..).

En esta línea, el objetivo fundamental de este trabajo es el análisis de la calidad del aire en el valle de Campoo. Adicionalmente, se plantean una serie de objetivos complementarios, como son la identificación de las principales actividades y focos de contaminación, y la determinación de los procesos, tanto antrópicos como naturales, que contribuyen a las variaciones de la calidad del aire en el ámbito de estudio. Dada la ausencia de estudios similares en zonas próximas, el trabajo sobre Campoo puede resultar igualmente beneficioso para mejorar la comprensión de los procesos que afectan a comarcas limítrofes. Finalmente, el valle de Campoo posee unas condiciones óptimas, tanto naturales como humanas, para el desarrollo de este estudio, como se señala a continuación.

1.2 ÁMBITO DE ESTUDIO

El ámbito de estudio es el valle de Campoo, localizado al sur de Cantabria, en plena cordillera Cantábrica (Figura 1.1). Este valle posee una gran altitud media (entre los 800 y los 2200 m del vértice Cuchillón) y una disposición aproximadamente triangular, con un vértice orientado al W y su base al E.

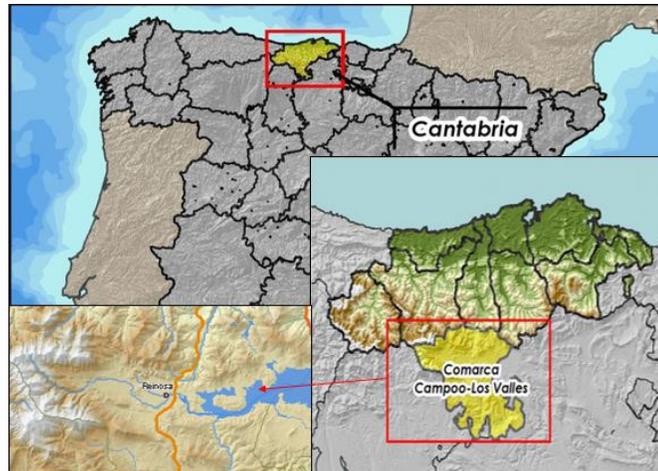


Figura 1.1 Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes descargadas de Red de Centros de Visitantes de Cantabria (2015) y de MAGRAMA (2013)

El valle está flanqueado por dos alineaciones montañosas, una con disposición W-E y otra NW-SE-E, cuya altitud va disminuyendo progresivamente hacia el E. La alineación septentrional está formada por la Sierra del Escudo (Midiaju Frío, 1328 msnm), el Cueto Ropero (1.492 msnm) y la Sierra del Cordel (Cornón, 2.125 msnm); la meridional comprende la Sierra de Híjar (Cuchillón, 2.222 msnm, Cuesta Labra (1.950 msnm) y Somaloma (1.282 msnm). La continuidad de ambas alineaciones está rota por algunos pasos de montaña, que permiten la comunicación con la Meseta (Puerto de Pozazal) y con el resto de Cantabria (Corredor del Besaya y Puerto de Palombera).

El valle de Campoo se encuentra en el límite entre dos regiones con condiciones climáticas distintas: al norte domina el clima oceánico, y al sur el clima mediterráneo (Figura 1.2). Por ello, experimenta un clima de transición sobre el que influyen otros factores como la altitud o la orografía, derivados de su citada localización en la Cordillera Cantábrica. Los rasgos fundamentales son un clima relativamente húmedo (precipitación media anual alrededor de 850 mm, menos que Santander -1253 mm- pero superior a Polientes -652 mm-) con rasgos térmicos continentales. Su régimen pluviométrico muestra máximos mensuales en octubre, noviembre y diciembre, como en el resto de Cantabria, pero la sequía estival es más intensa, con un mínimo en agosto característico de la Meseta. Por su parte, la temperatura media anual (9°C) encubre una notable amplitud anual y diaria (14°C), (García Codrón y Rasilla, 2010). A causa de la altitud, una parte sustancial de las precipitaciones invernales caen en forma de nieve, siendo también intensas las heladas nocturnas.

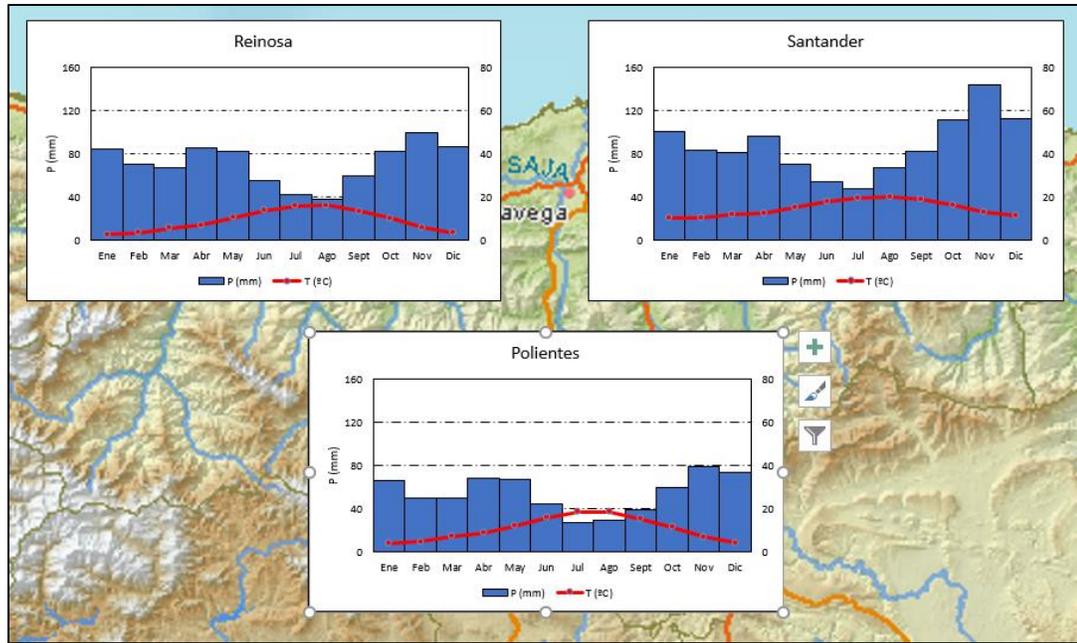


Figura 1.2 Climodiagramas de Santander, Reinosa y Polientes (1981-2010). Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Aemet.

Un fenómeno habitual en valles de montaña son las inversiones térmicas, producidas bajo condiciones de estabilidad, por las cuales la temperatura en el fondo del valle es inferior a la de las zonas más altas. Este fenómeno aprisiona el aire en el fondo del valle, impidiendo la dispersión de los contaminantes (Figura 1.3).



Figura 1.3. Inversión térmica en el valle de Campoo, con penacho de contaminación de tipo fumigación. Fuente: Meteocampoo (<http://www.meteocampoo.es>)

El carácter de clima de transición también aparece tras el análisis de otros parámetros meteorológicos de importancia para la dinámica de los contaminantes, como el viento y la

radiación solar. En relación al primero, la velocidad media es próxima a los 2 m/s, similar a la registrada tanto en Guarnizo como en Los Tojos, pero algo menor a la de Valdelucio, que se encuentra más expuesta. Cabe señalar los contrastes entre el régimen mensual del viento en la vertiente N (Guarnizo y Los Tojos), caracterizado por máximos invernales y mínimos estivales, y el de las estaciones más meridionales (Reinosa y Valdelucio), donde los máximos ocurren a lo largo del semestre cálido. Estos contrastes se relacionan con la diferente exposición a las borrascas invernales y a la inestabilidad local, derivada del calor estival.

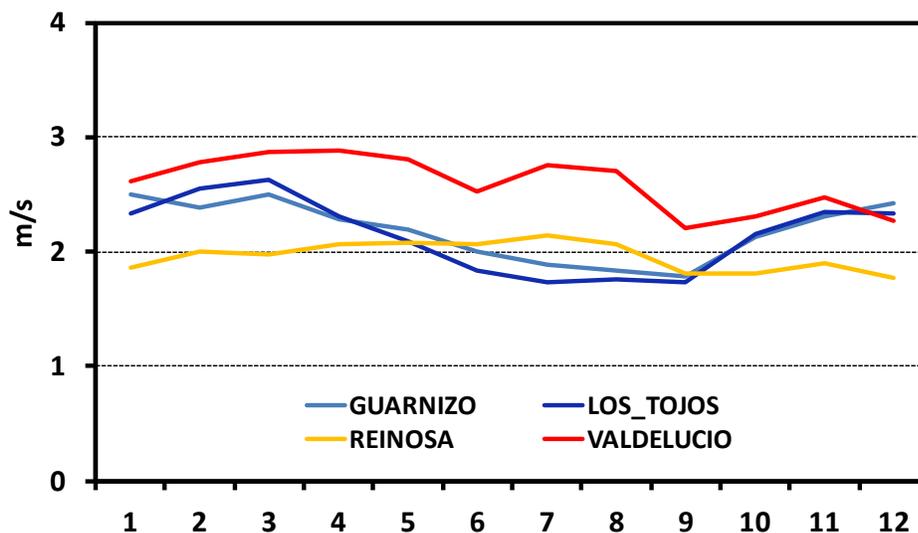


Figura 1.4 Evolución de la velocidad del viento en Reinosa y localidades próximas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CIMA e Inforiego (<http://www.inforiego.es/>).

El régimen de vientos en Campoo es complejo, ya que combina vientos sinópticos, resultado del desplazamiento de las masas de aire que acompañan al paso de anticiclones y borrascas, y vientos locales, producto de los intercambios de masa entre el fondo del valle y las laderas de las montañas que circundan Campoo. Entre los primeros se encuentran los vientos más fuertes, de componente nordeste, provenientes de la costa de Cantabria, llegando a Campoo a través del valle del Besaya. De igual modo, los vientos del S y SE no son tan frecuentes ni intensos, pero responden al movimiento del aire producto de las borrascas situadas frente a Galicia. Por el contrario, los vientos del W y parte de los vientos del ESE resultarían de una circulación local de carácter térmico, formada por vientos de ladera ascendentes y descendentes, siguiendo un ciclo diario que se activa con la insolación: durante el día, la masa de aire reposando en el fondo del

valle es calentada por la insolación, por lo que el aire caliente, menos denso, asciende por la ladera. Durante la noche, esa masa se enfría, y al ser más denso desciende hacia el valle.

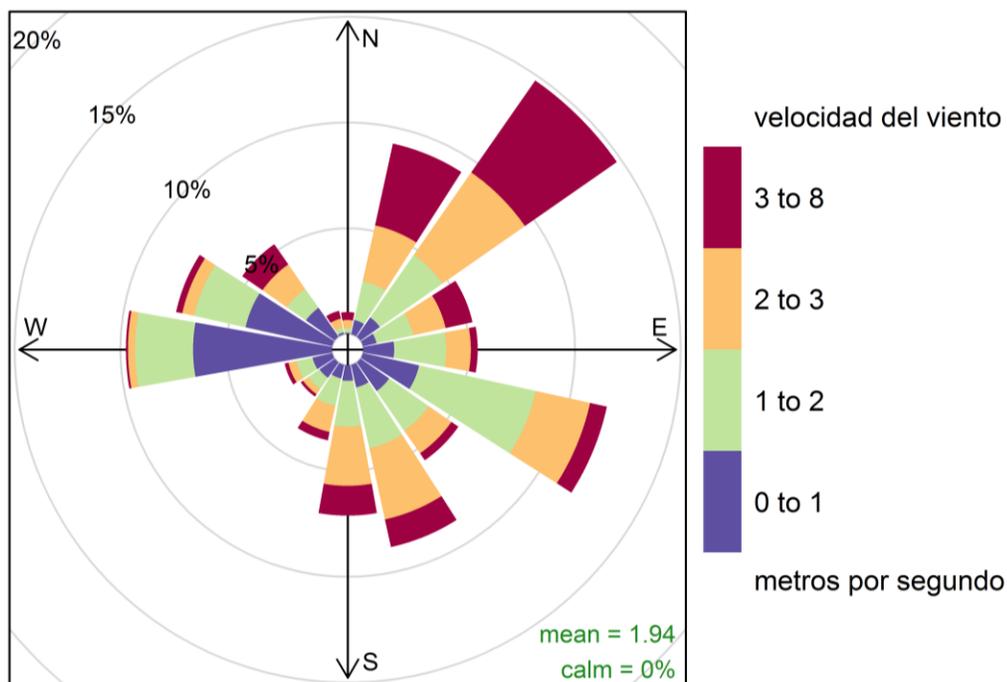


Figura 1.5 Rosa de los vientos de Reinosa. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CIMA.

La radiación solar es una variable fundamental en muchas transformaciones fotoquímicas. En comparación con la vertiente septentrional de la Cordillera Cantábrica (Guarnizo, en la costa, y Los Tojos, en la montaña), los valores de radiación en Reinosa son superiores en verano (fundamentalmente entre abril y septiembre). Pero, al mismo tiempo, son claramente inferiores todo el año a los de la estación de Valdelucio, situada más al S.

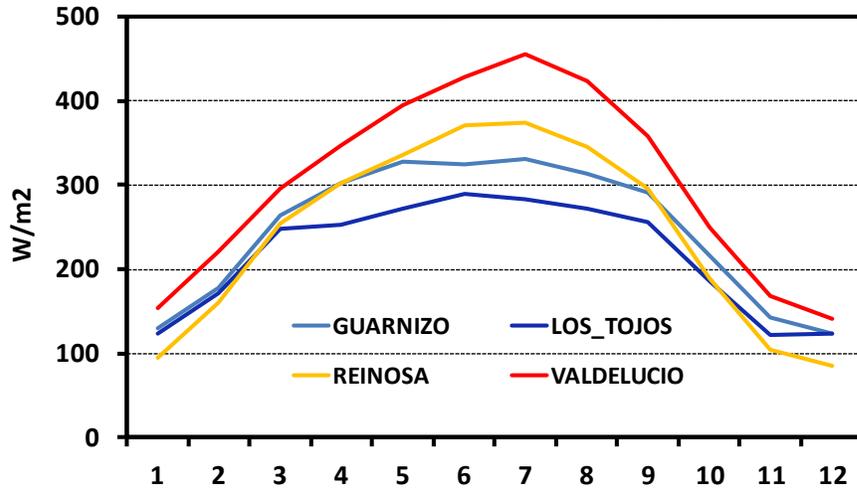


Figura 1.6 Evolución de la radiación solar en Reinosa y localidades próximas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del CIMA e Inforiego (<http://www.inforiego.es/>).

