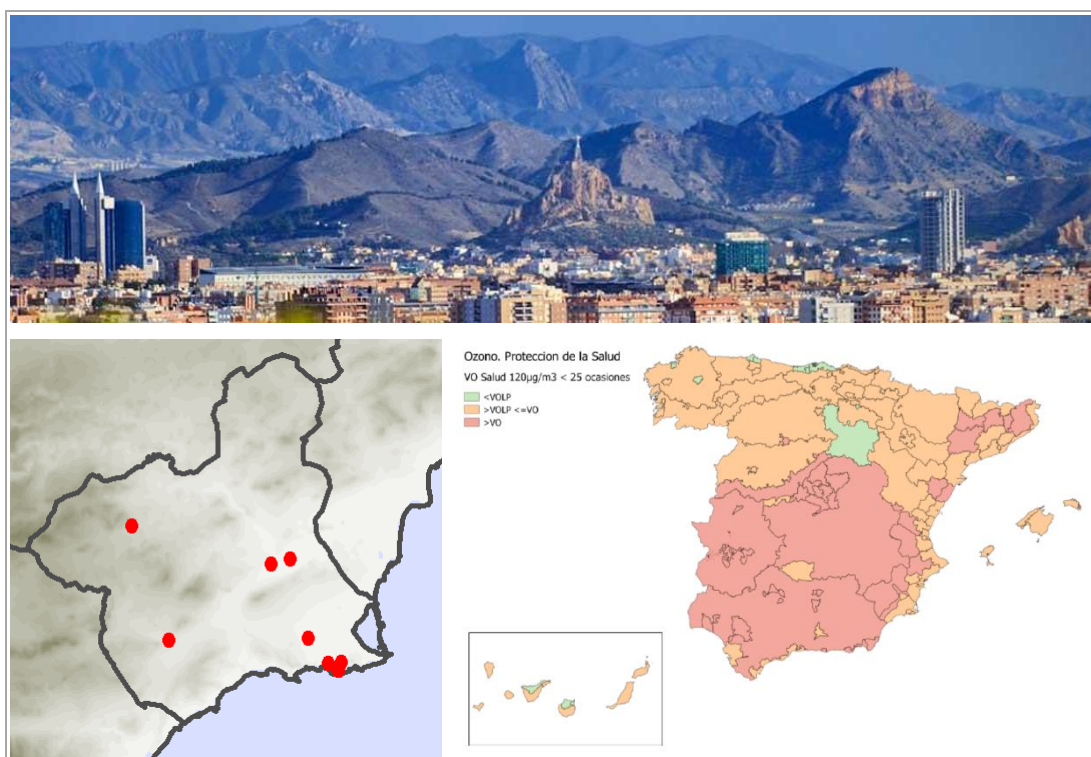


Informe Final

Análisis de los Niveles de Ozono Troposférico en la Región de Murcia



Informe elaborado para la *Dirección General de Medio Ambiente y Mar Menor* de la *Consejería de Empleo, Universidades, Empresas y Medio Ambiente* del Gobierno de la Región de Murcia

Abril 2019

Autores

José Jaime Diéguez (jjjaime@ceam.es) Programa Meteorología y Contaminación Atmosférica.

Vicent Calatayud (vicent@ceam.es) Programa Efectos de los contaminantes y ciclo del carbono.

Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM)

Índice

I. INTRODUCCION	3
1. Contexto general de la contaminación por ozono troposférico	3
2. Objetivo y actividades del estudio.....	9
II. DESCRIPCION DE LA BASE DE DATOS Y METODOLOGIA	11
3. Descripción de la base de datos.	11
4. Metodología	17
III. ANÁLISIS Y RESULTADOS	23
5. Análisis de los datos de ozono en la Región de Murcia.....	23
5.1. Estadísticos y patrones espacio-temporales.	23
5.2. Análisis de la dinámica del ozono en la Región de Murcia.....	29
5.2.1 Distribución de emisiones	29
5.2.2 Análisis de los vientos dominantes	29
5.2.3 Análisis de las situaciones de niveles altos de ozono	37
IV. POSIBILIDADES DE EVALUACIÓN DE EFECTOS DEL OZONO EN LA VEGETACIÓN DE LA REGIÓN DE MURCIA	53
6. Efectos del ozono en la vegetación	53
6.1. Daños visibles por ozono	55
7. Evaluación de riesgos para la vegetación	63
7.1. Niveles críticos de ozono relevantes para la vegetación mediterránea ...	64
V. RESUMEN Y CONCLUSIONES	67
VI. BIBLIOGRAFIA	71
ANEXO 1: Resumen de la legislación vigente en calidad del aire	75
ANEXO 2: Dinámica del ozono. Factores y componentes	81
ANEXO 3: Control de calidad de los datos del periodo 2008-2018.....	95

I. INTRODUCCION.

1. Contexto general de la contaminación por ozono troposférico.

El ozono troposférico (O_3) es un contaminante secundario de origen fotoquímico¹ que se genera en la atmósfera a partir de reacciones químicas entre sus precursores, fundamentalmente óxidos de nitrógeno ($NO_x = NO + NO_2$) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), en presencia de radiación solar. Los NO_x son de origen fundamentalmente antropogénico, con la mayor contribución proveniente de los procesos de combustión del transporte y la industria. El nombre genérico COV engloba más de un millar de compuestos de las familias de los hidrocarburos alifáticos y aromáticos, éteres, aldehídos, cetonas, ácidos y alcoholes, de origen tanto natural como antropogénico. Entre otras fuentes son liberados por la quema de combustibles, en la fabricación y manipulación de disolventes, pinturas y productos de limpieza, y en las emisiones biogénicas de la vegetación.

Debido a su carácter fuertemente oxidante el ozono afecta a la salud humana y a la vegetación. Se trata de un contaminante a escala global, con mayor impacto en las regiones industrializadas y densamente pobladas de las latitudes medias del hemisferio norte. Además el ozono es un gas de efecto invernadero (GEI), el tercero en importancia por su forzamiento radiativo después de dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4) (Foster *et al.*, 2007). Y puesto que su formación está muy influida por las condiciones climáticas, se prevé que el aumento de la temperatura global conlleve un incremento de la producción de ozono en muchas áreas del planeta y en particular en el sur de Europa (IPCC, 2007; Langner J., et al 2012).

Los estudios epidemiológicos llevados a cabo hasta la fecha han puesto de manifiesto el efecto de los contaminantes sobre la salud humana. Respecto al ozono en particular actualmente se cuenta con evidencia científica de su impacto sobre la mortalidad y la morbilidad, afectando especialmente a la función respiratoria y cardiovascular. La evidencia acumulada demuestra efectos tanto a largo plazo, debido a la exposición prolongada a los niveles ambiente, como a corto plazo, debido a exposiciones de corta duración durante episodios de altas concentraciones. En relación con los efectos a largo plazo, hasta el momento no se ha podido determinar la existencia de un umbral de concentración por debajo del cual no se produzca impacto sobre la salud (WHO, 2013). En cuanto a efectos sobre la vegetación el ozono es el contaminante atmosférico más relevante. Penetra a través de los estomas de las hojas y produce estrés oxidativo en las plantas, que puede desembocar en reducciones en la asimilación de CO_2 , daños visibles, y reducciones en la producción de los cultivos y en la productividad de los bosques.

¹ *Troposférico* hace referencia al ozono que se encuentra a nivel de superficie, no al que forma la capa de ozono en la estratosfera, que no respiramos y que posibilita la vida en el planeta. *Contaminante secundario* es el que no se emite directamente a la atmósfera por fuente alguna, sino que se forma posteriormente a partir de otras especies. Y *fotoquímico* se refiere a que se forma a partir de reacciones químicas activadas por la radiación solar.

Por todo ello el ozono es uno de los contaminantes para los que la Organización Mundial de la Salud ha establecido valores guía (WHO, 2006), equivalentes a niveles máximos recomendados aunque no de estricto cumplimiento legal. Igualmente forma parte del conjunto de contaminantes atmosféricos regulados por la legislación en gran parte del mundo. En Europa la Directiva 2008/50/CE, *relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa*, establece valores límite para un conjunto de contaminantes, y valores objetivo y objetivos a largo plazo para el ozono en particular. Esta directiva ha sido transpuesta a la legislación española en el R.D. 102/2011, *relativo a la mejora de la calidad del aire*. El Anexo I resume los aspectos más importantes de esta legislación.

El último informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente sobre la calidad del aire en Europa (EEA, 2018) señala que a nivel europeo el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), el NO₂ y el O₃ son los contaminantes más importantes en términos de daños a la salud. Un 7-30% de la población urbana en la UE está expuesta a niveles por encima del valor objetivo de ozono para protección de la salud (120 µg/m³ como promedio de 8h). El porcentaje aumenta hasta el 95-98% si se toma como referencia el valor guía de la OMS (100 µg/m³ para el mismo promedio). Los mayores niveles de ozono se registran en los países meridionales, donde la mayor incidencia de la radiación solar y las condiciones meteorológicas predominantes en primavera y verano, son favorables para la formación y acumulación de ozono. Como resultado, las evaluaciones anuales de la calidad del aire muestran la superación sistemática, en mayor o menor grado, del valor objetivo de protección a la salud en los países mediterráneos, España entre ellos, aunque también varios países del centro de Europa superan este valor.