La baja radiación solar entre los meses de noviembre y febrero de Reinosa se puede explicar por otro fenómeno frecuente en el valle de Campoo y derivado en gran medida de las inversiones térmicas, como son las nieblas, favorecidas por la topografía y por la construcción del embalse del Ebro en los años 50 (García Codón y Bermejo Zubelzu, 1992).



Figura 1.7 Inversión térmica en el valle de Campoo con nieblas. Fuente: Meteocampoo (<http://www.meteocampoo.es>)

Dada la importancia que tienen las actividades humanas en los niveles de calidad del aire, es conveniente también una revisión de aquellas actividades potencialmente emisoras de sustancias

contaminantes en el ámbito local y regional. El valle de Campoo comprende los municipios de Campoo de Enmedio, Campoo de Yuso, Hermandad de Campoo de Suso, Reinosa y Las Rozas de Valdearroyo. Además, según la comarcalización de Cantabria, aún no oficial, pero de uso extendido, se añadirían Los Valles, es decir, Valdeolea, Valdeprado del Río y Valderredible y la de Cinco Villas, con los municipios de Pesquera, Santiurde de Reinosa y San Miguel de Aguayo. Esta comarca, Campoo-Los Valles, tiene una población de 19.154 habitantes (ICANE, 2014), lo que supone apenas el 3,5% de la población total de Cantabria. Sin embargo, su superficie supone casi el 20% del total de Cantabria, lo que implica que la densidad de población de la comarca es baja, unos 20 hab/km². Además, esta población se distribuye desigualmente, ya que aproximadamente la mitad de los habitantes viven en Reinosa (10.370 hab), que es la cabecera comarcal y el núcleo más dinámico, por lo que se analizará a continuación su estructura demográfica y económica.

La estructura de la población de Reinosa es la característica de una sociedad bastante envejecida, con una base estrecha y predominio de la población adulta y vieja. La tasa de juventud es ligeramente superior al 10 % y la de envejecimiento del 24%.

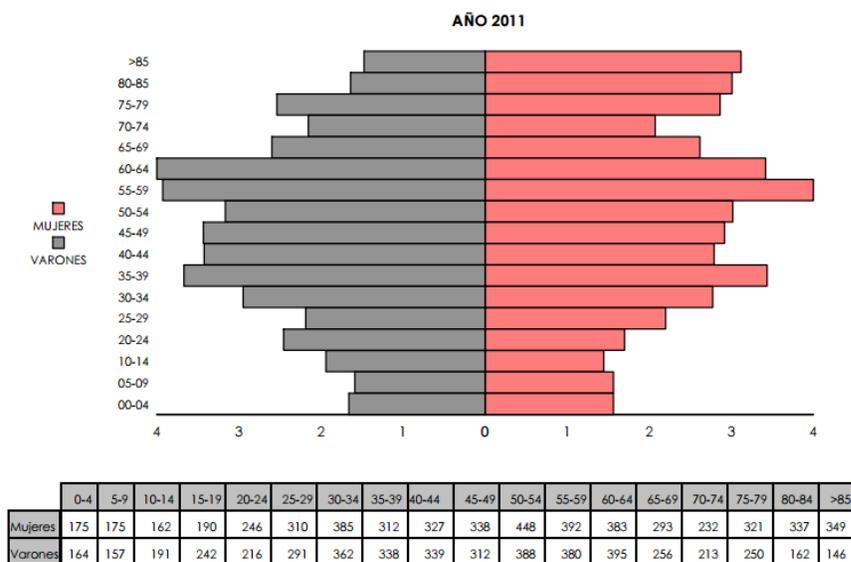


Figura 1.8. Pirámide de población por edades de Reinosa. Fuente: ICANE (Fichas municipales 2011).

Reinosa posee una estructura económica basada actualmente en el sector servicios, aunque también una larga tradición industrial. Ésta se inició en la segunda mitad del s. XIX con la instalación de la industria alimentaria (harina, queso, chocolate) y vidriera, tanto en Reinosa (la

de Santa Clara) como en las proximidades (Arroyo, Las Rozas o Arija). Este desarrollo industrial experimentó un gran crecimiento tras la I Guerra Mundial, tras el asentamiento de industrias siderometalúrgicas (Naval, CENEMESA), favoreciendo a su vez el asentamiento de actividades complementarias que conformaron un tejido industrial importante. A mediados de 1980, la comarca sufrió un despoblamiento y envejecimiento demográfico, debido especialmente al declive de la empresa nacional "La Naval" (Forjas y Aceros de Reinosa), industria antiguamente floreciente y con acreditado prestigio internacional en el sector de la construcción naval y armamentística. El declive de estas actividades a lo largo de la década de 1980 ha conducido a una cierta atonía y a la necesidad de diversificar las actividades económicas (turismo de nieve y rural).

Campoo en general, y Reinosa en particular, conforma una de las vías tradicionales de acceso desde la Meseta a la costa de Cantabria y viceversa. El transporte ha sido una actividad económica con gran tradición, que se remonta al tráfico carretero a lo largo de los s. XVIII y XIX, continúa con la construcción del ferrocarril Alar del Rey-Santander a mediados del s. XIX y se ha potenciado recientemente a raíz de la finalización de la autovía Cantabria-Meseta. Esta vía ha convertido Campoo en el paso obligado entre Cantabria y el resto de España para todo tipo de transportes, tanto privados como vehículos pesados. La condición de cabecera comarcal de Reinosa la convierte además en un nudo de infraestructuras donde confluyen carreteras procedentes de los distintos municipios de Campoo. Según datos del Ministerio de Fomento, la Intensidad Media Diaria del tráfico en Reinosa (IMD), es decir, el número de vehículos que circulan cada día es de unos 18.500, número relativamente importante teniendo en cuenta el tamaño de la población. De éstos, 13.691 vehículos/día circularían por la A-67, siendo con diferencia la más transitada por su carácter comunicante entre Cantabria y la Meseta. En segundo lugar, se encuentra la CA-183, carretera que une Reinosa con Campoo de Suso, con 2.927 vehículos/día, es. En tercer lugar, se encuentra la CA-171, que une Reinosa y Campoo de Yuso, con IMD de 1.355 y por último la N-611, la única vía de acceso a la Meseta desde Santander antes de la apertura de la A-67, que sólo registra 580 vehículos/día.

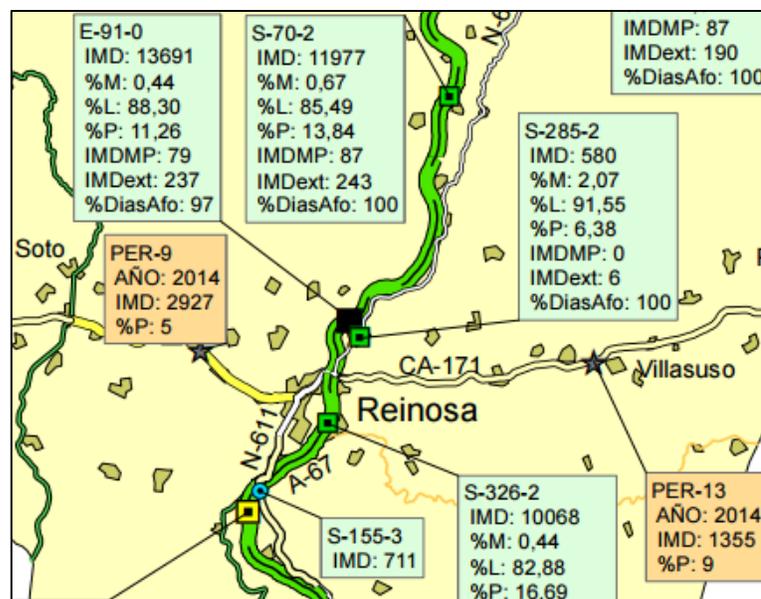


Figura 1.9. Intensidad Media Diaria en Reinosa. Fuente: Gobierno de España, Ministerio de Fomento: Tráfico, Velocidades y Accidentes (2014)

Aunque Reinosa no es un núcleo urbano demasiado grande, el volumen de desplazamientos diarios en Reinosa es relativamente importante, sobre todo a determinadas horas del día (entrada y salida al trabajo etc...) aunque normalmente son desplazamientos por el interior del casco urbano, puesto que rara vez (menos del 18 %) superan los 20 minutos.

Duración del trayecto	Porcentaje
Menos de 10 minutos	46,1
Entre 10 y 20 minutos	36,02
Entre 20 y 30 minutos	9,54
Entre 30 y 45 minutos	3,37
Entre 45 minutos y 1 hora	2,39
Entre 1 hora y 1 hora y 30	1,99
Mas de 1 hora y 30	0,57

Cuadro 1.1. Tiempo empleado en los desplazamientos por la población de más de 16 años.

Fuente: ICANE, Fichas municipales (2001)

El medio de transporte más utilizado es a pie; sin embargo, dentro de los vehículos, lo más frecuente es el uso del coche, con un 41% de usuarios entre conductores y pasajeros. El resto de medios de transporte son irrelevantes. Por otro lado, en 2011 había en Reinosa 4.753 turismos, 363 motos, 980 camiones, 20 autobuses y 44 tractores, un número de vehículos motorizados

importante que emiten una gran cantidad de contaminantes a la atmósfera. (ICANE, Fichas municipales, 2001)

Medio de transporte	Número	Porcentaje
Coche particular (conductor)	1301	36,83
Coche particular (pasajero)	147	4,16
Autobús	137	3,88
Moto	15	0,42
Andando	1872	53
RENFE	34	0,96
Otros trenes	8	0,23
Bicicleta	15	0,42
Otros medios	3	0,08
Total desplazamientos	3532	

Cuadro 1.2. Medios de transporte en Reinosa. Fuente: ICANE, Fichas municipales (2001)

El consumo doméstico a través del uso de calefacciones constituye también una fuente de contaminación importante, sobre todo durante el periodo de temperaturas más bajas: se estima en 1800°C/día la necesidad de calefacción en Reinosa, uno de los valores más altos para un municipio de más de 10.000 habitantes. El principal combustible utilizado para las calefacciones es el gas natural, que tiene un menor impacto ambiental que el petróleo o el carbón.

Finalmente, la calidad del aire a escala local puede estar determinada también por aportes procedentes de focos situados a cierta distancia del núcleo de análisis. Tomando como referencia el Registro de Empresas Contaminantes de Cantabria (<http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/medio-ambiente-industrial/registro-de-emisiones-y-fuentes-contaminantes-prtr/>), se estableció un radio de 30 km alrededor de Reinosa para determinar qué instalaciones y actividades podrían afectar a la calidad del aire de la ciudad. Bajo este ámbito de influencia se hayan las emisiones procedentes de la fábrica de Cementos Alfa de Mataporquera (al SSW), las actividades industriales en el Besaya (Los Corrales de Buelna y Torrelavega, al N); fuera del radio de acción establecido, la central térmica de Velilla del Río Carrión (al W) también puede contribuir potencialmente a variaciones significativas en la concentración de contaminantes en Reinosa.



Figura 1.10. Ámbito de influencia de contaminantes sobre Reinosa. Fuente: Territorio de Cantabria, visualizador de mapas (2014)

2. FUENTES DE INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA.

Este trabajo hace uso de datos proporcionados por la Red de Vigilancia de la calidad del aire de Cantabria. Esta red fue creada en 1991, pero no ofrece información hasta 1998, cuando es cedida al Gobierno de Cantabria, quien encomendó su gestión al Centro de Investigación del Medio Ambiente (CIMA), organismo autónomo dependiente de la Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Urbanismo. Actualmente la Red consta de once estaciones fijas y una unidad móvil, proporcionando, mediante analizadores automáticos, niveles de concentración en el aire de diversos contaminantes mediante métodos de referencia. Cada estación dispone de un sistema de adquisición de datos que registra los resultados de los analizadores y los remite al centro de proceso de datos, ubicado en el CIMA (Torrelavega), donde se lleva a cabo su validación. Estas medidas se realizan, por lo general, de forma continua, finalmente se expresan como promedios (quinceminutal, horario, diario, etc.).

La estación de Reinosa, emplazada en la calle Santa Clara (X = 407434, Y = 4761660) pertenece, junto con la de Los Tojos, a la zona interior de Cantabria, y está considerada como una estación urbana de fondo. Ofrece registros de los siguientes contaminantes

- partículas en suspensión de tamaño inferior a 10 micras (PM10)
- dióxido de azufre (SO₂).
- óxidos de nitrógeno (NO y NO₂)
- ozono (O₃)

Además, cuenta con una torre meteorológica que mide los siguientes parámetros:

- dirección y velocidad del viento
- precipitación
- humedad relativa
- temperatura
- presión barométrica
- radiación solar.

El periodo de análisis ha sido 2001-2013, y los datos originales fueron recibidos en forma de promedios horarios.



Figura 2.1. Estación de la Red de Vigilancia y Control de Reinosa. Fuente: elaboración propia

Como se observa en la imagen, la estación se encuentra localizada en el centro de la ciudad, entre edificios, lo que puede influir en la fiabilidad de algunos parámetros, como el viento o la precipitación.

La identificación y caracterización de las condiciones atmosféricas desencadenantes de algunos episodios de superación de los límites legales ha sido abordado de dos maneras. En primer lugar, extrayendo los mapas correspondientes a cada situación meteorológica, para lo cual se ha recurrido a la utilidad web “Reanalysis Daily composites”, alojada en la dirección web <http://www.esrl.noaa.gov/psd/> (NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder, Colorado

EEUU). Ésta permite seleccionar el tamaño de la ventana espacial, los niveles atmosféricos (desde la superficie hasta el nivel de 10 hPa) y las variables atmosféricas de interés (presión a nivel del mar, altura geopotencial, viento etc...), tanto en forma de valores brutos como de anomalías respecto a los valores normales del periodo 1981-2010. Otra herramienta muy útil para determinar el posible origen de un episodio de contaminación son las retrotrayectorias, que simulan el movimiento de una partícula de aire que llega o es emitido desde un punto concreto del planeta. En nuestro caso, se ha utilizado el modelo on-line HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory; <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

El objetivo general, como se señaló en páginas anteriores, es el análisis y evaluación de la calidad del aire en el valle de Campoo, determinando focos de contaminación y mecanismos que influyen en la misma. La consecución de dicho objetivo se logra mediante la aplicación de los procedimientos que se detallan a continuación:

- Un análisis estadístico básico, para cada uno de los contaminantes, con el fin de caracterizar la concentración media y su variabilidad, y comparar los resultados con los proporcionados por localidades próximas a Reinosa.
- Determinar la evolución a largo plazo de la calidad del aire en Reinosa, calculando las tendencias en la concentración media de cada contaminante entre 2001 y 2013, con el fin de relacionar esa evolución con la observada en España durante el mismo periodo.
- Estudiar los ciclos temporales de cada contaminante (mensual, horario) para relacionarlos con los procesos (naturales y antrópicos) responsables de variaciones en los niveles de concentración de contaminantes.
- Analizar la relación entre esos niveles de concentración de contaminantes y la dinámica atmosférica a escala local, mediante la elaboración de rosas de contaminación y el cálculo del coeficiente de correlación entre los valores diarios de cada variable meteorológica y los correspondientes valores de cada contaminante.
- Cuantificar la evolución de las superaciones de los valores límites de los diversos contaminantes, e identificar y analizar las condiciones atmosféricas que desencadenan dichos episodios.

3. RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LA CALIDAD DEL AIRE

A partir de los datos de la estación de Reinosa, se ha elaborado el siguiente cuadro que muestra los principales valores estadísticos asociados a las distribuciones diarias de los diferentes contaminantes.

	NO ₂	SO ₂	PM10	O ₃
Media	14,5	4,9	22,3	61,4
Máximo	62,1	57,9	130,5	131,7
Mediana	13	4	19,4	62
Moda	9	3	11	63
Percentil 05	5,8	1	7	27
Percentil 25	9,2	2,5	13	49
Percentil 75	18,2	6,1	28,7	74,2
Percentil 95	28	11,3	46,4	92,7
Percentil 99	37,7	20,4	64,9	107
Desviación típica	7,2	3,9	12,9	19,6

Cuadro 3.1. Valores estadísticos de cada contaminante. Fuente: Elaboración propia, 2016

El cuadro muestra que los dichos parámetros se encuentran dentro de los rangos habituales de calidad del aire de núcleos españoles de similares características. La calidad del aire presente en Reinosa valores en general mejores que los de localizaciones próximas y de tamaño comparables, salvo en el caso del O₃. Por ejemplo, Los Corrales de Buelna, con una población similar, tiene niveles superiores de NO₂ y partículas, al igual que ocurre en relación a Torrelavega y Castro Urdiales.

ESTACION	TIPO	LON	LAT	NO2	O3	PM10	SO2
ES1530A-REINOSA	FU	-4,13	43	14,8	60,9	23,2	5,2
ES1579A-LOS CORRALES	FU	-4,06	43,26	19,9	39,9	33	3,5
ES1038A-TORRELAVEGA (ZAPATÓN)	FU	-4,05	43,34	24,2	42,6	27	5,8
ES1529A-TETUÁN	FU	-3,79	43,46	20	46,6	28,5	3,7
ES1578A-CASTRO URDIALES	FU	-3,22	43,38	18,2	51,2	27,8	3,7
ES1295A-VELILLA DE RC	IS	-4,84	42,82	12,9	60,8	26,6	23,1
ES1287A-GUARDO	IS	-4,84	42,79	15,6	53,5	26,6	15,4
ES1443A-BURGOS 4	FU	-3,63	42,33	20,9	54,7	23,5	5,9
ES1346A-MIRANDA E 2	IU	-2,94	42,68	21,2	40,4	26,1	5,1

Cuadro 3.2. Valor medio (2001-2012) de los principales contaminantes en localidades próximas a Reinosa. Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos AIRBASE

(<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/airbase-the-european-air-quality-database-7>)

El visor de calidad del aire del MAGRAMA (MAGRAMA (<http://sig.magrama.es/calidad-aire/>)) ofrece la posibilidad de comparar los resultados del cuadro anterior desde el punto de vista (cualitativo) de la gestión. El mapa representa la concentración de sustancias contaminantes según colores, que representan umbrales definidos por la legislación:

- Umbral inferior de evaluación (UEI): el nivel por debajo del cual es posible limitarse al empleo de técnicas y de modelización para evaluar la calidad del aire ambiente. No es necesario monitorizar el aire.
- Umbral superior de evaluación (UES): el nivel por debajo del cual puede utilizarse una combinación de mediciones fijas y técnicas de modelización y/o mediciones indicativas para evaluar la calidad del aire ambiente.
- Valor límite anual (VLA): es necesario tomar medidas de corrección puesto se superan los límites legales y aconsejables.

La figura 3.1 muestra que el SO₂ no presenta problemas en ninguna de las estaciones. Contaminantes como el NO₂ y el PM10 tampoco presentan problemas en Reinosa, pero en zonas relativamente próximas, como la Bahía de Santander, o la ría de Bilbao, sí requieren su monitorización debido a concentraciones más elevadas. Por último, señalar que el contaminante que causa mayores problemas es el O₃, aunque no es una circunstancia exclusiva de Reinosa ya que afecta a todas las estaciones circundantes.

Imagen general del servicio

Legenda:

Media anual (ug/m3)	
	<=20 <=UEI
	20 - 28 UEI - UES
	28 - 40 UES - VLA
	>40 >VLA

UEI: Umbral de evaluación inferior ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

UES: Umbral de evaluación superior ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

VLA: Valor límite anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

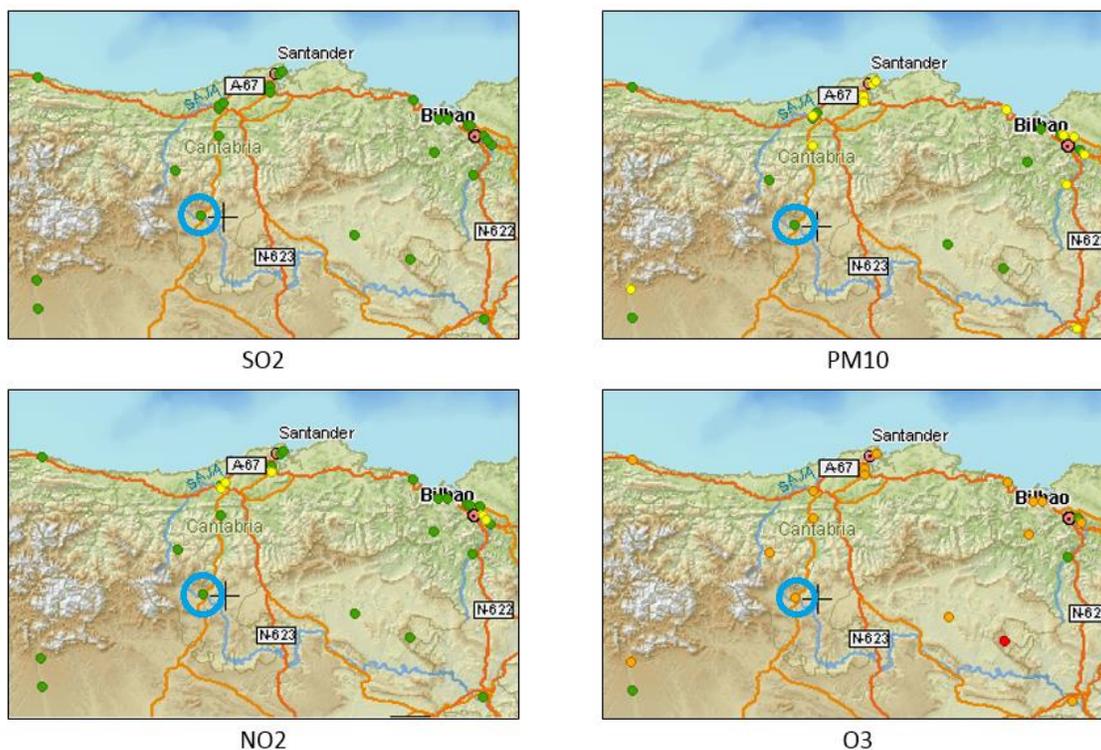


Figura 3.1. Calidad del aire para distintos contaminantes en las estaciones de vigilancia y control de Reinosa y las proximidades. Fuente: MAGRAMA (<http://sig.magrama.es/calidad-aire/>)

3.2 EVOLUCIÓN DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES (2001-2013).

La figura 3.2 muestra la evolución de los contaminantes medidos en Reinosa, entre los años 2001-2013, transformados en números índices con base en el año 2001. En líneas generales, se observa una tendencia a la disminución de los contaminantes, sostenida desde 2001 en el caso del SO₂, y algo más retrasada (desde 2003 y 2006 en el caso del PM₁₀ y del NO₂, respectivamente). El único contaminante que ha incrementado sus niveles es el O₃. Cabe señalar que el NO₂ experimentó una evolución creciente hasta el año 2006, para descender progresivamente tras esa fecha, tendencia que es la contraria al O₃, que tras reducirse hasta 2006, volvió a crecer con posterioridad.

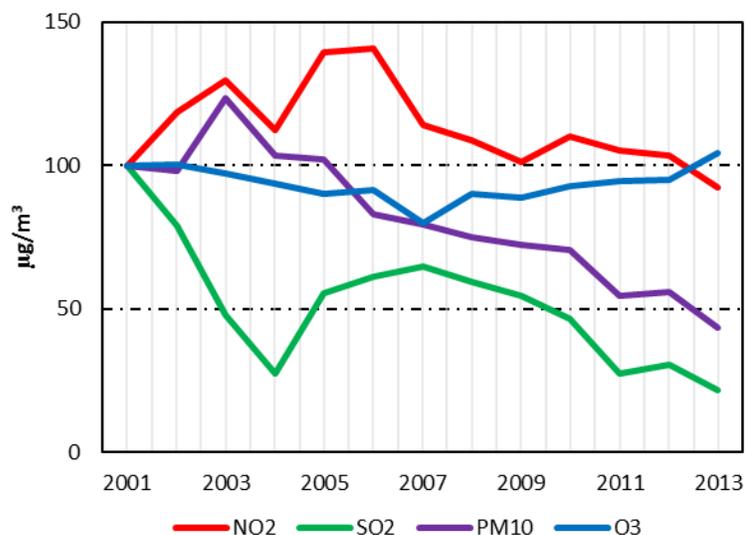


Figura 3.2: Evolución del valor medio de los distintos contaminantes en Reinosa (2001-2013).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de CIMA.

Si se compara esta evolución a escala local con la ocurrida a nivel nacional se observa que Reinosa comparte, a grandes rasgos, los mismos patrones de evolución (Querol et al, 2014). Por ejemplo, la caída de los niveles de SO₂ tiene que ver con la entrada en vigor del Plan Nacional de Reducción de Emisiones GICs, que implicó, por ejemplo, la instalación de filtros en las centrales térmicas. Por su parte, el NO₂ parece haber disminuido a consecuencia de la implantación de planes de mejora de la calidad del aire, particularmente en las grandes ciudades, así como por el impacto de la crisis económica sobre la renovación del parque de automóviles (disminución de la venta de vehículos). Por último, la disminución del PM10 ocurrió tras el año 2003, en el que coincidió con una de las olas de calor más intensas y prolongadas de los últimos decenios en la Península Ibérica. Las mismas condiciones atmosféricas que suelen causar altas temperaturas estivales contribuyen a una importante carga de partículas procedentes del Sáhara. Cabe confirmar que la evolución en el tiempo de la calidad del aire de Reinosa se ha beneficiado de las mejoras implantadas en los últimos años a nivel nacional, basadas en una legislación más restrictiva.

3.3. CICLOS TEMPORALES.

El análisis de los distintos ciclos temporales que muestran los contaminantes proporciona información acerca de su origen, natural o antrópico, de los procesos subyacentes y las condiciones más favorables para su aumento o reducción.

Un primer análisis del régimen mensual muestra dos comportamientos claramente diferenciados. Por un lado, tanto el SO₂ como el NO₂ muestran máximos invernales y mínimos estivales. Ambos contaminantes tienen su origen en procesos de combustión, por lo que el máximo invernal podría deberse tanto al incremento en el uso de calefacciones y vehículos particulares, como al predominio de situaciones de estabilidad atmosférica (inversiones térmicas) que dificultarían su dispersión en un ámbito topográficamente favorable a estos fenómenos. Los promedios más altos del O₃ ocurren en el semestre cálido, fundamentalmente entre abril y septiembre, aunque, a diferencia de lo que ocurre en el resto de España, Reinoso adelanta su máximo a abril y mayo, como en el litoral cantábrico (Diéguez Rodríguez et al, 2009). Por ello, se puede deducir que, además de la contribución del ozono generado por procesos fotoquímicos asociados a la temperatura y radiación solar, también podrían contribuir la llegada de ozono desde focos alejados de la región.

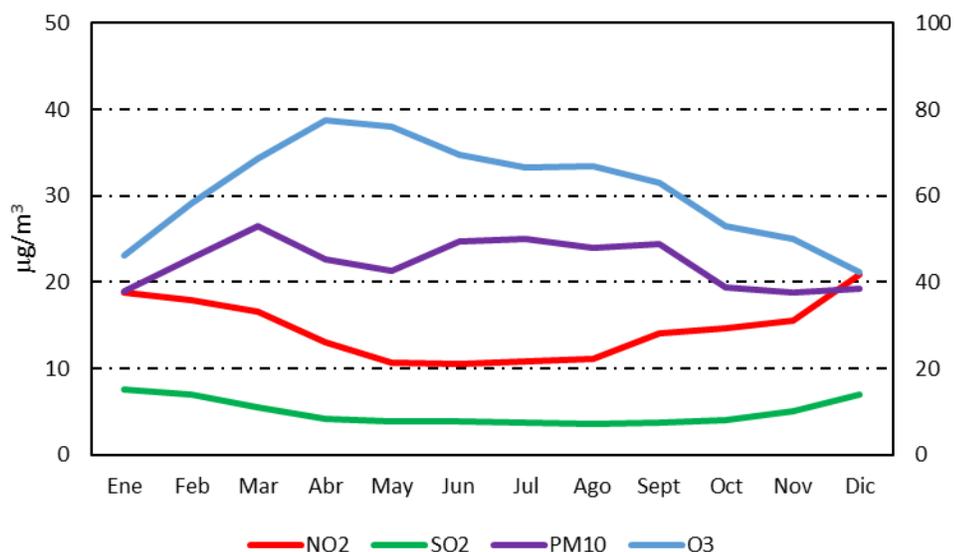


Figura 3.3. Promedios mensuales de los distintos contaminantes (eje vertical izquierdo: concentraciones de NO₂, SO₂ y PM₁₀; eje vertical derecho: concentraciones de ozono). Fuente:

Elaboración propia a partir de datos del CIMA.

Finalmente, cabe señalar que el PM10 es el contaminante que posee un régimen mensual más complejo, con un máximo prolongado entre mayo a septiembre, y un segundo máximo puntual en marzo, flanqueando mínimos entre abril y mayo, y octubre-diciembre. El máximo prolongado estival se puede atribuir a la elevada carga de aerosoles en la atmósfera, por ausencia de precipitaciones, recirculación de partículas desde el suelo, debido a la inestabilidad generada por el calor, y la presencia de intrusiones de aire sahariano; esta última causa parece estar también detrás del máximo de marzo.