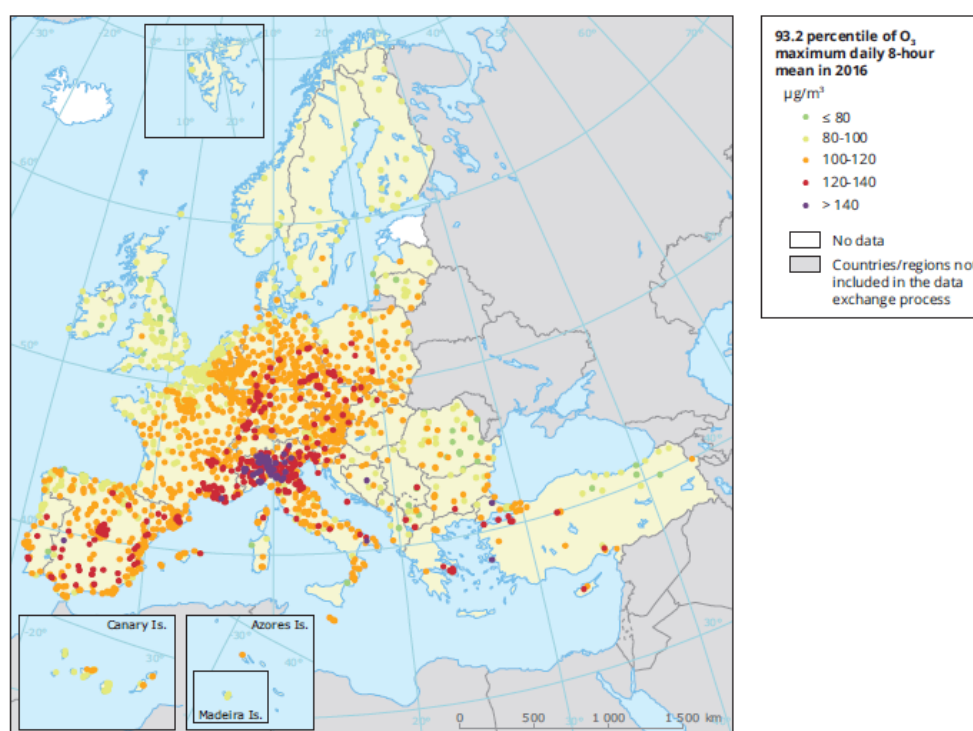


Figura 1: Niveles de ozono en Europa en 2016. Se representa el percentil 93.2 de los máximos diarios del promedio de 8h en las estaciones automáticas de calidad del aire. Los valores mayores de 120 µg/m³, en rojo y morado, se pueden asimilar a la superación del valor objetivo. (Fuente: EEA, 2018)

Las medidas de reducción de la contaminación atmosférica en Europa se han hecho efectivas mediante la aplicación de la legislación a diferentes niveles: limitación de las emisiones industriales impuesta por la directiva 2001/81/CE sobre techos nacionales de emisión, mejoras tecnológicas de combustibles y de motores de vehículos impuestas por las sucesivas normas Euro, implementación a escala local de medidas de limitación de tráfico urbano, etc. Todas estas medidas han propiciado una reducción significativa de muchos contaminantes, pero no han sido tan eficaces en el caso de otros, como las partículas o el ozono, y en general se puede afirmar que el problema de la contaminación atmosférica está aún lejos de haberse resuelto.

La reducción efectiva de los niveles de ozono es particularmente compleja debido a diferentes factores que se pueden resumir en los tres siguientes: i) La variedad de especies y actividades precursoras; ii) la química no-lineal del ozono (las reducciones en los precursores no conllevan necesariamente una reducción en las concentraciones de ozono) relacionada con la ratio NO_x/VOC presente en la masa de aire²; y iii) el tiempo de residencia del ozono en la atmósfera, del orden de varios días, propicia su acumulación bajo condiciones meteorológicas favorables, así como la adición de componentes de diferentes escalas (local, regional y hemisférica).

Hay que matizar que en entornos urbanos el ozono tiene un ciclo de vida corto, pues la abundancia de emisiones “frescas” lo mantiene en equilibrio dinámico con los NO_x , que actúan a la vez como precursores y como sumidero (a causa de la oxidación de las moléculas de NO por parte del ozono). Como resultado los niveles de ozono en las ciudades suelen presentar valores moderados, más bajos cuanto más cerca de las emisiones del tráfico. En cambio, en zonas suburbanas y rurales, apartadas del contacto directo con estas emisiones su tiempo de residencia aumenta, y a cierta distancia a sotavento de las ciudades se alcanzan habitualmente concentraciones más elevadas.

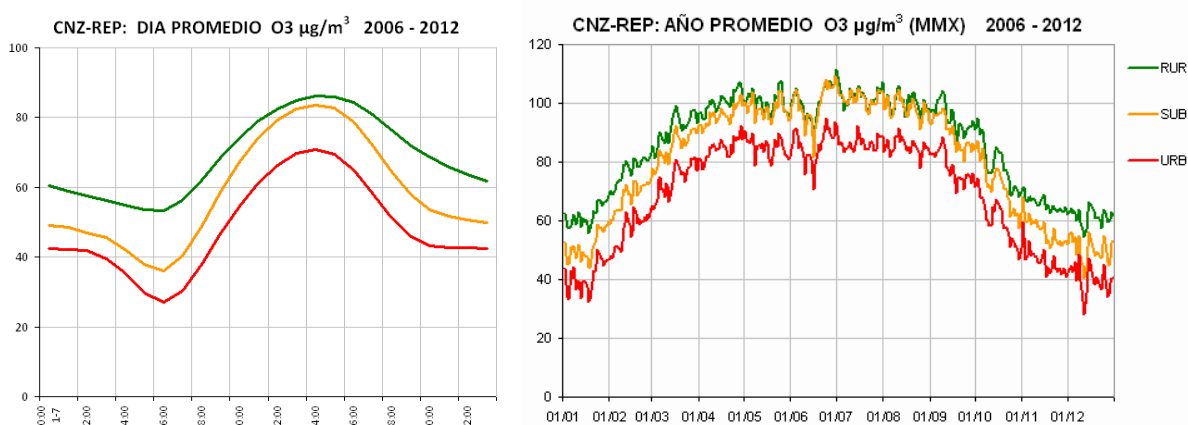


Figura 2: Perfiles promedio diario y promedio anual por tipo de área. Series calculadas para el periodo 2006-2012 a partir de un conjunto de 145 estaciones representativas de toda España. Ambos perfiles también permiten apreciar la influencia del ciclo solar en su evolución diaria y estacional, que propicia las mayores concentraciones en las horas centrales del día y en los meses centrales del año. (Fuente: CEAM, 2014)

² Los aspectos relativos a los procesos físico-químicos que afectan al ozono y explican su variabilidad espacio-temporal se explican de forma resumida en el Anexo II.

Este tiempo de residencia, del orden de horas a días en la baja troposfera y de semanas a meses en la troposfera libre, favorece fenómenos como el transporte a larga distancia³, propiciando niveles de fondo a escala hemisférica (UNECE, 2010), y su acumulación debido a la recirculación de la masa aérea durante varios días sobre una misma región, situación habitual en la cuenca mediterránea occidental en primavera y verano cuando predominan condiciones anticiclónicas (Millán M.M. et al., 1997). Estos procesos implican la existencia de una componente adicional, de origen difícilmente identificable, que se suma al ozono formado a partir de las emisiones del día por fuentes localizadas en la zona, y/o por otras fuentes respecto a las cuales la zona está a sotavento. El resultado es que de la concentración de ozono que se mide en un punto solo una parte de ella, la que se puede adjudicar a fuentes identificables, es gestionable mediante medidas de reducción de precursores a nivel local, siendo el resto solo abordable mediante medidas a escala nacional e internacional.

Así al contrario que las especies primarias (SO_2 , NO_2 , CO ...), cuyas altas concentraciones están básicamente asociadas a emisiones locales (el caso de niveles elevados de NO_2 en áreas urbanas es el más conocido), y por tanto son “gestionables” mediante medidas de reducción de emisiones a escala local, las altas concentraciones de ozono integran componentes de varias escalas espaciales. En consecuencia, las medidas locales de reducción de emisiones no garantizan una reducción de las concentraciones de ozono, puesto que estas solo afectan a la componente de producción local, y no a las otras, cuya contribución se estima significativa en diferentes zonas del planeta (Jaffe D.A., et al. 2018; Monks, 2015).

El informe de la EEA antes citado señala que en Europa apenas se han tomado medidas para la reducción de las concentraciones de ozono. Entre las razones indica que la más importante es que, debido a la naturaleza del ozono, la adopción de medidas aisladas de carácter local no es suficiente para abatir el problema, para ello se requieren acciones a escalas mayores (*“a pesar de las políticas sobre el ozono y la atención científica que ha recibido a nivel europeo e internacional, no se han implementado muchas medidas para reducir sus concentraciones y se ha dado prioridad a otros contaminantes, como PM o NO_2 . Esto podría ser debido a varias razones [...] quizás la más importante es que, debido a la naturaleza del ozono, las medidas locales por sí solas no son suficientes para abordar el problema y se necesitan acciones en diferentes niveles de gobierno, es decir, regional e internacionalmente. Esto dificulta la definición y la implementación de medidas de reducción”*).

A todo lo anterior se suma como factor indeseable añadido, debido precisamente a la química no lineal del ozono, que en determinadas condiciones (entornos bajo régimen NO_x -saturado, equivalente a ratios NO_x/VOCs elevadas, situación típica de áreas urbanas), puede ocurrir que las reducciones de precursores se traduzcan a nivel local en un incremento de los niveles de ozono. El ejemplo más conocido de ello es el llamado efecto “fin de semana”, que consiste en el incremento de ozono durante el fin de semana en las áreas urbanas debido a la reducción del tráfico (aunque sí se reducen sus concentraciones en las áreas a sotavento), como se aprecia en la figura 3. Este es un fenómeno indeseable y a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo medidas de

³ El transporte atmosférico a larga distancia es la causa por la cual la directiva 2008/50/CE establece para el ozono valores objetivo y no valores límite, más exigentes en su cumplimiento, como hace para el resto de contaminantes.

reducción. En el Anexo II se explica con algo de detalle la química del ozono y las causas de este comportamiento.