Además del ciclo anual, las concentraciones de los contaminantes siguen un ciclo diario que guarda relación con las emisiones y con los procesos atmosféricos que contribuyen a su variabilidad. El NO₂ tiene un régimen bimodal, con dos máximos (a las 09 y las 21 horas) que viene a coincidir con los momentos de mayor tráfico, momentos además de predominio de condiciones de estabilidad atmosférica a escala local. Por el contrario, durante el mediodía los valores descienden acusadamente, en correspondencia con el aumento de la inestabilidad (mayor radiación solar, vientos más fuertes) y el incremento de O₃, que destruye NO₂. El SO₂ y el PM10 muestran también dos máximos diarios, de diferente magnitud, pero sin una disminución acusada durante el día. En el caso del SO₂, el sostenimiento de los valores diurnos podría relacionarse con actividades industriales que implican la quema de combustibles fósiles, y tal vez no tanto por el uso doméstico de calefacción. Por su parte, el ciclo diario del PM10 también manifiesta la complejidad de procesos que intervienen en su dinámica, ya que, junto al tráfico, que podría ser responsable de los dos máximos (pero no de su retraso con relación al NO₂), también intervienen otras fuentes, ligadas a procesos que desarrollan su actividad durante las horas diurnas, a lo que cabe añadir las intrusiones de origen natural, procedentes fundamentalmente del Sáhara. Por último, el ciclo más sencillo es el del ozono, con un único máximo vespertino, algo retrasado con respecto a la hora de mayor radiación solar, y un mínimo a primeras horas de la mañana, casi coincidente con uno de los máximos de NO₂.

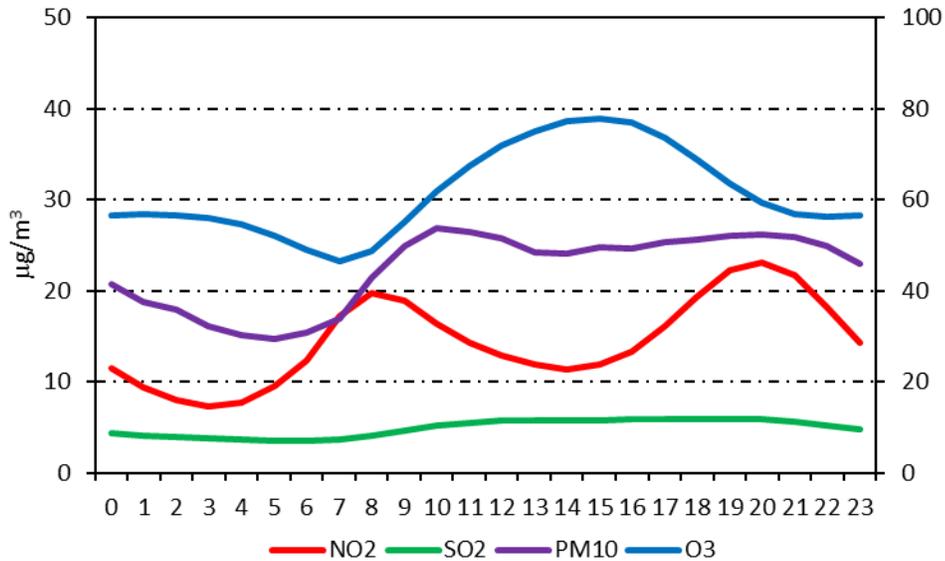


Figura 3.4. Evolución del ciclo diario de los contaminantes. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del CIMA

Este ciclo diario presenta, además, diferencias estacionales, particularmente en el caso del O₃. Muestra dos máximos con valores casi similares (entre 45 y 55 µg/m³) en invierno, uno nocturno y otro durante el mediodía; por el contrario, durante el verano, el máximo nocturno desaparece, mientras el diurno se dispara hasta alcanzar 90 µg/m³, en consonancia con el papel de la radiación solar como motor de procesos fotoquímicos. En el caso del PM₁₀ no hay grandes diferencias, probablemente por la combinación de unos niveles de fondo asociados a focos locales y regionales cuya actividad es más o menos constante, y unos máximos puntuales, relacionados con la llegada de masas de aire desde áreas geográficas más lejanas. Un rasgo singular es que los máximos matutino y vespertino están más marcados durante el verano, adelantándose el segundo a las 17 horas, probablemente a causa de la turbulencia provocada por el calentamiento de la superficie terrestre, mientras se retrasa a las 22 horas en invierno. Por último, también el ciclo diario del NO₂ experimenta una variación estacional considerable, pues los máximos de invierno están más marcados que los de verano, en especial a última hora de la tarde. Debido a la menor radiación solar, la transformación de NO₂ en O₃ no es completa en invierno, permaneciendo un remanente de NO₂ durante las horas diurnas, que no se dispersa tampoco por la mayor estabilidad atmosférica. Este remanente se acumularía a últimas horas de la tarde al generado por el tráfico de retorno. Lo contrario ocurre en verano, cuando la mayor inestabilidad atmosférica, el calor y la

mayor radiación solar transforman casi todo el NO₂ matutino en O₃, por lo que el máximo vespertino es inferior al matutino.

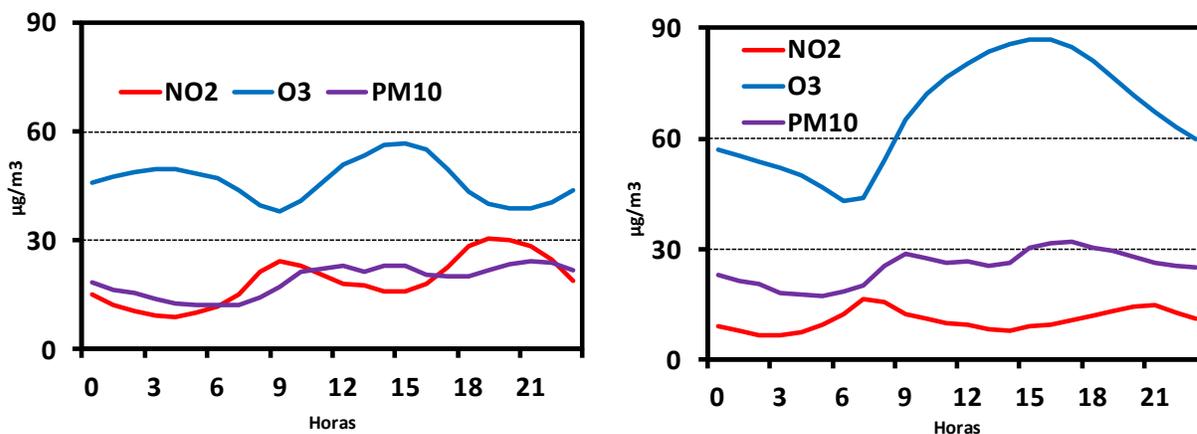


Figura 3.5. Comparación de la evolución de los contaminantes durante un día de invierno y otro de verano. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del CIMA.

De los comentarios anteriores se deduce que la variabilidad de los contaminantes está sometida a un conjunto de procesos que tienen a interactuar, proporcionando patrones de variabilidad temporal simultáneos. Para confirmar esta afirmación, se procedió al cálculo del coeficiente de correlación de Pearson entre los valores medios diarios de cada uno de los contaminantes durante los meses centrales de cada estación astronómica (Cuadro III). En verano todos los contaminantes ofrecen correlaciones positivas, lo que indica que durante esta época del año predomina un proceso común. Sin embargo, durante el resto del año coexisten dos mecanismos diferentes, uno protagonizado por el ozono, que muestra correlaciones negativas con el resto de los contaminantes, y otro que explica las variaciones simultáneas y en el mismo sentido, del SO₂, PM10 y NO₂. En este sentido, cabe señalar que el ozono, como contaminante secundario, no se alimenta de los mismos precursores en verano que el resto del año.

	SO2	PM10	O3
ENERO			
NO2	0,23	0,53	-0,68
SO2		0,39	-0,12
PM10			-0,53
ABRIL			
NO2	0,07	0,52	-0,58
SO2		0,16	-0,13
PM10			-0,12
JULIO			
NO2	0,37	0,61	0,34
SO2		0,31	0,01
PM10			0,34
OCTUBRE			
NO2	0,23	0,49	-0,54
SO2		0,35	-0,19
PM10			-0,25

Cuadro 3.3. Correlaciones de Pearson entre los valores diarios de cada contaminante según los meses centrales de cada estación del año (valores significativos según un nivel de confianza del 95 % sombreados en naranja –positivos- y azul –negativos-). Fuente: elaboración propia a partir de datos del CIMA

3.4. INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EN LA CALIDAD DEL AIRE.

La influencia de las condiciones atmosféricas sobre los niveles de contaminación del aire en Reinos se ha analizado de dos maneras diferentes, el cálculo del coeficiente de correlación entre el valor diario de diversos parámetros meteorológicos y los registros de cada contaminante, para los meses centrales de cada estación astronómica (enero, abril, julio y octubre), y elaborando las rosas de contaminación asociadas a cada compuesto.

La figura 3.4 confirma, en primer lugar, la primacía de cierto número de variables en los procesos de formación y dispersión de contaminantes a escala local. En este sentido, la presión y la humedad relativa adquieren una relevancia secundaria con respecto a la temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento. Además, la influencia de estas últimas variables no es constante a lo largo de todo el año, lo que vendría a confirmar la complejidad de los procesos que regulan la calidad del aire en Reinos.

	TMED	TMAX	TMIN	HR	RAD	VEL	PRES
ENERO							
NO2	-0,25	0,07	-0,44	-0,03	0,28	-0,63	0,28
SO2	0,04	0,16	-0,06	-0,26	0,32	-0,27	0,08
PM10	-0,06	0,17	-0,22	-0,18	0,29	-0,4	0,36
O3	0,04	-0,25	0,23	-0,24	-0,12	0,63	-0,41
ABRIL							
NO2	0,39	0,48	0,06	-0,12	0,29	-0,43	0,08
SO2	0,09	0,13	-0,03	-0,2	0,07	-0,21	-0,1
PM10	0,49	0,54	0,22	-0,39	0,41	-0,1	0,27
O3	-0,32	-0,41	-0,09	-0,16	-0,2	0,44	-0,09
JULIO							
NO2	0,5	0,47	0,33	-0,14	0,23	-0,19	-0,02
SO2	0,23	0,26	0,1	-0,1	0,24	-0,14	-0,15
PM10	0,63	0,57	0,44	-0,04	0,34	-0,3	-0,01
O3	0,46	0,4	0,28	-0,38	0,29	-0,03	0,07
OCTUBRE							
NO2	0,02	0,32	-0,23	-0,21	0,28	-0,54	0,15
SO2	-0,01	0,05	-0,08	-0,04	0,02	-0,16	-0,02
PM10	0,32	0,45	0,13	-0,13	0,24	-0,32	0,26
O3	0,07	-0,24	0,28	-0,19	-0,14	0,62	-0,31

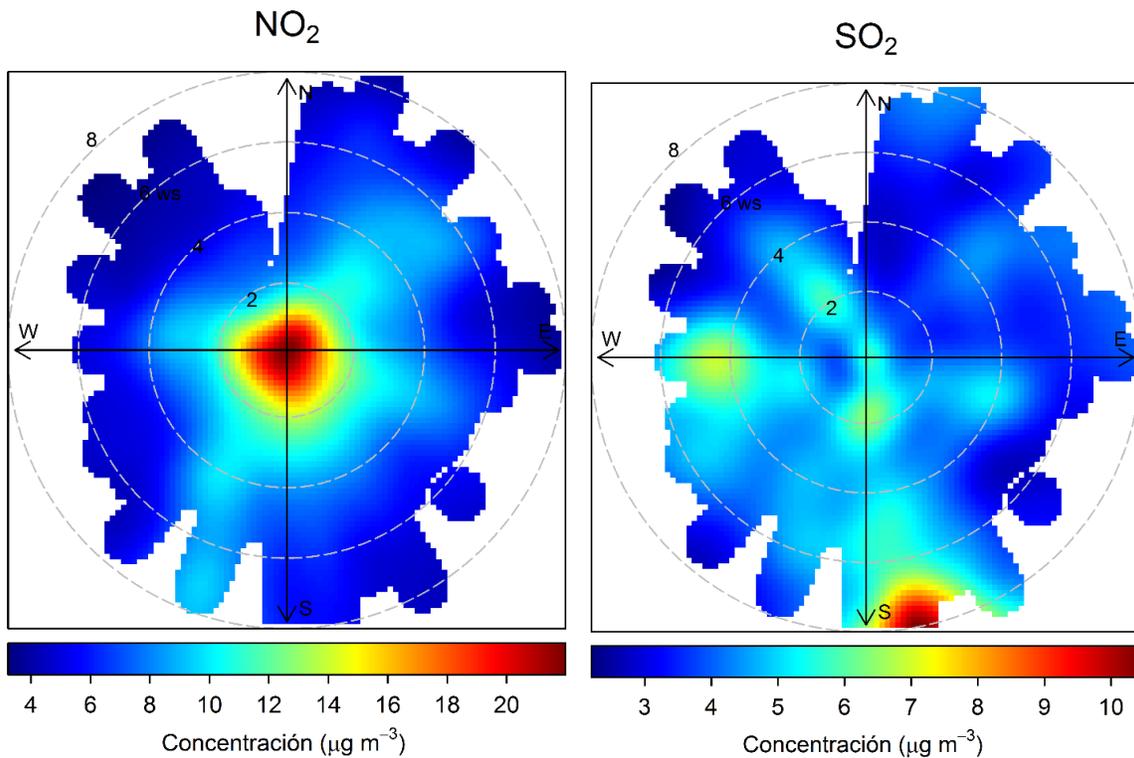
Cuadro 3.4. Coeficiente de correlación de Pearson entre los valores medios diarios de los parámetros meteorológicos y los niveles de cada contaminante (valores significativos según un nivel de confianza del 95 % sombreados en naranja –positivos- y azul –negativos-). Elaboración propia a partir de datos del CIMA

Durante el invierno, las concentraciones de SO₂, NO₂ y PM10 aumentan bajo condiciones de estabilidad atmosférica (bajas temperaturas nocturnas, cielos poco nubosos, ausencia de viento), que pueden atribuirse a la presencia de un anticiclón (altas presiones). Las altas concentraciones de estos tres contaminantes sería el resultado de la quema de combustibles fósiles, situación habitualmente asociada a la formación de contaminación ácida. El ozono, por el contrario, muestra una clara afinidad con situaciones inestables, dada su correlación negativa con las temperaturas máximas, la humedad relativa y la presión, y las positivas con la temperatura mínima, la radiación y la velocidad del viento. Esta asociación entre ozono e inestabilidad atmosférica se ratifica en primavera, dado el signo y el valor de las correlaciones halladas en este momento del año. Por su parte, el PM10 comienza a estar relacionado a partir de este momento con condiciones atmosféricas cálidas, secas y con alta radiación, también asociadas a anticiclones (correlación positiva de la presión; advección de aire sahariano). Por el contrario, el NO₂ sigue vinculado a temperaturas diurnas altas, cielos poco nubosos y ausencia de viento, condiciones reflejo de una situación de estabilidad similar a las invernales. En el caso del verano, destaca claramente la correlación positiva de todos los contaminantes con la temperatura, tanto máxima

como mínima, y con la radiación solar (lo que indirectamente refleja que sus concentraciones más elevadas se producen durante las horas diurnas). En el caso de las partículas se añade la correlación negativa con el viento (reflejo de una limitada capacidad dispersiva de la atmósfera). En otoño se vuelve al predominio de procesos locales asociados a condiciones de estabilidad, al menos para el NO₂ y las partículas, mientras que el ozono vuelve a registrar un comportamiento similar al del invierno y la primavera, basado en la advección de masas de aire ricas en ozono de otros lugares.

El segundo método para analizar la relación entre contaminación y dinámica atmosférica es la elaboración de rosas de contaminación, a través de las cuales se puede inferir el origen, local o alóctono, de cada contaminante, así como la magnitud del transporte y su procedencia. En el caso del NO₂, las concentraciones más elevadas coinciden con vientos en calma, lo que permite suponer que es un contaminante endógeno, producido en la propia ciudad de Reinosa durante los procesos de combustión ligados al transporte; es más, del núcleo central las concentraciones se expanden en diversas direcciones, que corresponderían con los vehículos que circulan por la autovía (N-S) mientras que hacia el oeste y este serían las carreteras que van hacia Campoo de Suso y Campoo de Yuso respectivamente. La rosa de contaminación del SO₂ muestra que no es un contaminante generado en la propia ciudad, sino que llega a Reinosa arrastrado por vientos de diferente fuerza y dirección. Las mayores concentraciones se registran con vientos fuertes (> 6 m/s) del SSE, que corresponden a la localización de la fábrica de Cementos Alfa, en Mataporquera, a 20 km de distancia. Esta empresa utiliza coque de petróleo, un combustible muy rico en azufre. Un segundo máximo, con vientos del W también fuertes (>4 m/s) podría pertenecer al penacho generado por la central térmica de Velilla del Río Carrión, situado a 60 km de Reinosa, y que utiliza también una mezcla de hulla, antracita y coque, también ricos en azufre. Finalmente, las concentraciones asociadas a vientos flojos del S y del NW, estarían vinculadas a la producción local, sobre todo a través de pequeñas empresas o calefacciones domésticas. Por su parte, la rosa de contaminación correspondiente al O₃ muestra la importancia del transporte de ozono desde otros puntos, dado que la mayoría de las concentraciones se producen con vientos fuertes (> 6 m/s) y dos direcciones fundamentales, ENE y NW. Probablemente, la primera dirección corresponde a la llegada de O₃ procedente, bien de Europa, bien del País Vasco, siendo transportado hacia Reinosa desde la costa. El segundo foco de concentración, con vientos del NW, no tiene una clara explicación, aunque podría deberse a la intrusión de O₃ estratosférico tras el paso de un frente frío, ya observada en estudios previos en el área de la Bahía de Santander

(Hernández et al, 2004). En el caso del PM10, predominan las direcciones con una componente E y vientos moderados (6 m/s), lo que lleva a pensar, como en el caso del ozono, en un origen fundamentalmente exógeno, aunque con una cierta participación local. El origen del foco más importante sería la actividad industrial en el eje del Besaya, ascendiendo hasta Reinosa a través del corredor del Besaya, como corresponde a los vientos del NE. Un segundo foco de importancia corresponde a los vientos del ESE, cuya dirección corresponde a la localización del complejo industrial de SIDENOR, mientras que los vientos del SSW tendrían el mismo papel con el material particulado procedente tanto del valle del Duero como de una cantera instalada en Matamorosa. Aportes complementarios de material particulado procedentes de Cementos Alfa (vientos del SSE), de dos antiguas canteras a orillas del Ebro (vientos del WSW) y emisiones locales (calmas) completan la compleja procedencia de material particulado.



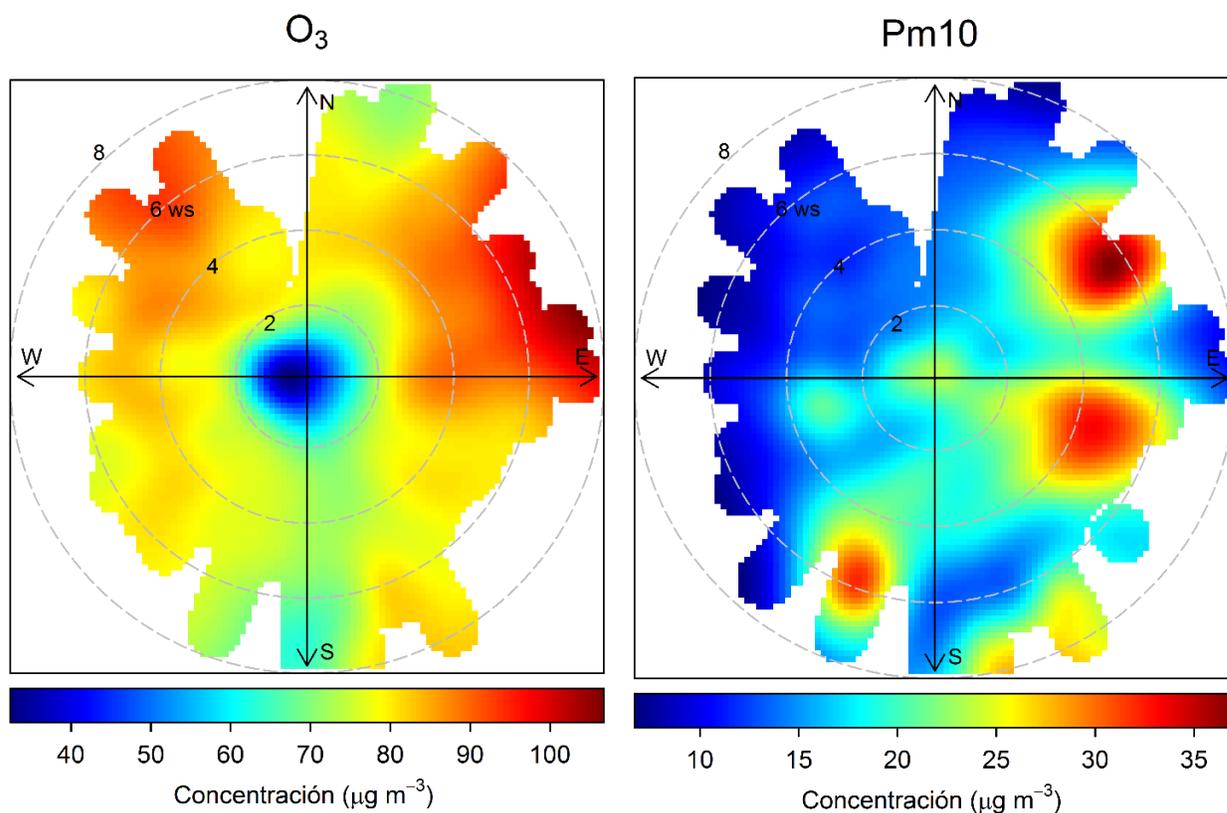


Figura 3.6. Rosas de contaminación de la estación de Reinosa. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del CIMA.

3.5 ANÁLISIS DE EPISODIOS DE SUPERACIÓN DE LOS VALORES LÍMITE

La legislación en vigor establece unos valores de referencia (conocidos como valores límite) a distintas escalas temporales (horarias, diarias, etc) para los niveles de contaminación en el aire, que no deben superarse una vez alcanzados, puesto que generan una situación de riesgo evidente para la población o el medio ambiente. El análisis específico de estas situaciones está sustentado en el interés que despiertan, como pone de manifiesto el Plan de Calidad del aire en Cantabria 2006-2012, que identifica como Objetivo A6 “...la realización de un análisis exhaustivo de las causas que han podido motivar...episodios de contaminación local con superaciones significativas de los valores límite en calidad del aire,..., de cara a establecer medidas orientadas a evitar dichos episodios...”. Entre los años 2001 y 2013 los únicos contaminantes que superaron en algún momento esos valores límites legales en Reinosa fueron el PM10 y el ozono, por lo que este apartado se centrará en ambos contaminantes. En el caso del O₃ se produjeron 210 días con superaciones durante el periodo de análisis, mientras que en el caso del

PM10 se produjeron 101. En el caso del PM10 el valor límite diario (VLD, promedio en 24 horas) para la protección de la salud humana es 50 mg/m^3 , y no debería superarse en más de 35 ocasiones por año civil, mientras el valor límite anual (VLA) está establecido en 40 mg/m^3 . En cuanto al ozono, el valor para la protección de la salud humana se establece en 120 mg/m^3 , y no debería superarse en más de 25 ocasiones por año. El umbral de información se establece en 180 mg/m^3 y el umbral de alerta en 240 mg/m^3 . (Análisis de la calidad del aire de España, 2013).

La figura 3.7 muestra que, entre 2001 y 2013, las superaciones de ambos contaminantes han seguido tendencias divergentes. En el caso del PM10 la tendencia es decreciente, con un máximo en 2003, descendiendo drásticamente a partir de ese año, aunque con algún repunte como en 2005 y 2010, hasta alcanzar valores muy bajos a partir del 2008; incluso los años 2009 y el 2013 no registraron ninguna superación. En cuanto al O₃, su evolución es totalmente distinta, puesto que hasta 2007 la tendencia decreciente fue análoga a la de las partículas, pero, a diferencia del PM10, las superaciones de ozono han vuelto a aumentar, disparándose entre los años 2011 y 2013.

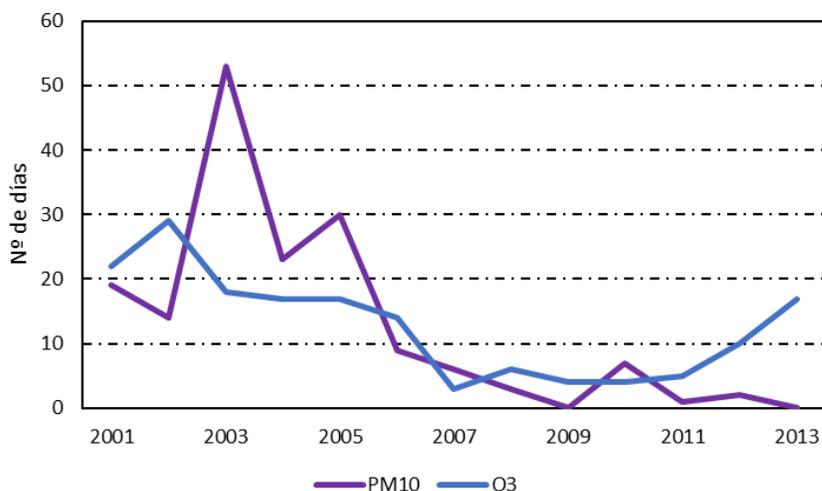


Figura 3.7. Número de superaciones producidas entre los años 200-2013. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del CIMA

En cuanto a la distribución del número de excedencias a lo largo del año, también se observan claras diferencias entre ambos contaminantes, ligadas a los ciclos mensuales ya comentados. El O₃ muestra un mínimo en los meses de invierno y un máximo en los de verano, particularmente en agosto, aunque existe otro pico secundario en mayo. Por el contrario, las superaciones de partículas ocurrieron en todos los meses del año, aunque existen dos máximos, uno primaveral

(marzo) y otro estival (agosto), con mínimos primaverales (mayo) e invernales (enero). El máximo de marzo está relacionado con intrusiones de aire sahariano y disminución de la capacidad dispersión de la atmósfera (mínimo relativo de las precipitaciones). En los meses de abril y mayo el aumento de las precipitaciones contribuye a que el número de excedencias baje, mientras que en verano se produce otro máximo debido a que, junto a la llegada de masas saharianas, las menores precipitaciones y las altas temperaturas de la Meseta producen una turbulencia en las capas bajas que provoca la resuspensión de las partículas de la capa superficial del terreno.

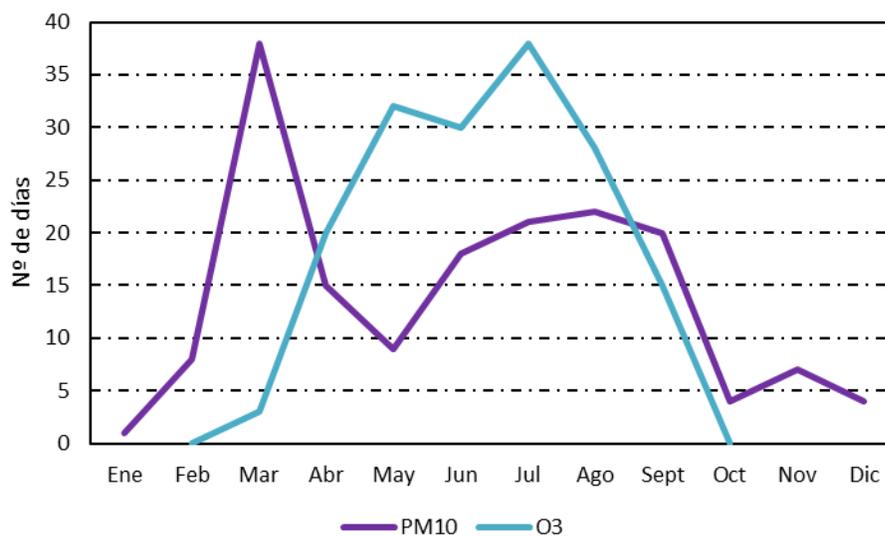


Figura 3.8. Distribución del número de superaciones a lo largo del año. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del CIMA.

A continuación, se realizará un análisis detallado de alguno de los episodios de superación de O₃ y PM₁₀ más relevantes en Reinosa, con el fin de ilustrar los diferentes procesos comentados a lo largo del trabajo, y las condiciones meteorológicas que los acompañaron.