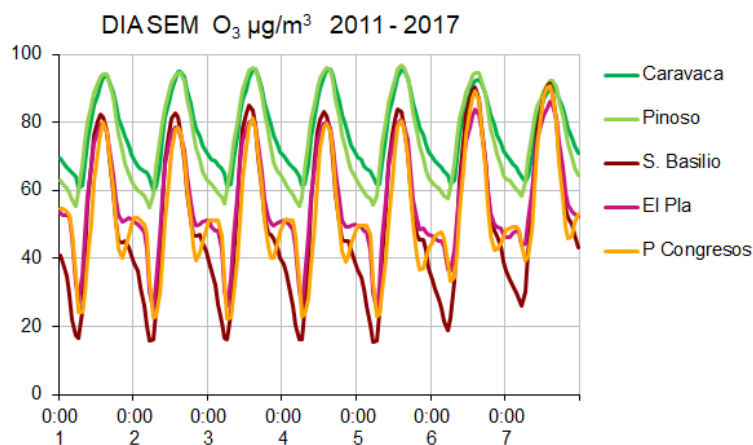


Figura 3: Perfil de la semana promedio (valores horarios) para un conjunto de estaciones urbanas (San Basilio, El Pla, Palacio de Congressos) y rurales (Caravaca y Pinoso) del sureste peninsular. Calculado con los datos del periodo 2011-2017.

De todo lo expuesto se desprende que la cuantificación de las distintas componentes (local, regional y de fondo) en un punto del territorio es un aspecto fundamental a la hora de determinar cuál es el margen de maniobra real que tienen los gestores de la calidad del aire para reducir los niveles de ozono que afectan a sus ciudades y regiones.

Los conceptos local, regional y de fondo, pueden resultar ambiguos por tratarse de conceptos relativos (en particular el tercero de ellos: para un gestor urbano el fondo será todo lo que no se genera a partir de las emisiones de su ciudad, para uno de una CCAA lo que no se genere por la propia CCAA, y para uno nacional lo que no se genere en su país⁴), y porque la frontera entre una y la siguiente en la escala no es fácil de delimitar (por ejemplo el ozono recirculado bajo condiciones anticiclónicas con predominio de brisas puede llegar a ser una mezcla de las tres). A efectos de este estudio se considera como componente local aquella que se produce debido a emisiones identificables dentro de la Región de Murcia, regional la componente asociada al aporte que pueda llegar desde los territorios colindantes y generada por emisiones en dichos territorios, y la componente de fondo sería el resto.

El análisis de los datos de las redes de calidad del aire, no permite esta cuantificación, pero sí permite en gran medida la caracterización de la dinámica del ozono, que por un lado pone de manifiesto la existencia de estas componentes, y por otro ayuda a identificar relaciones causa-efecto que permiten acotar el problema en cada zona. La cuantificación, o al menos una mejor estimación, pasa por ejercicios de modelización que este tipo de estudios previos pueden ayudar a orientar.

⁴ Desde una perspectiva internacional se podría admitir que todo ozono formado a partir de emisiones antropogénicas es gestionable, y por tanto el ozono de fondo sería aquel formado a partir de emisiones no antropogénicas.

- **Situación en España y en su litoral mediterráneo:**

En los últimos años estudios llevados a cabo por el CEAM sobre la situación del ozono a escala nacional⁵ han contribuido a caracterizar los patrones espacio-temporales de este contaminante en base a los datos históricos de las redes de calidad del aire en España (en el proyecto CONOZE se analizaron los datos del periodo 1996-2012). Las zonas más afectadas son las áreas rurales a sotavento de las grandes áreas metropolitanas (Madrid, Barcelona,...), dentro de cuencas aéreas configuradas por circulaciones de viento de mesoescala, asociadas a la orografía, que predominan entre abril y septiembre (sistemas de brisas de mar y de montaña, a menudo acopladas y/o reforzadas por bajas presiones de origen térmico en el centro peninsular, ver figura 9 del Anexo II).

Tanto la orografía, que configura estos vientos, como la distribución de las fuentes de emisión, son específicos de cada región, y en consecuencia también lo son los patrones espaciales que muestra el ozono en cada una. En el caso del litoral mediterráneo peninsular, en gran parte de este territorio la dinámica de contaminantes está determinada por dos factores: la distribución eminentemente costera de las emisiones (población, industria, grandes puertos...); y el régimen de brisas que durante el día transporta estas emisiones hacia el interior montañoso. Esta combinación tiene como consecuencia que sea precisamente en la franja interior donde habitualmente se registran los mayores niveles de ozono a distancias del orden de algunas decenas de kilómetros.

En el caso de la **Región de Murcia** este esquema se mantiene, aunque con pronunciadas peculiaridades. Por un lado, la casi perpendicularidad entre las dos líneas de costa al este y al sur de la región, y por otro, la disposición de los valles y sistemas montañosos que se alternan siguiendo ejes suroeste-noreste. Solo el valle del Segura, entre la capital y el área de Cieza, muestra una posible vía de canalización clara de las emisiones hacia el interior, pero sin continuidad hasta la costa debido a la interposición de la sierra de Carrascomy. Algo parecido ocurre a la altura de Lorca, con el valle del Luchena, más cerrado, y que tampoco tiene continuidad hacia la costa, en este caso debido a la interposición de la sierra de Almenara. En cuanto a la distribución de las emisiones, al menos las urbanas y las industriales, estas se localizan en su mayor parte tanto en el litoral (área de Cartagena-Escombreras), como en el prelitoral (área de Murcia-Alcantarilla).

La influencia de esta complejidad orográfica en la dinámica de contaminantes en la Región de Murcia requiere de un estudio específico, que analice con mayor detalle las relaciones causa-efecto que determinan los niveles de ozono en la región.

⁵ Informes “Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por ozono troposférico en España” (2009), e “Informe final Proyecto CONOZE” (2014). Este último accesible en la web del MITECO: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/idi/proyectos-investigacion/default.aspx>

2. Objetivo y actividades del estudio.

Como objetivo de los trabajos se planteó la caracterización de las condiciones atmosféricas y dispersivas que contribuyen a los niveles de ozono en la Región de Murcia, en especial aquellas que dan lugar a los niveles más elevados. En la medida de lo posible identificar las diferentes contribuciones (producción local/transporte desde áreas vecinas/ fondo) que contribuyen a estos niveles (su cuantificación no es posible mediante la metodología aplicada). Y por último, una revisión de los efectos del ozono sobre la vegetación mediterránea.

El plan de actividades propuestas para ello es el que se muestra abajo.

Tarea 1: Explotación del banco de datos

T.1.1. Pre-procesado de datos meteorológicos y de calidad del aire: los trabajos consistirán en la preparación del banco de datos para su tratamiento posterior por medio de las herramientas disponibles en el CEAM para la visualización y análisis de este tipo de información. Se incluyen en este apartado el reformateo de ficheros, el control de calidad de datos, y la generación de ficheros derivados (ficheros de diferentes promedios y ficheros de parámetros calculados a partir de las variables medidas).

T.1.2. Análisis de los datos meteorológicos y de calidad del aire: se orientará a la caracterización de los patrones de viento y de contaminantes en el territorio de la Región de Murcia, incluyendo la de los vientos dominantes, y los ciclos diarios y estacionales de contaminantes.

Tarea 2: Interpretación conjunta de los resultados

Se trata de identificar los factores que concurren en los periodos de altos niveles de ozono, atendiendo especialmente a las situaciones de superaciones de los valores establecidos por la legislación.

Tarea 3: Revisión de los efectos del O₃ sobre la vegetación mediterránea y niveles críticos

Se describirán los efectos del ozono sobre la vegetación y se revisarán los niveles críticos existentes con la finalidad de identificar los más adecuados para los tipos de cultivos y de vegetación de la región de Murcia de cara a un futuro estudio específico.

Tarea 4: Elaboración del informe de resultados

La descripción de los trabajos realizados y los resultados y conclusiones obtenidos del análisis anterior se incluirán en un informe que se remitirá a la DGCA de la RM.

En la ejecución de los trabajos no ha habido modificaciones sustanciales respecto al plan inicial previsto. Una buena parte del tiempo se ha dedicado a las tareas previas de preprocesado, adaptación de herramientas informáticas y depuración de datos. La propia naturaleza del estudio, basado en el análisis de un gran banco de datos en base a la metodología que se explica en el siguiente apartado, requiere especial dedicación a esta fase previa al análisis, que solo es posible a partir de un buen banco de datos (al menos el mejor que sea posible disponer).



II. DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA.

3. Descripción de la base de datos.

Las redes automáticas de calidad del aire son el principal instrumento establecido en la legislación (R.D. 102/2011) para la evaluación de la calidad del aire. Una red está formada por un conjunto de estaciones automáticas distribuidas por el territorio y equipadas con monitores de medida en continuo que registran la evolución de las concentraciones de los contaminantes regulados por la legislación: dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), benceno (C₆H₆), plomo (Pb), ozono (O₃), y fracción particulada de tamaño inferior a 10 y 2.5 µm (PM₁₀, PM_{2.5}). En algunos casos también registran las variables meteorológicas: Velocidad y dirección de viento, temperatura, radiación solar, humedad relativa, lluvia y presión, indispensables para la correcta interpretación de la evolución de las concentraciones de contaminantes. Toda esta información se recoge y centraliza en un servidor para su posterior procesamiento en los centros de control. Todas las redes siguen programas de mantenimiento y control de calidad para garantizar las óptimas condiciones de los equipos, y alcanzar los exigentes requisitos de captura mínima de datos (la normativa exige una cobertura temporal mínima del 90% del periodo anual).

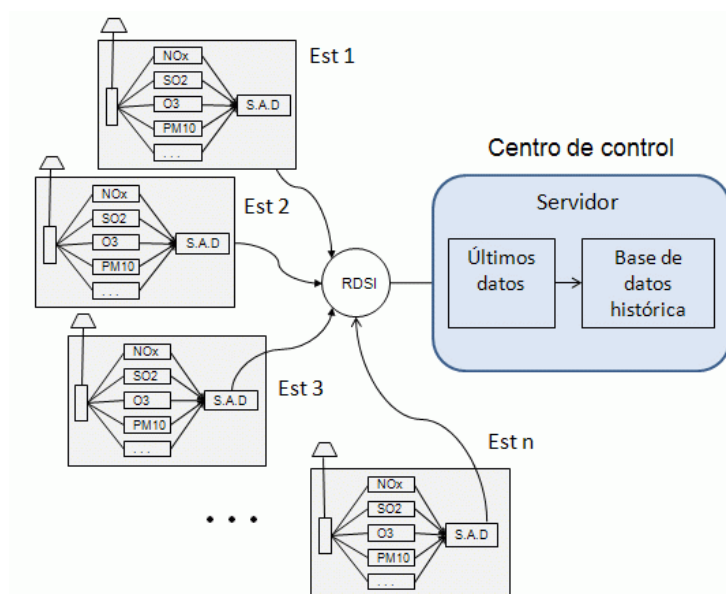


Figura 4: Esquema básico de una red automática de calidad del aire. En cada estación el sistema de adquisición de datos (S.A.D.) recoge la información registrada por los monitores y los envía por vía telefónica al servidor instalado en el centro de control.

La configuración de una red (distribución y número estaciones de medida, y monitores con los que se equipa cada una), ha de ser tal que permita evaluar la calidad del aire en el territorio a vigilar. Para ello la legislación establece criterios con los que se pretende que las medidas sean comparables entre los estados de la UE (ver Anexo I).

La **Red de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica de la Región de Murcia (RVCARM)** consta actualmente de 8 estaciones fijas. Para este estudio se han analizado los datos disponibles del periodo 2008-2018, lo cual incluye además la estación de Benizar y de 10

emplazamientos adicionales donde han operado unidades móviles (U.M.) en campañas de medida puntuales (de corta duración y con propósitos concretos).

Los datos anteriores se han **complementado con los de las estaciones de las provincias colindantes**. Esta información permite el análisis de la dinámica del ozono de la RM en su contexto geográfico, dentro del que se puede presumir una dinámica de contaminantes común, y las posibles contribuciones a los niveles de ozono desde fuera de ella, así como la de los niveles de fondo, a los que están orientadas las dos estaciones disponibles de la red EMEP (Viznar y Zarra).

A lo largo del texto y en las diferentes figuras y gráficos se hará referencia a la red de Murcia, como **RVCARM**, y a la red extendida (red de Murcia más las estaciones de las provincias limítrofes) como **RMUREX**. En algún caso se hará referencia también a la **REDEX**, para referirnos únicamente a las estaciones de las provincias limítrofes. El mapa de abajo muestra la distribución geográfica de todas las estaciones utilizadas (RMUREX), y la tabla 1 el listado de estaciones y las variables medidas en cada una.

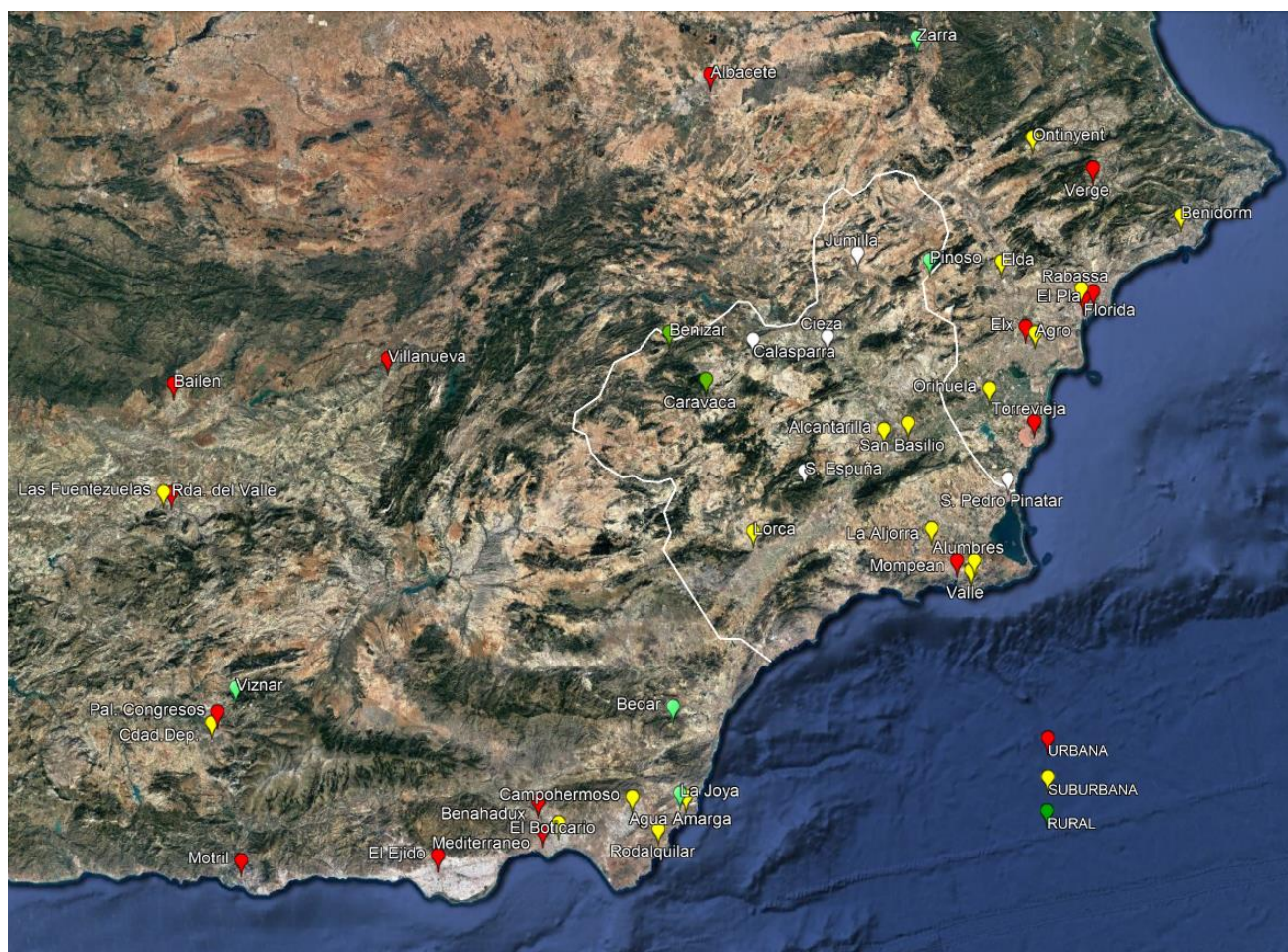


Figura 5: Distribución de estaciones utilizadas para el estudio (estaciones de las provincias de Murcia, Alicante, Albacete, Granada, Jaén, Almería, y Zarra y Onteniente en Valencia, operativas en el periodo 2008-2018). Los emplazamientos en color blanco corresponden a puntos donde se han llevado a cabo campañas puntuales con una U.M.