Los análisis llevados a cabo en este trabajo nos permiten determinar la existencia de dos tipos de procesos que explicarían los elevados índices de ozono en Campoo. Uno de ellos es el mecanismo más habitual en la Península Ibérica, de naturaleza fundamentalmente fotoquímica, típico del verano. Este es el caso del episodio de superación de ozono que ocurrió entre el 6 y el 13 de julio de 2013. Como puede observarse en la figura 3.8, el ozono mostró un ciclo diario claro, con valores nocturnos bajos y máximos diurnos superiores a 150 µg/m³, en los que a veces aparece un doble máximo, siendo el vespertino siempre mayor que el matutino.

El mapa de la presión a nivel del mar correspondiente al 11 de julio muestra un área de bajas presiones que se extiende sobre África y la Península Ibérica. Esta célula corresponde a una expansión de la baja térmica que se forma en África durante el verano, cuando el sol calienta la superficie terrestre y el aire que está en contacto con este suelo caliente, mientras que en las capas altas se invierte el patrón y aparecería una zona de altas presiones. Las Islas Británicas estarían ocupadas por un anticiclón dinámico. En el mapa de la temperatura a 850 hPa (unos 1500 de altura, aproximadamente) el área ocupada por las bajas presiones corresponde a una advección de aire muy cálido (302°K, unos 30°C), procedente del Sáhara.

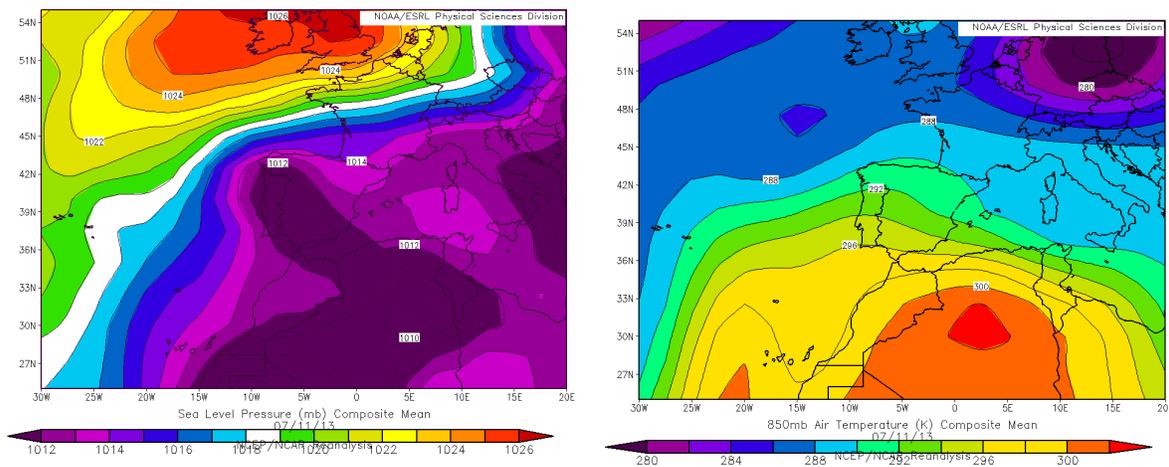


Figura 3.9. Mapa de la presión atmosférica a nivel del mar (izquierda) y de la temperatura a 850 hPa (derecha) durante el día 11 de julio de 2013. Fuente: NOAA/ESRL Physical Sciences Division en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

Esta situación generó en Reinoso un tiempo muy cálido (máximas superiores a los 25°C) y estable, con cielos despejados, alta radiación (próxima a 750 W/m²), amplitud térmica muy contrastada y un régimen de brisas (vientos del NNE) que alcanzaron su máxima velocidad a últimas horas de la tarde, con un retraso de aproximadamente 2 horas con respecto a los máximos de radiación solar. Estas condiciones son ideales para la formación de ozono, a través de reacciones fotoquímicas, probablemente a partir de precursores arrastrados desde la costa cantábrica por la brisa. Esta última circunstancia explica el que los máximos horarios de ozono no coincidan habitualmente con las horas de máxima radiación, sino con las horas de máxima velocidad del viento.

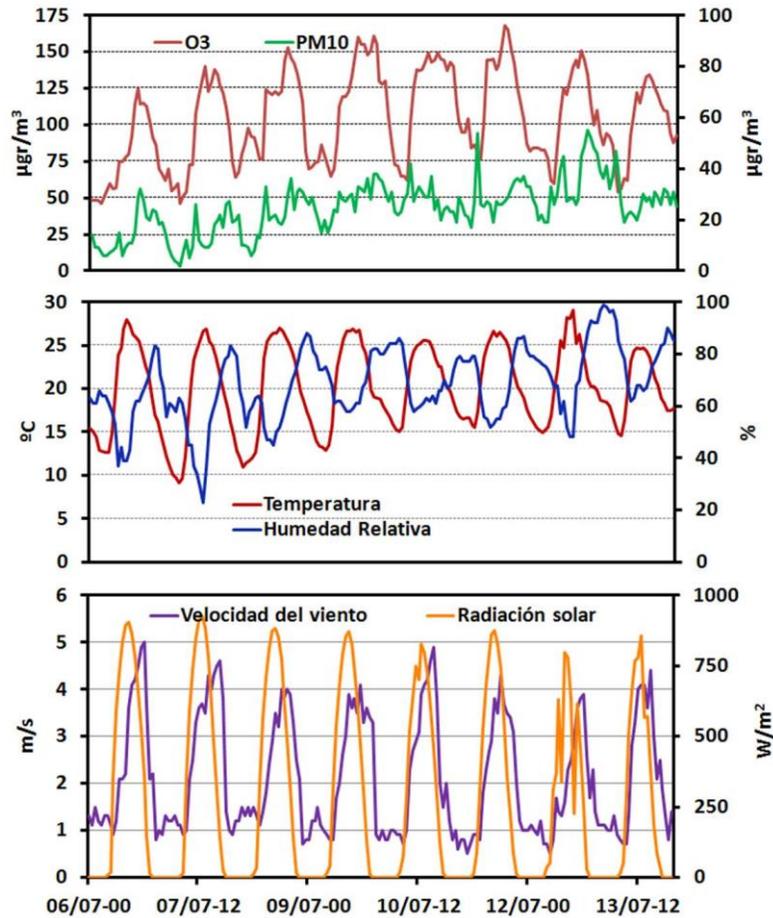


Figura 3.10: Evolución horaria de contaminantes (ozono y Pm10 - $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -) y variables meteorológicas (temperatura - $^{\circ}\text{C}$ -, humedad relativa -%- , velocidad del viento - m/s - y radiación solar - W/m^2 -) en la estación de Reinosa durante el periodo 6 al 13 de julio de 2013. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CIMA

Los niveles de ozono resultan de un equilibrio entre transformaciones químicas locales y transporte de precursores desde regiones contaminadas, y de las emisiones y deposición a partir de fuentes naturales (emisiones de VOC biogénicas, incendios forestales, actividad eléctrica (Gerasopoulos et al., 2005). Los estudios realizados en estaciones de fondo confirman que, durante episodios estivales bajo condiciones de estabilidad atmosférica, altas temperaturas y gran insolación, el O3 se comporta claramente como un contaminante secundario producido bajo procesos fotoquímicos, a partir del transporte de precursores desde grandes aglomeraciones urbanas, y afectado por circulaciones locales, tales como las brisas marinas (Lelieveld et al., 2002). Estas premisas parecen explicar el origen de este episodio de contaminación por ozono, como confirman las posibles trayectorias de las partículas de aire a 3 niveles atmosféricos

diferentes. Obsérvese que, en las capas medias y altas (1500 y 3000 m) las partículas de aire apenas habrían experimentado desplazamiento alguno en las 72 horas anteriores al día 11 de julio, como corresponde a una situación muy estable. Por el contrario, en superficie, se aprecia una prolongada trayectoria a favor del flujo superficial del NNE generado por el anticiclón sobre las Islas Británicas. Esta trayectoria habría permitido que la masa de aire se cargara de sustancias contaminantes sobre Europa Occidental, entre ellas los precursores del ozono, que alcanzaría la costa de Cantabria y posteriormente ascendería por el valle del Besaya hasta Campoo arrastrada por la brisa marina.

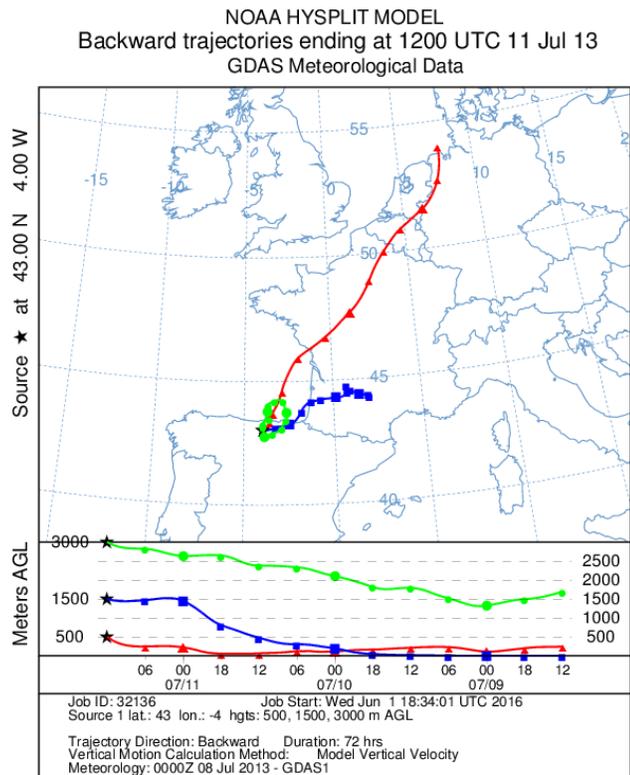


Figura 3.11. Retrotrayectorias (72 horas) correspondientes a los niveles de 500, 1500 y 3000 m durante el día 11 de julio de 2013. Fuente: Air Resources Laboratory (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

Junto a los episodios de origen fotoquímico, se ha detectado también intrusiones de ozono que tienen su máximo efecto durante los meses de abril y mayo. Este episodio, entre el 9 y el 16 de abril de 2003, estuvo caracterizado por valores de ozono superiores a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sostenidos en el tiempo, es decir, en los que no se aprecia ciclo diario alguno, y que coincidieron con una reducción sustancial de los valores de PM10.

El mapa de presión a nivel del mar podría recordar la situación atmosférica de julio de 2013, con un anticiclón sobre las Islas Británicas, que extiende su radio de acción sobre gran parte de la Península Ibérica, mientras las bajas presiones se sitúan lejos, sobre el N de África. Sin embargo, la temperatura de la topografía de 850 hPa muestra una situación radicalmente diferente, pues una lengua de aire frío procedente de Centroeuropa alcanzó el N de la Península Ibérica.

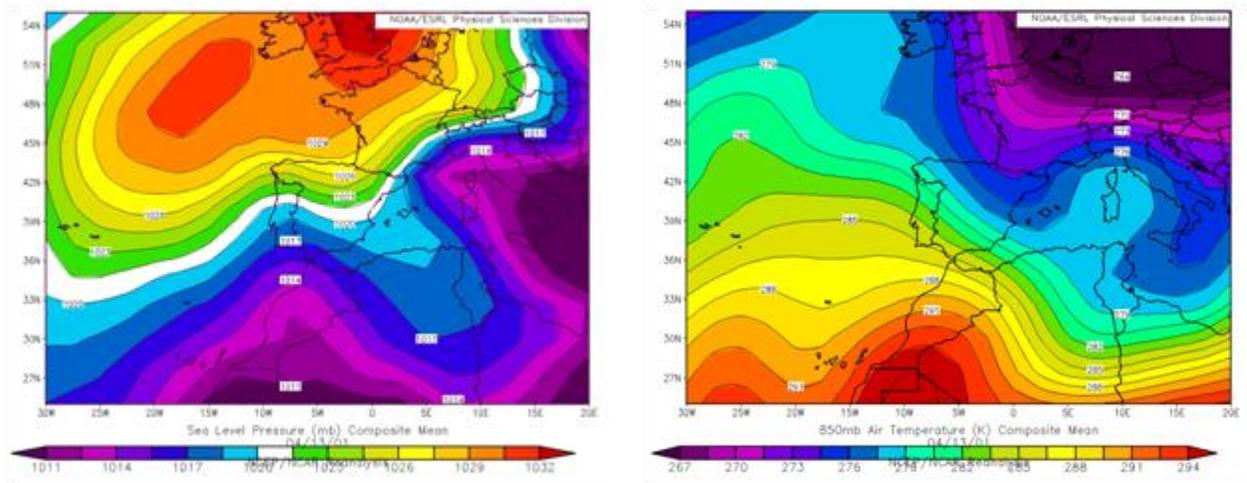


Figura 3.12. Mapa de la presión atmosférica a nivel del mar (izquierda) y de la temperatura a 850 hPa (derecha) durante el día 11 de julio de 2013. Fuente: NOAA/ESRL Physical Sciences Division en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

La evolución del tiempo en Reinoso muestra el efecto de la sustitución de una masa cálida, seca y carente de nubes, por aire frío de procedencia septentrional, tras el paso de un frente. Esta advección provocó una caída de las temperaturas (de 17°C el día 9 a 8°C de máxima el día 13), vientos moderados (>4 m/s) de componente NE y cielos nubosos, con valores de radiación por debajo de los 500 W/m².