	CODIGO	NOMBRE	LAT.	LONGI.	ALT.	PROV.	MUNICIPIO	TIPO	SO ₂	CO	NO	NO ₂	PM10	O ₃	C ₆ H ₆	DIR	VEL	TEM	HR	RAD	PRE
1	2003001	ALBACETE	38.97928	-1.85213	686	ALBACETE	ALBACETE	URBANA	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
2	3009006	VERGE DELS LLIRIS	38.70639	-0.46694	534	ALICANTE	ALCOY	URBANA	X	X	X	X		X							
3	3014006	EL PLÁ	38.35944	-0.47194	45	ALICANTE	ALICANTE	URBANA	X	X	X	X		X	X						
4	3014008	FLORIDA-BABEL	38.34028	-0.50667	55	ALICANTE	ALICANTE	URBANA	X		X	X		X		X	X	X	X	X	
5	3014009	RABASSA	38.35111	-0.51389	20	ALICANTE	ALICANTE	SUBURB	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
6	3031002	BENIDORM	38.57139	-0.14667	44	ALICANTE	BENIDORM	SUBURB	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
7	3065006	AGROALIMENTARI	38.24222	-0.68278	44	ALICANTE	ELCHE	SUBURB	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X
8	3065007	ELX-P.BOMBERS	38.25917	-0.7175	99	ALICANTE	ELCHE	URBANA	X	X	X	X		X							
9	3066003	ELDA-LACY	38.45472	-0.80333	355	ALICANTE	ELDA	SUBURB	X		X	X	X	X				X	X		
10	3099002	ORIHUELA	38.08472	-0.85278	32	ALICANTE	ORIHUELA	SUBURB	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X
11	3105001	EL PINÓS	38.45167	-1.06472	642	ALICANTE	PINOSO	RURAL	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X
12	3133002	TORREVEJIA	37.99111	-0.69	10	ALICANTE	TORREVEJIA	URBANA	X	X	X	X		X		X	X	X	X	X	X
13	4013004	MEDITERRÁNEO	36.84133	-2.44672	51	ALMERÍA	ALMERÍA	URBANA	X	X	X	X	X	X	X						
14	4013005	EL BOTICARIO	36.86495	-2.3905	55	ALMERÍA	ALMERÍA	SUBURB			X	X		X							
15	4022001	BÉDAR	37.19342	-1.9854	380	ALMERÍA	BÉDAR	SUBURB	X		X	X	X	X							
16	4024001	BENAHADUX	36.9231	-2.46322	148	ALMERÍA	BENAHADUX	URBANA	X		X	X		X							
17	4064001	MOJÁCAR	37.1388	-1.8422	76	ALMERÍA	MOJÁCAR	RURAL	X		X	X		X							
18	4066001	AGUA AMARGA	36.9411	-1.9383	30	ALMERÍA	NÚJAR	SUBURB	X		X	X	X	X							
19	4066003	RODALQUILAR	36.84745	-2.03819	50	ALMERÍA	NÚJAR	SUBURB	X		X	X	X	X							
20	4066004	CAMPOHERMOSO	36.9369	-2.135	120	ALMERÍA	NÚJAR	SUBURB	X		X	X	X	X							
21	4066007	LA JOYA	36.9517	-1.96148	51	ALMERÍA	NÚJAR	RURAL	X	X	X	X		X							
22	4066009	LA GRANATILLA	36.9581	-2.1592	200	ALMERÍA	NÚJAR	SUBURB	X		X	X		X							
23	4902001	EL EJIDO	36.76972	-2.81097	97	ALMERÍA	EJIDO (EL)	URBANA	X	X	X	X	X	X							
24	18021001	CIUDAD DEPOR.	37.13556	-3.61925	684	GRANADA	ARMILLA	SUBURB	X	X	X	X	X	X							
25	18087010	PAL. CONGRESOS	37.16568	-3.6001	666	GRANADA	GRANADA	URBANA	X	X	X	X	X	X							
26	18140001	MOTRIL	36.74312	-3.5173	50	GRANADA	MOTRIL	URBANA	X	X	X	X	X	X							
27	18189999	VÍZNAR	37.23722	-3.53417	1230	GRANADA	VÍZNAR	RURAL	X		X	X		X		X	X	X	X	X	X
28	23010002	BAILÉN	38.09293	-3.78392	368	JAÉN	BAILÉN	URBANA	X	X	X	X	X	X							
29	23050003	RONDA DEL VALLE	37.78255	-3.78157	480	JAÉN	JAÉN	URBANA	X	X	X	X	X	X	X						
30	23050004	LAS FUENTEZUELAS	37.78444	-3.81032	376	JAÉN	JAÉN	SUBURB	X	X	X	X		X							
31	23097001	VILLANUEVA	38.1691	-3.01	692	JAÉN	VILLANUEVA ARZ.	URBANA		X	X	X	X	X							
32	30005002	ALCANTARILLA	37.97556	-1.23083	80	MURCIA	ALCANTARILLA	SUBURB	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
33	30015001	CARAVACA	38.11472	-1.86861	683	MURCIA	CARAVACA DL CRUZ	RURAL			X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
34	30016001	ALUMBRES	37.60333	-0.91333	60	MURCIA	CARTAGENA	SUBURB	X		X	X	X	X	X						
35	30016004	SAN GINÉS	37.61111	-0.98028	10	MURCIA	CARTAGENA	URBANA	X		X	X	X	X	X						
36	30016018	LA ALJORRA	37.69361	-1.06472	80	MURCIA	CARTAGENA	SUBURB	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
37	30016020	MOMPEAN	37.60306	-0.97528	10	MURCIA	CARTAGENA	URBANA	X	X	X	X	X	X							
38	30016021	VALLE	37.57444	-0.92667	10	MURCIA	CARTAGENA	SUBURB	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
39	30024002	LORCA	37.68889	-1.70111	340	MURCIA	LORCA	SUBURB	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
40	30028001	BENIZAR	38.24723	-1.99962	1158	MURCIA	MORATALLA	RURAL			X	X		X							
41	30030007	SAN BASILIO	37.99361	-1.14472	40	MURCIA	MURCIA	SUBURB	X	X	X	X	X	X				X	X		
42	46184002	ONTINYENT	38.78806	-0.69722	510	VALENCIA	ONTINYENT	SUBURB	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
43	46263999	ZARRA	39.08278	-1.10111	885	VALENCIA	ZARRA	RURAL	X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X

Tabla 1: Listado de las 43 estaciones fijas utilizadas en el estudio y de las variables disponibles en cada caso (ordenado por el código de la estación). Incluye todas las estaciones de la RVCARM (sobre fondo azul) y las de las provincias vecinas que han estado operativas en el periodo 2008-2018. Además se han recibido datos de 10 emplazamientos de la Región de Murcia, donde se han llevado a cabo campañas de medida con una U.M. (marcadores blancos en el mapa anterior, algunos no aparecen porque se superponen con otro emplazamiento).

En total se han procesado y analizado las series de **datos horarios de 53 emplazamientos**, (43 estaciones fijas más 10 emplazamientos donde ha operado la U.M. de la RVCARM), en el periodo 2008-2018. La figura 6 muestra los periodos de los que se han recibido datos de ozono para cada estación. La presencia de huecos en las series de las estaciones fijas generalmente está causada por averías que provocan que un equipo quede fuera de servicio durante algún tiempo, o por la anulación de datos en el procedimiento de validación que forma parte del sistema de control y garantía de calidad de toda red. En el caso de los emplazamientos donde se han realizado campañas con U.M. los huecos obviamente responden a la propia naturaleza puntual de las campañas. En el gráfico, igual que en la tabla anterior, se han ordenado las estaciones por su código nacional, y se han destacado en un color más oscuro las estaciones de la RVCARM.

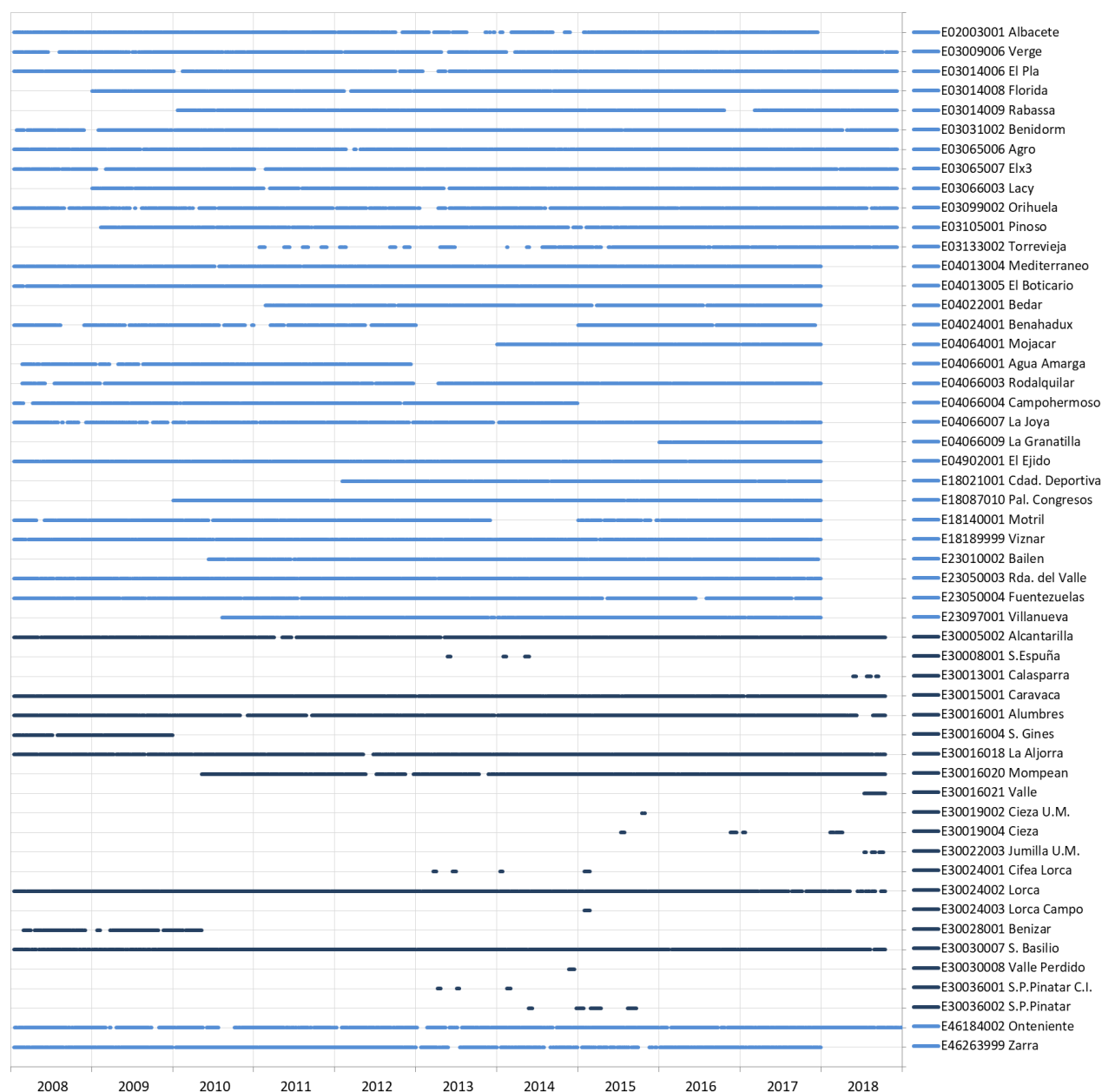


Figura 6: Periodos de datos de ozono recibidos para cada estación. En oscuro se resaltan las estaciones de la RVCARM, entre ellas se aprecia claramente cuáles son las estaciones fijas y cuales los emplazamientos en los que se han llevado a cabo campañas puntuales con la U.M. La resolución del gráfico solo permite apreciar los huecos mayores a 20 días consecutivos.