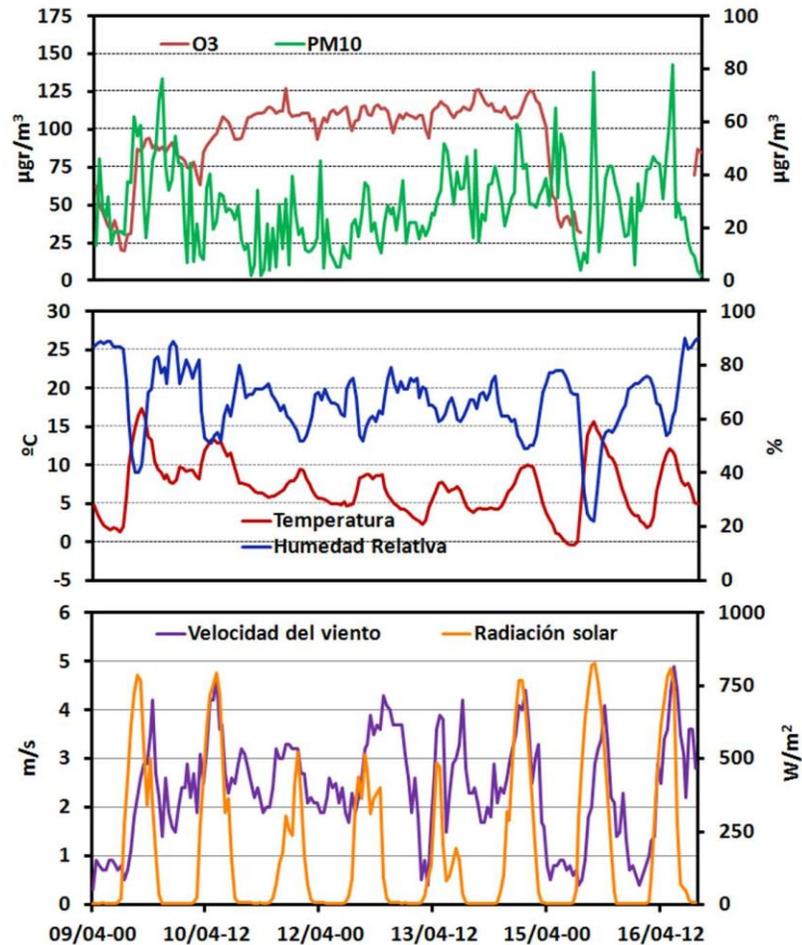


Figura 3.13: Evolución horaria de contaminantes (ozono y Pm10 - $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ -) y variables meteorológicas (temperatura - $^{\circ}\text{C}$ -, humedad relativa -%- , velocidad del viento - m/s - y radiación solar - W/m^2 -) en la estación de Reinosa durante el periodo 9 al 16 de abril de 2003. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CIMA

El origen de estos elevados valores de ozono no puede atribuirse a un efecto fotoquímico, ligado al calor y a una alta radiación, sino a la llegada de aire rico en ozono procedente de otros lugares, ya que los máximos de O₃ coinciden con una reducción de la temperatura y de la radiación solar y con el aumento de la velocidad del viento, y en los que no se aprecia ciclo diario alguno. Respecto a los posibles orígenes de esta intrusión, el modelo de retro trayectorias señala que la masa de aire recorrió el Atlántico a todos los niveles; el rasgo más destacable es la disminución de la altura de la trayectoria a 3000 m, que podría confirmar la hipótesis de una intrusión de ozono desde la estratosfera, tras el paso del frente frío.

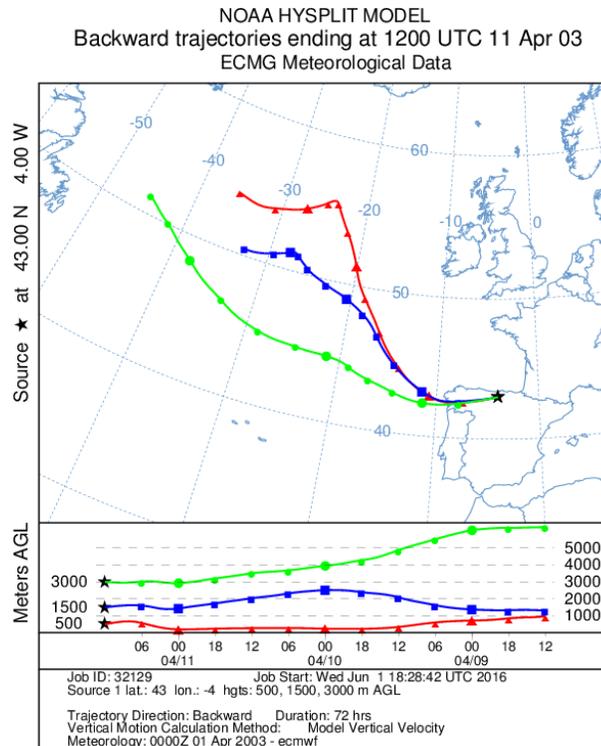


Figura 3.14. Retrotrayectorias (72 horas) correspondientes a los niveles de 500, 1500 y 3000 durante el día 11 de abril de 2003. Fuente: Air Resources Laboratory (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

El PM₁₀ es el otro contaminante que ha generado un mayor número de superaciones en Reinosa, aunque, a diferencia del ozono, su número se ha reducido drásticamente en el último decenio. Junto a posibles aportes locales y regionales, la mayor parte de las superaciones de partículas se originan por la llegada de masas de aire cargado de aerosoles, desde África (<http://www.calima.ws/episodiosoccurridos.html>). Un ejemplo de estos episodios de intrusión sahariana ocurrió entre el 9 y el 16 de marzo de 2003, cuando se alcanzaron valores de PM₁₀ superiores a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El mapa de presión a nivel del mar correspondiente al 13 de marzo mostraba gran parte de la Península Ibérica bajo el radio de acción de sendos núcleos de bajas presiones, uno cerrado al NW de Galicia, y otro, abierto, sobre el Golfo de Cádiz. El primero corresponde a una típica borrasca de latitudes medias, relativamente poco profunda, mientras que el segundo es una vaguada térmica que se produce habitualmente en verano, cuando las temperaturas sobre el N de África y la Península Ibérica son elevadas. La llegada de una masa desde el N de África se refleja en una lengua de aire cálido (hasta 288°K, es decir, 15°C) en el mapa de la temperatura de la

topografía de 850 hPa. Esta configuración de la circulación atmosférica en superficie y altura es muy favorable a la llegada de masas de aire cargadas con aerosoles, fundamentalmente polvo del Sahara, en las que se incluye ocasionalmente partículas extraídas de la Meseta, especialmente cuando el invierno ha sido seco.

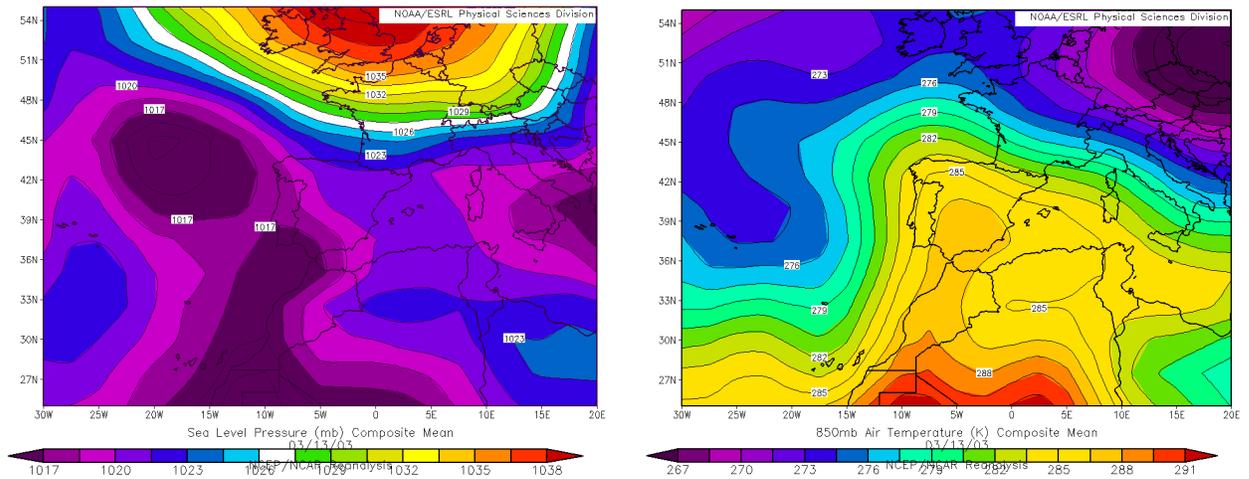


Figura 3.15. Mapa de la presión atmosférica a nivel del mar (izquierda) y de la temperatura a 850 hPa (derecha) durante el día 11 de julio de 2013. Fuente: NOAA/ESRL Physical Sciences Division en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

La evolución del tiempo en Reinosa muestra las altas temperaturas para la época del año (20°C), la gran amplitud térmica por la ausencia de nubes (mínimas entre 5 y 10°C) y valores de radiación superiores a 600 W/m^2 . Los vientos fueron suaves (inferiores a 3 m/s , salvo el día 14), pudiendo detectarse en ellos un débil régimen de brisas en el periodo del 12 al 14. Un análisis detallado del ciclo diario del PM_{10} muestra los dos máximos diarios comentados previamente, aunque durante este episodio, los máximos diarios ocurrieron a primeras horas de la mañana (entre las 08 y las 11), lo que pone de manifiesto, por un lado, la existencia de un fondo local en los niveles de contaminación, removilizado por la turbulencia local calentarse la atmósfera por la radiación solar. A mediodía, el viento logra disipar ligeramente estas concentraciones, que vuelven a aumentar a últimas horas de tarde al cesar el viento. Sin embargo, el pico máximo de concentración se produjo a últimas horas del día 13 (22 horas), alcanzando valores excepcionalmente altos ($254\text{ }\mu\text{g/m}^3$).

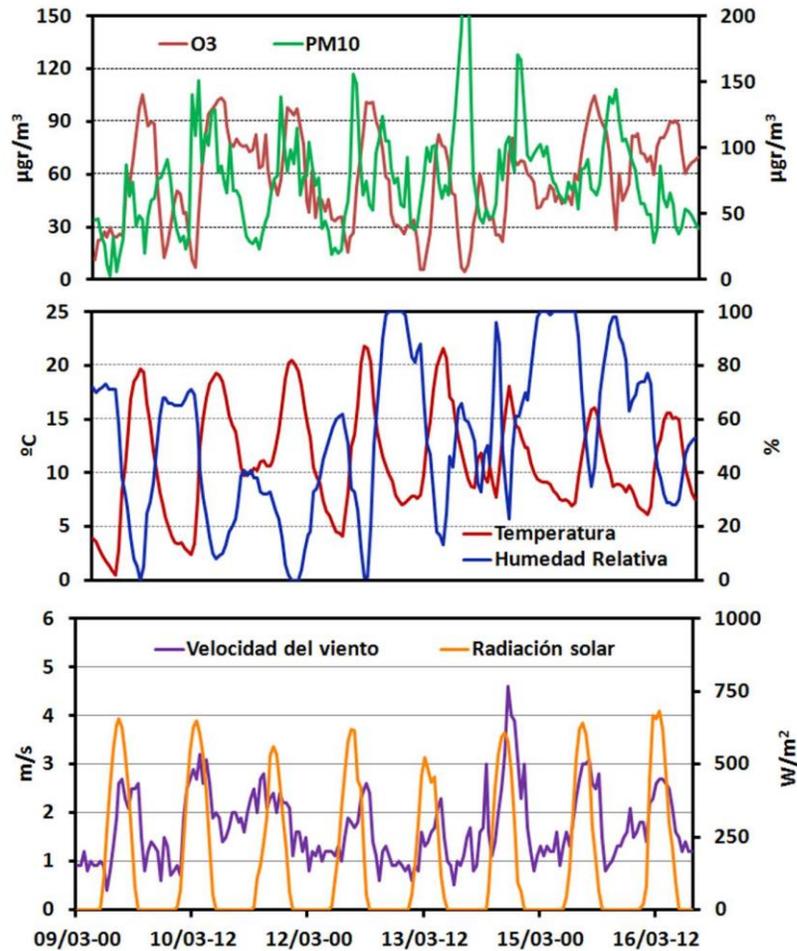


Figura 3.16. Evolución horaria de contaminantes (ozono y PM10 - $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -) y variables meteorológicas (temperatura - $^{\circ}\text{C}$ -, humedad relativa -%- , velocidad del viento - m/s - y radiación solar - W/m^2 -) en la estación de Reinosa durante el periodo 9 al 16 de marzo de 2003. Fuente: elaboración propia a partir de datos del CIMA

El origen fundamentalmente africano de esta intrusión, acompañada probablemente de aerosoles arrastrados desde la Meseta o localidades próximas, se confirma acudiendo a la trayectoria seguida por las partículas de aire que alcanzaron Reinosa el día 13 de marzo de 2003. A partir de ellas se puede observar que la intrusión africana alcanzó la Península Ibérica en las capas altas (1500 y 3000 m), mientras que en superficie (500 m) la trayectoria recorrió gran parte de la mitad oriental de la Península Ibérica.

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 13 Mar 03
 ECMG Meteorological Data

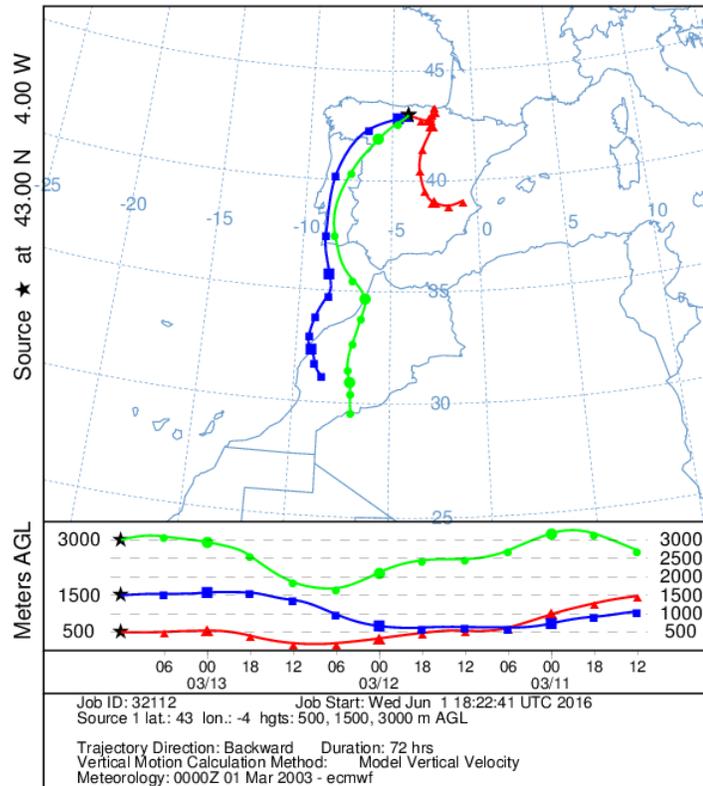


Figura 3.17. Retrotrayectorias (72 horas) correspondientes a los niveles de 500, 1500 y 3000 durante el día 13 de marzo de 2003. Fuente: Air Resources Laboratory (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)

4. CONCLUSIONES

En relación a los objetivos del trabajo

- Se ha efectuado un análisis exploratorio, calculando los valores medios de los principales contaminantes, con el fin de cuantificar el nivel de calidad del aire de Reinosa y comparar su situación con la de localidades próximas.
- Se ha analizado la variabilidad temporal para determinar los principales mecanismos a los que están sometidos esos contaminantes.
- Se ha investigado la relación entre las concentraciones diarias de contaminantes y los valores meteorológicos, para determinar el grado de control ejercido por la dinámica atmosférica a escala local sobre esos contaminantes, y los posibles focos de contaminación.
- Determinar el papel de la dinámica atmosférica regional sobre la ocurrencia de episodios de superación de los valores límite recomendados por la legislación, para avanzar los posibles mecanismos de transporte a gran escala.