Solo de ozono la base de datos analizada cuenta con 3.022.300 datos (promedios horarios de medidas diezminutales), una cantidad equivalente a 345 años de datos horarios. Además de estos también se han procesado y analizado los datos de otros contaminantes: SO₂, NO_x, CO, PM2.5, PM10, y de variables meteorológicas: VEL, DIR, TEM, H.R. Los primeros son útiles para comprobar la consistencia del comportamiento del ozono, puesto que su evolución está vinculada con la del resto de contaminantes, especialmente con los NO_x. En cuanto a las variables meteorológicas, permiten la identificación de los vientos dominantes, y el análisis del transporte atmosférico de las emisiones, especialmente en las situaciones de elevados niveles de ozono.

Hay que decir que, como se aprecia en el gráfico anterior, no se han recibido datos de 2018 de las estaciones de Zarra, Albacete y de las de la red de Andalucía. De esta red no se han recibido tampoco datos meteorológicos (ignoramos si todas las estaciones carecen de torre meteorológica o si estos datos no se remiten). Por otra parte los datos meteorológicos de la RVCARM son registrados en casi todos los casos por torres de escasa altura (4m. aprox. en lugar de los 10-15m. recomendados). Esto provoca en general el registro de velocidades anormalmente bajas (presumimos que esta puede ser la causa).

La falta de disponibilidad de más y mejor información de las variables meteorológicas, especialmente de registros de velocidad y dirección de viento, se ha compensado en parte con datos previamente disponibles de la red de torres de AEMET para los años 2005 a 2010 que se utilizaron en el proyecto CONOZE. La figura de abajo muestra la distribución de estas torres meteorológicas.



Figura 7: Red de torres meteorológicas de AEMET cuyos datos se han utilizado para complementar los datos meteorológicos de la RVCARM.

- **Preprocesado y depuración de datos:**

La primera tarea realizada una vez recibida la base de datos consiste en el reformateo de los ficheros para adecuar su estructura a los programas desarrollados por el CEAM para su tratamiento y análisis. La figura 8 muestra a modo de ejemplo el formato final de un fichero. Posteriormente, a partir de estos ficheros se generan distintas colecciones de

ficheros derivados: ficheros de promedios diarios, de máximos y mínimos diarios, y de máximos y mínimos octohorarios, y en cada caso se generan ficheros compactados por variable (contienen los datos del conjunto de estaciones para dicha variable).

ESTACION: 01022001																	
FECHA	HORA	SO ₂	CO	O ₃	NO	NO ₂	NO _x	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₁₀	C ₆ H ₆	VEL	DIR	TEM	HR	RAD	PRE
MM/DD/AAAA	HH:MM	µg/m ³	mg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	m/s	°	°C	%	w/m ²	mb
01/01/2014	00:00	4.00	0.24	32.00	5.00	9.00	17.00	-99.99	-99.99	16.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	01:00	4.00	0.22	32.00	5.00	9.00	17.00	-99.99	-99.99	19.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	02:00	4.00	0.19	29.00	4.00	8.00	14.00	-99.99	-99.99	11.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	03:00	4.00	0.17	-99.99	4.00	8.00	14.00	-99.99	-99.99	12.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	04:00	4.00	0.19	28.00	4.00	8.00	14.00	-99.99	-99.99	13.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	05:00	4.00	0.21	27.00	4.00	8.00	14.00	-99.99	-99.99	14.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	06:00	4.00	0.22	31.00	4.00	8.00	14.00	-99.99	-99.99	14.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	07:00	4.00	0.21	29.00	4.00	7.00	13.00	-99.99	-99.99	13.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	08:00	4.00	0.23	32.00	4.00	7.00	13.00	-99.99	-99.99	17.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	09:00	4.00	0.21	39.00	4.00	6.00	12.00	-99.99	-99.99	14.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	10:00	4.00	0.21	48.00	5.00	5.00	13.00	-99.99	-99.99	11.00	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
01/01/2014	11:00	4.00	0.20	51.00	4.00	4.00	10.00	-99.99	-99.99	3.60	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99	-99.99
...																	

Figura 8: Estructura de un fichero en el formato del CEAM. Contiene un registro por hora con todos los parámetros medidos en la estación. La base horaria es UTC⁶ y la hora asignada es la del comienzo del intervalo horario. El valor -99.99 se utiliza para el relleno de huecos (debido a la falta de medidas o a la anulación posterior de estas en el procedimiento de validación)

Una vez generada la base de datos en los formatos adecuados se han examinado y depurado todas las series temporales. La existencia de datos erróneos es inherente a cualquier red de estas características. No es infrecuente que ocasionalmente se registren datos erróneos, y que estos no lleguen a ser filtrados en alguna fase del proceso de obtención y almacenamiento de datos. La depuración o validación de datos consiste básicamente en identificar y filtrar medidas erróneas, no representativas de las condiciones reales, antes de que éstas sean empleadas para la evaluación de la calidad del aire, o explotadas para otras finalidades como la validación de los resultados de modelos de calidad del aire, el análisis de la dinámica de contaminantes, el estudio de tendencias, etc.

La depuración que se ha llevado a cabo se basa en el procedimiento utilizado por el CEAM para la validación de los datos de la Red de Calidad del Aire de la Comunidad Valenciana, desarrollado y optimizado a lo largo de más de 20 años de experiencia (CEAM, 2010). Básicamente el procedimiento consiste en examinar las series temporales por medio de herramientas gráficas que permiten analizar su coherencia espacial y temporal, e identificar las inconsistencias en su comportamiento y su evolución. Esta labor requiere personal experto con conocimientos de la dinámica de contaminantes y capacidad de interpretación de los datos.

En el anexo III se incluye una tabla con los periodos de datos de ozono de la RVCARM invalidados para este estudio. También se justifica en el mismo anexo porque se han corregido los datos de ozono de la estación de Lorca entre agosto de 2009 y enero de 2014.

Hay que señalar que abordar un análisis como el planteado en este estudio sin una depuración previa no conllevaría necesariamente unos resultados finales cuestionables en su conjunto. Pero en algunos casos concretos sí podría traducirse en interpretaciones

⁶ UTC: Universal Time Coordinated (hora local: UTC+1 horario de invierno, UTC+2 horario de verano)

erróneas. La metodología aplicada se basa en gran parte en el análisis de patrones obtenidos a partir de datos promediados (ej., ciclos promedio diario, semanal, estacional), a los que se trasladan los comportamientos que sigue el ozono para los procesos más recurrentes. La presencia de un número significativo de datos erróneos en una serie temporal puede llegar a alterar el perfil de estos ciclos, y dificultar o incluso confundir en esta caracterización.

4. Metodología.

La metodología se basa en la explotación de las series de datos históricos de contaminantes y variables meteorológicas de la RVCARM. Ambos tipos de datos, meteorológicos y de calidad del aire, son igualmente importantes, pues es su análisis conjunto el que permite establecer algún tipo de relación causa-efecto que explique los patrones espacio-temporales del ozono en la región. El esquema de la figura 9 muestra las fases y los elementos principales de esta metodología.

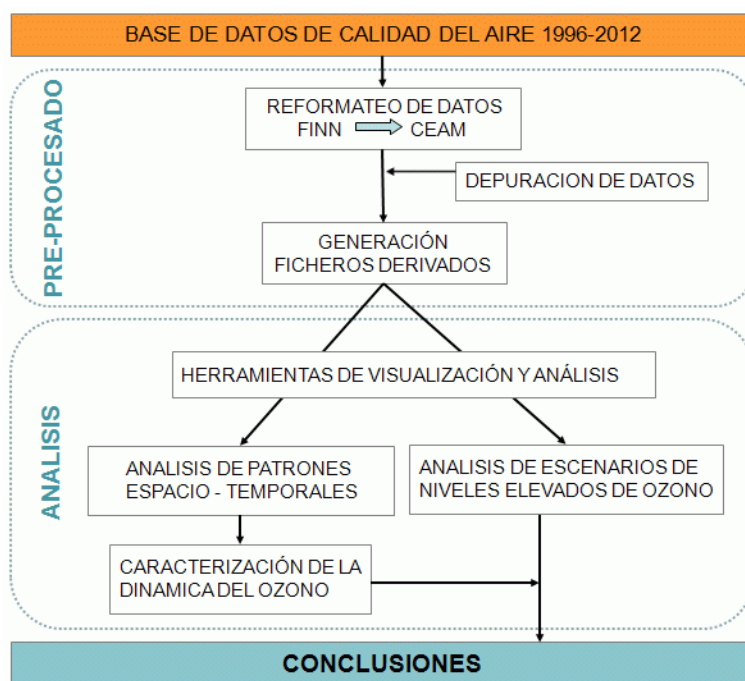


Figura 9: Esquema de la metodología aplicada (Fuente: CEAM, informe CONOZE)

Este enfoque requiere un conocimiento previo de la dinámica de contaminantes y el uso de herramientas adecuadas de visualización y tratamiento de datos. Y por supuesto es fundamental contar con una buena base de datos, que permita analizar los vientos predominantes en diferentes puntos y la continuidad entre ellos, así como los patrones espacio-temporales de contaminantes en una cantidad suficiente y bien distribuida de emplazamientos de medida. El alcance de los resultados dependerá en gran medida de la cobertura espacio-temporal de la base de datos históricos, y de la calidad de estos datos. Así mismo se requiere analizar la influencia de las emisiones de precursores que puedan

afectar a los niveles de ozono, tanto las procedentes de focos (puntuales y extensos) ubicados en la propia región como en las vecinas.