Los principales resultados son los siguientes:

- La calidad del aire en Reinosa es buena, y no significativamente diferente de la de localidades vecinas, persistiendo aún problemas con dos contaminantes, el O₃ y el PM₁₀, una situación similar a la del resto de España.
- El comportamiento diario y anual, así como la evolución a largo plazo de esos contaminantes, sigue los modelos propuestos en otros estudios sobre contaminación atmosférica en la Península Ibérica. Así, tanto el NO₂ y el SO₂ muestran dos máximos diarios, al amanecer y al anochecer, relacionados con actividades antrópicas locales (tráfico, calefacción), más importantes en invierno. El PM₁₀ también muestra mayores valores durante las horas diurnas, debido a la combinación de fuentes antrópicas y naturales, manteniendo un régimen mensual caracterizado por máximos en marzo y en verano. El O₃ manifiesta un ciclo diario y un régimen mensual claramente ligados a la radiación diurna, aunque con máximos en abril y mayo, probablemente relacionado con la llegada de ozono transfronterizo, ligando Reinosa a los procesos típicos de la vertiente cantábrica. Salvo el ozono, que ha vuelto a aumentar desde 2007, los restantes

contaminantes han evolucionado positivamente, como ha ocurrido en el resto de España, gracias a la implantación de medidas legislativas y a la crisis económica.

- Las condiciones meteorológicas locales son determinantes a la hora de explicar el régimen mensual de los contaminantes y la localización de los principales focos de contaminación. Tanto el NO₂ como el SO₂ tienen un origen fundamentalmente local, aumentando su concentración bajo situaciones con vientos flojos, cielos despejados y posiblemente inversiones térmicas, favorecidas por la topografía. El PM10 está asociado a la llegada de masas de aire cuyo contenido puede ser local (tráfico, industria), regional (tanto Mataporquera como valle del Besaya, transportado por el viento) o nacional (polvo en suspensión desde la Meseta o el Sáhara). El ozono ofrece un comportamiento muy complejo, apreciándose 2 posibles orígenes. El primero es típico de procesos de transformación fotoquímica estival, con altas temperaturas, abundante radiación solar, y un régimen de vientos en forma de brisas que alcanzan Campoo desde la costa por la tarde, transportando precursores que se transforman en ozono. Durante el resto del año, y particularmente en primavera, el ozono parece estar relacionado con situaciones inestables, temperaturas relativamente bajas y vientos fuertes, lo que hace pensar en la inyección de ozono desde la estratosfera.

En relación a uno de los objetivos del trabajo, que era la identificación de los focos de contaminación que afectan a la calidad del aire en el valle de Campoo, y tal y como se ha señalado en líneas anteriores, los principales se sitúan no sólo en la propia ciudad (tráfico y calefacciones), sino también en zonas próximas (Figura 4.1). Ejemplo de ello son las emisiones de Cementos Alfa, en Mataporquera, o de todas las instalaciones situadas a lo largo del valle del Besaya (Los Corrales de Buelna, Torrelavega), fuera ya de Cantabria, se ha detectado la posibilidad de recepción de emisiones procedentes de la central térmica de Velilla del Río Carrión, que produce energía usando como combustibles el carbón (hulla y antracita). De igual modo, Reinosa también está afectada por la contaminación transfronteriza en forma de aportaciones naturales desde el Sahara, o, posiblemente, por compuestos generados por la industria europea.

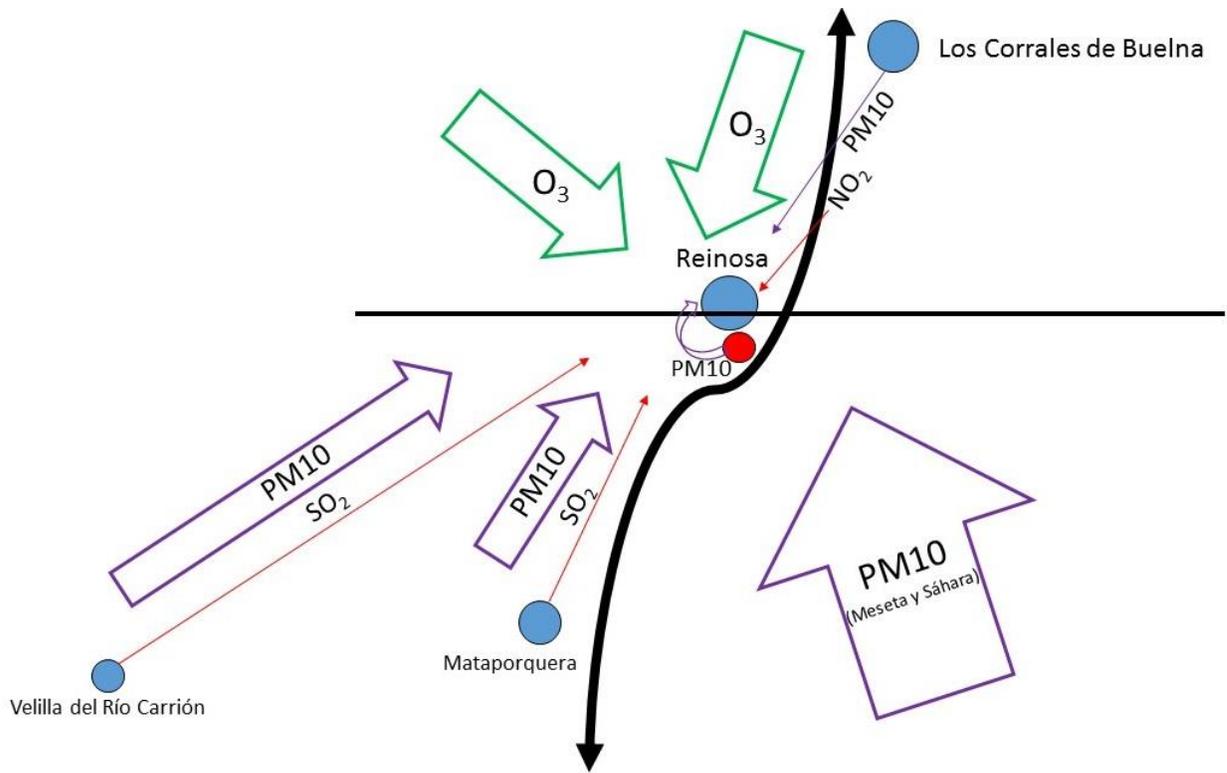


Figura 4.1. Focos de contaminación que afectan a Reinosa. Elaboración propia

5. BIBLIOGRAFÍA

Diéguez Rodríguez J.J.; Millán Muñoz M.; Padilla Gómez L. y Palau J. *Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por ozono troposférico en España*. Fundación CEAM/MAGRAMA, Valencia 2009, 372 pp.

García Codron J.C. y Rasilla, D (2008). El clima de Campoo. La importancia de los factores locales. *Cuadernos de Campoo*, 2: 6-36.

García Codrón, J.C. y Bermejo Zubezu, O. (1988). Consecuencias climáticas de la creación de un embalse: estadísticas y percepción. *Ería*, 16: 125-130.

Gerasopoulos E., Kouvarakis G., Vrekoussis M., Donoussis C., Mihalopoulos N. y Kanakidou M. (2006): Photochemical ozone production in the Eastern Mediterranean *Atmospheric Environment* 40, pp. 3057–3069.

Hernández A.; García Codrón J.C. y Rasilla D. (2004). Análisis de la contaminación atmosférica en el entorno de la bahía de Santander. Primeros resultados. En *El clima, entre el mar y la montaña* (Diego C.; García Codrón J.C.; Rasilla D.; Fernández de Arróyabe P y Garmendia C.). Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, serie A-2: 661-670

Lelieveld, J., Peters, W., Dentener, F.J. and Krol, M.C. (2002). Stability of tropospheric hydroxyl chemistry. *Journal of Geophysical Research* 107: doi: 10.1029/2002JD002272. issn: 0148-0227.

MAGRAMA (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes a la Atmósfera*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España. Consultado en junio de 2015 en <http://www.magrama.gob.es/ca/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistemaespanol-de-inventario-sei/>.

Orio A.; Pallarés M. y Querol X.. Análisis de la calidad del aire en España. Evolución 2001-2012. MAGRAMA, Madrid 2014, 325 pp.

Plan de Calidad del aire en Cantabria 2006-2012, en su página 104 (http://www.medioambientecantabria.es/documentos_contenidos/56000_1.PLAN.pdf)

Pujadas Cordero, M. *Formación y transporte de dióxido de nitrógeno en la cuenca aérea de Madrid en situaciones episódicas de invierno*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid 2002, 168 pp.

Querol X.; Alastuey A.; Moreno T.; Viana M.; Castillo S. y Pey J. (2008). Spatial and temporal variations in airborne particulate matter (PM10 and PM2.5) across Spain 1999–2005. *Atmospheric Environment* 42: 3694–979.

Querol X.; Alastuey A.; Pandolfi M.; Reche C.; Pérez N.; Minguillón M.C.; Moreno T.; Viana M.; Escudero M.; Orío A.; Pallarés M. y Reina F. (2014). 2001–2012 trends on air quality in Spain. *Science of the Total Environment* 490: 957–969.

Querol X.; Viana M.; Alastuey A.; Moreno T.; González, A.; Pallarés M. y Jiménez S. (2014). Niveles, composición y fuentes de PM10, PM2.5 y PM1 en España: Cantabria, Castilla León, Madrid y Melilla. MAGRAMA/CSIC, Barcelona 2009, 404 pp.

Querol X.; Viana M.; Moreno T. y Alastruey A (eds.). *Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire*. CSIC, Barcelona 2012, 349 pp

Santurtún Zarrabeitia, A. *Contaminación atmosférica, tipos de tiempo y procesos respiratorios en Santander y Zaragoza*. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Santander 2014.

6.ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

- 1.1 Localización de la zona de estudio
- 1.2 Climodiagramas de Santander, Reinosa y Polientes (1981-2010)
- 1.3 Inversión térmica en el valle de Campoo, con penacho de contaminación de tipo fumigación
- 1.4 Evolución de la velocidad del viento en Reinosa y localidades próximas
- 1.5 Rosa de los vientos de Reinosa
- 1.6 Evolución de la radiación solar en Reinosa y localidades próximas
- 1.7 Inversión térmica en el valle de Campoo con nieblas
- 1.8 Pirámide de población por edades de Reinosa
- 1.9 Intensidad Media Diaria en Reinosa
- 1.10 Ámbito de influencia de contaminantes sobre Reinosa
- 2.1 Estación de la Red de Vigilancia y Control de Reinosa
- 3.1 Calidad del aire para distintos contaminantes en las estaciones de vigilancia y control de Reinosa y las proximidades.
- 3.2 Evolución del valor medio de los distintos contaminantes en Reinosa (2001-2013)
- 3.3 Promedios mensuales de los distintos contaminantes (eje vertical izquierdo: concentraciones de NO₂, SO₂ y PM10; eje vertical derecho: concentraciones de ozono)
- 3.4 Evolución del ciclo diario de los contaminantes
- 3.5 Comparación de la evolución de los contaminantes durante un día de invierno y otro de verano
- 3.6 Rosas de contaminación de la estación de Reinosa
- 3.7 Número de superaciones producidas entre los años 200-2013
- 3.8 Distribución del número de superaciones a lo largo del año
- 3.9 Mapa de la presión atmosférica a nivel del mar (izquierda) y de la temperatura a 850 hPa (derecha) durante el día 11 de julio de 2013
- 3.10 Evolución horaria de contaminantes (ozono y Pm10 - $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -) y variables meteorológicas (temperatura - $^{\circ}\text{C}$ -, humedad relativa -%-, velocidad del viento - m/s - y radiación solar - W/m^2 -) en la estación de Reinosa durante el periodo 6 al 13 de julio de 2013

3.11 Retrotrayectorias (72 horas) correspondientes a los niveles de 500, 1500 y 3000 durante el día 11 de julio de 2013

3.12 Mapa de la presión atmosférica a nivel del mar (izquierda) y de la temperatura a 850 hPa (derecha) durante el día 11 de julio de 2013

3.13 Evolución horaria de contaminantes (ozono y Pm10 $-\mu\text{g}/\text{m}^3$ -) y variables meteorológicas (temperatura $-\text{°C}$ -, humedad relativa $-\%$ -, velocidad del viento $-\text{m}/\text{s}$ - y radiación solar $-\text{W}/\text{m}^2$ -) en la estación de Reinososa durante el periodo 9 al 16 de abril de 2003

3.14 Retrotrayectorias (72 horas) correspondientes a los niveles de 500, 1500 y 3000 durante el día 11 de abril de 2003

3.15 Mapa de la presión atmosférica a nivel del mar (izquierda) y de la temperatura a 850 hPa (derecha) durante el día 11 de julio de 2013

3.16 Evolución horaria de contaminantes (ozono y PM10 $-\mu\text{g}/\text{m}^3$ -) y variables meteorológicas (temperatura $-\text{°C}$ -, humedad relativa $-\%$ -, velocidad del viento $-\text{m}/\text{s}$ - y radiación solar $-\text{W}/\text{m}^2$ -) en la estación de Reinososa durante el periodo 9 al 16 de marzo de 2003

3.17 Retrotrayectorias (72 horas) correspondientes a los niveles de 500, 1500 y 3000 durante el día 13 de marzo de 2003

4.1 Focos de contaminación que afectan a Reinososa

Cuadros

Cuadro 1.1. Tiempo empleado en los desplazamientos por la población de más de 16 años.

Cuadro 1.2. Medios de transporte en Reinososa

Cuadro 3.1. Valores estadísticos de cada contaminante

Cuadro 3.2. Valor medio (2001-2012) de los principales contaminantes en localidades próximas a Reinososa

Cuadro 3.3. Correlaciones de Pearson entre los valores diarios de cada contaminante según los meses centrales de cada estación del año (valores significativos según un nivel de confianza del 95 % sombreados en naranja –positivos- y azul –negativos-).

Cuadro 3.4. Coeficiente de correlación de Pearson entre los valores medios diarios de los parámetros meteorológicos y los niveles de cada contaminante (valores significativos según un nivel de confianza del 95 % sombreados en naranja –positivos- y azul –negativos-).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a la cesión de datos meteorológicos y de concentración de contaminantes por parte del CIMA (Centro de Investigaciones Medioambientales), organismo autónomo del Gobierno de Cantabria dependiente de la Consejería de Medio Ambiente.

A color: 1, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36,
37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 46,