El comportamiento del ozono muestra patrones diarios, semanales y estacionales característicos, y por otro lado responde, además de a las emisiones (distribución de fuentes, compuestos emitidos, tasas de emisión,...), a la posición respecto de estas fuentes (sotavento, barlovento, distancia...), y factores climáticos, meteorológicos, y orográficos, todos ellos íntimamente relacionados con la posición geográfica. El procedimiento y las herramientas utilizadas posibilitan la interpretación de la evolución de las concentraciones de ozono en cada punto en las diferentes escalas temporales, y posibilita igualmente el análisis de los gradientes espaciales y de las diferencias geográficas que muestran las concentraciones en todo el territorio.

Para ello se requiere que los datos tengan una cobertura y resolución espacio-temporal suficiente para alcanzar el objetivo perseguido. En este estudio se han analizado las series de promedios horarios de los once últimos años (2008-2018). El periodo mínimo de 10 años es necesario para garantizar la representatividad temporal de los datos, así como para el análisis de la posible influencia de factores como las tendencias en las emisiones en la última década.

- **Herramientas de análisis de datos:**

El análisis de los datos requiere herramientas de cálculo y visualización ágiles y flexibles para posibilitar el examen de la evolución de las variables medidas en las ventanas temporales adecuadas. La estructura de la base de datos reformateada y el software utilizado permiten alternar el tratamiento conjunto de todas las variables medidas en una estación seleccionada, de manera que se puedan analizar las correlaciones entre ellas, con el tratamiento conjunto de todas las series del parámetro seleccionado para el conjunto de estaciones disponibles o un subconjunto de estas. Todo ello con la posibilidad de trabajar en diferentes ventanas temporales para identificar los patrones relacionados con las diferentes escalas de tiempo. Las figuras 10 a 13 muestran el aspecto de algunas de las herramientas de análisis y visualización desarrolladas específicamente por el CEAM para este tipo de análisis de datos.

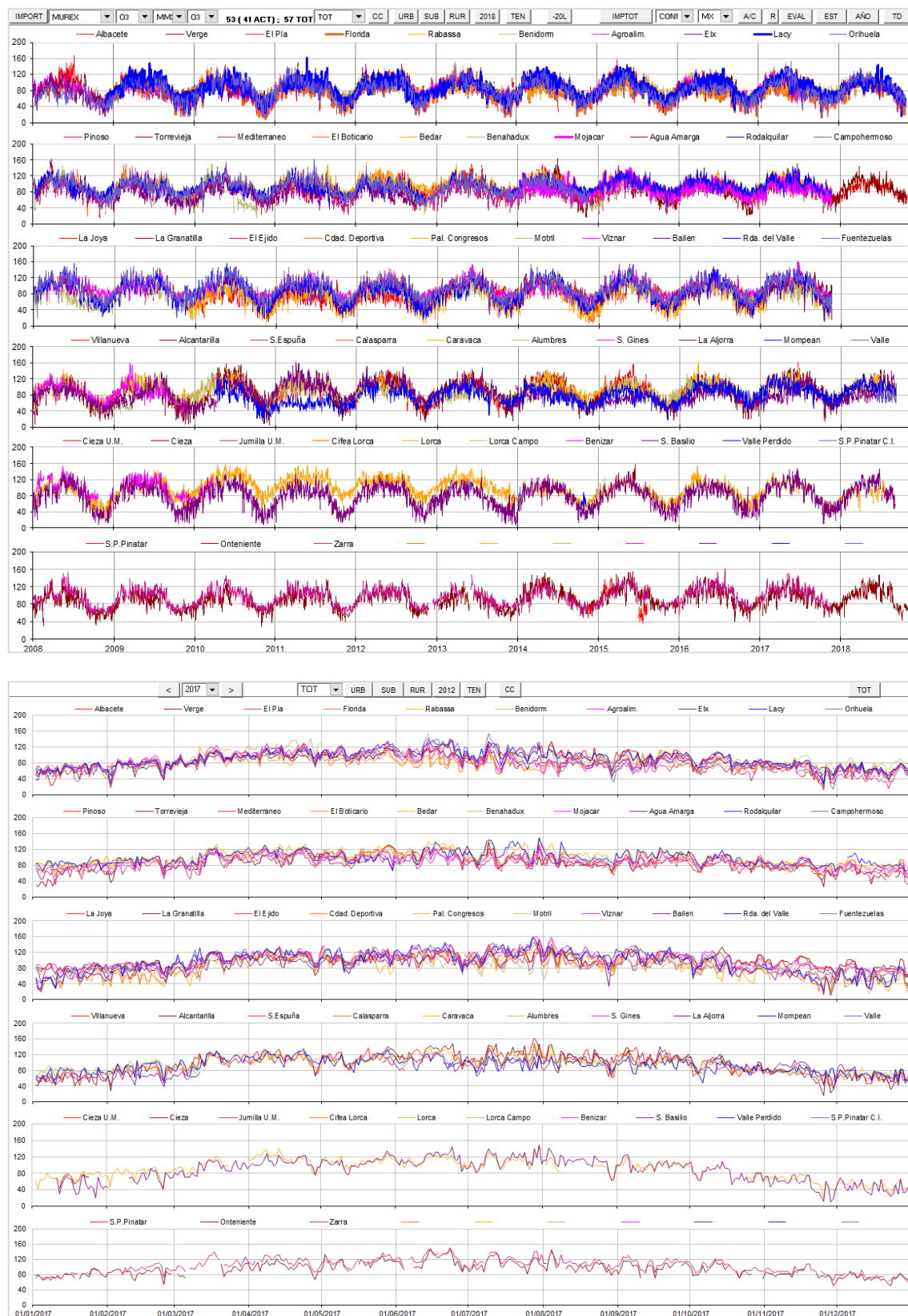


Figura 10: (Arriba) Series históricas de los máximos octohorarios diarios del periodo 2008 de ozono en todas las estaciones de la RMUREX. (Abajo) Misma información para un año seleccionado. Los botones de comando permiten elegir las opciones. En ambos casos se muestran los datos originales, sin depurar.

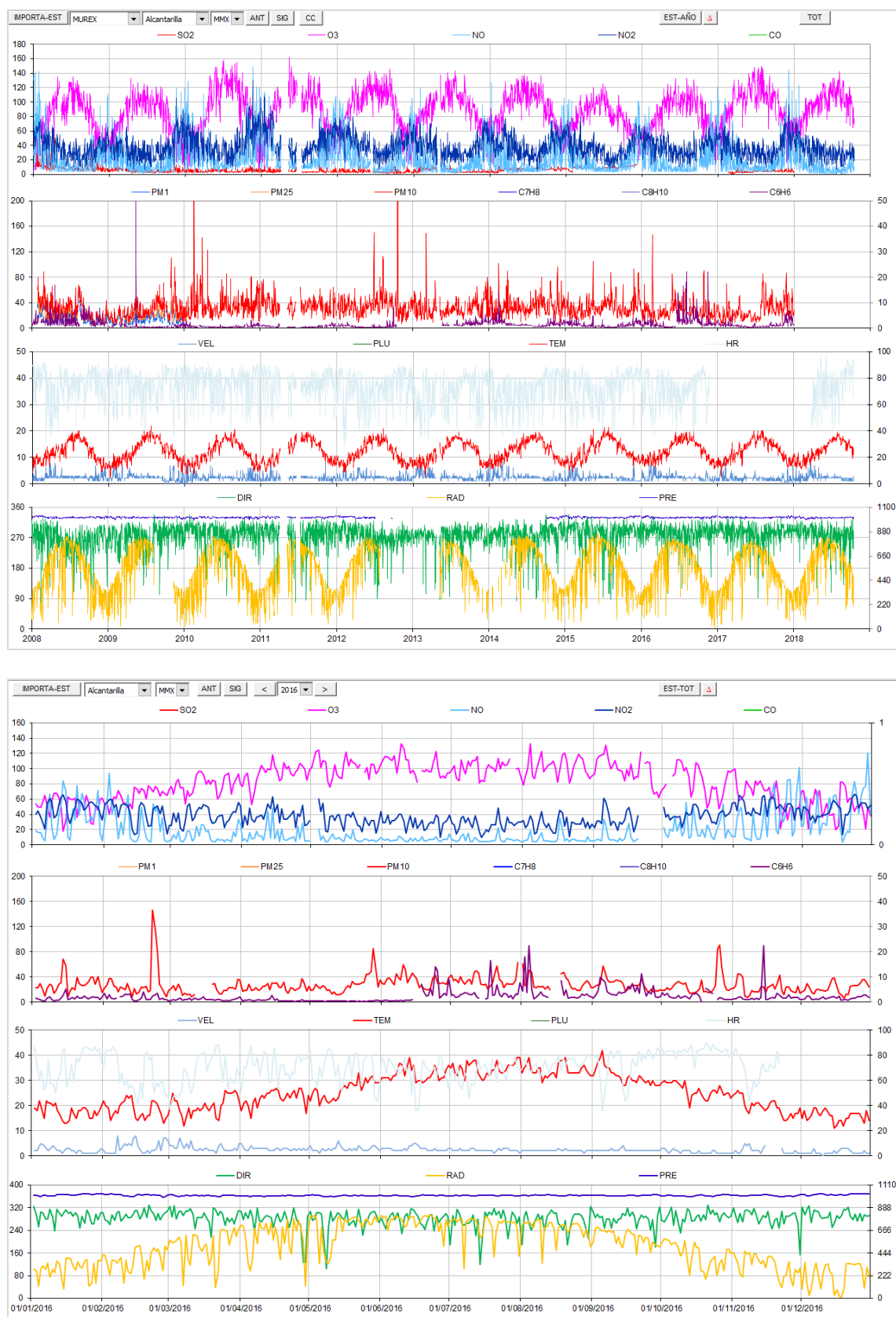


Figura 11: (Arriba) Series históricas de los promedios diarios del periodo 2008-2018 de todos los parámetros medidos en la estación seleccionada. (Abajo) Misma información para un año seleccionado.

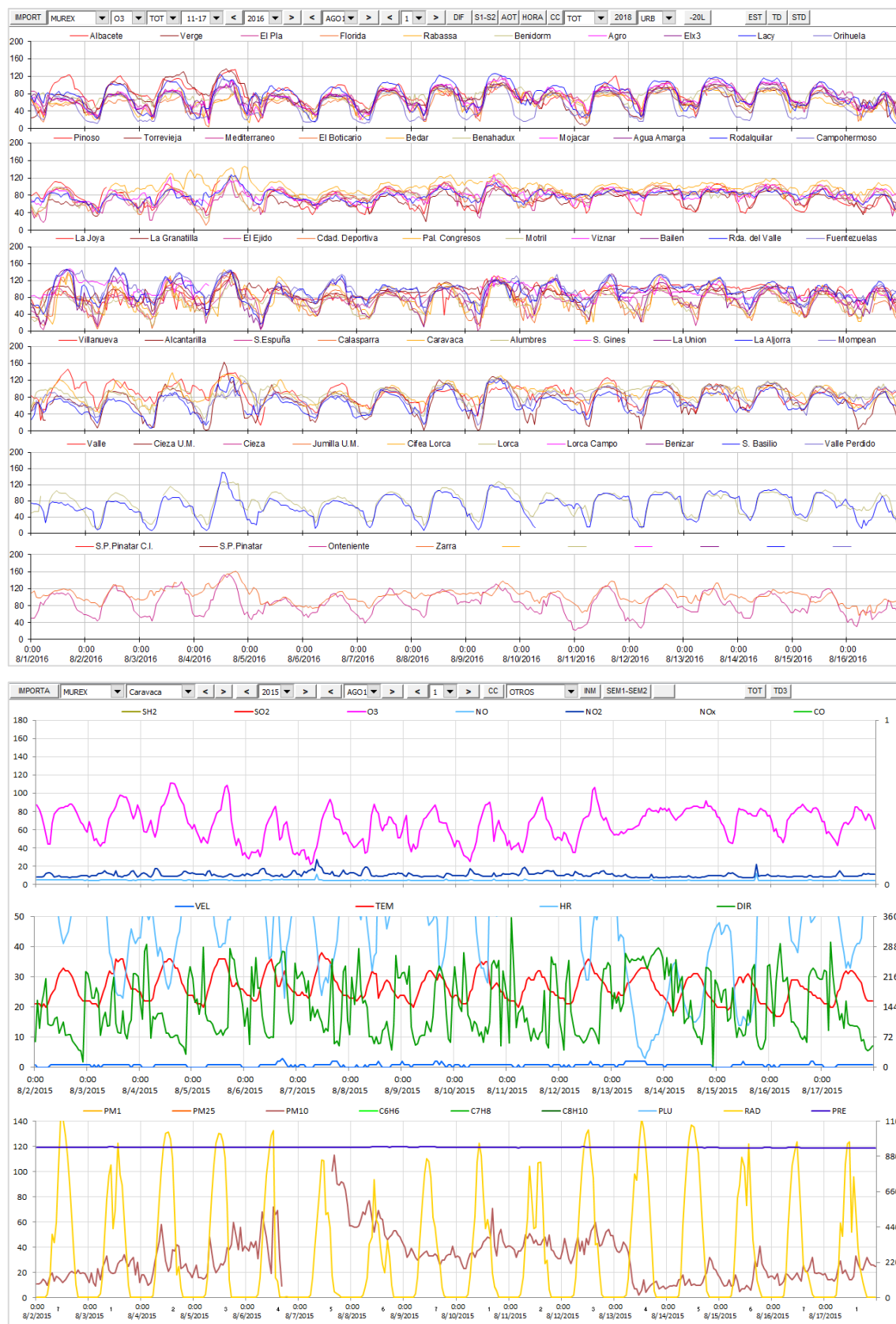


Figura 12: (Arriba) Promedios horarios de ozono en un periodo de 16 días en todas las estaciones de la RMUREX. (Abajo) Promedios horarios de todos los parámetros medidos en una estación seleccionada. Ambas formas de visualización de promedios horarios son las que mayor información aportan para la interpretación del comportamiento de un contaminante en un punto.

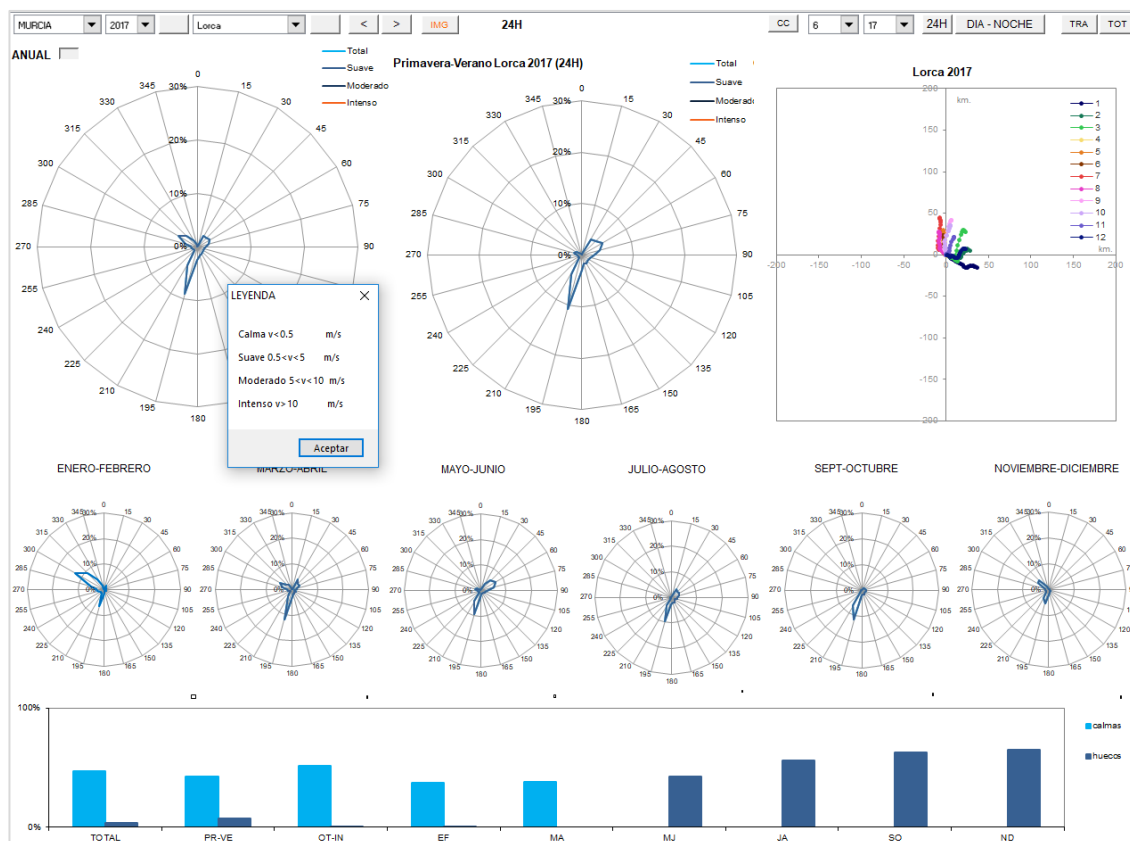


Figura 13: Para la representación de los datos meteorológicos se utiliza también un programa de cálculo y visualización de las rosas de viento (totales, estacionales, y bimensuales, y en cada caso de las 24h o de la ventana horaria seleccionada). El programa representa también la composición vectorial de los datos de viento para cada mes del año (composición vectorial del día promedio mensual: se promedian todos los vectores de velocidad del mes correspondientes a la misma hora, y luego se hace la composición vectorial de los 24 vectores obtenidos). No equivale a una trayectoria porque se calcula a partir de los datos de un punto, pero su análisis conjunto con los resultados de torres vecinas (si se dispone de ellas en los puntos apropiados), y teniendo en cuenta el efecto de la orografía, permite establecer la continuidad de las circulaciones de viento en un territorio.

• **Otras herramientas:** En el apartado de herramientas de análisis hay que añadir el uso intensivo que se ha hecho de las herramientas Google Eath y Street View de Google. Este software basado en fotografía aérea y a nivel de calle se ha utilizado para ubicar todas las estaciones automáticas, y ha permitido examinar las condiciones del entorno en cada una de ellas (distancia al tráfico, tipo de vía, presencia de pantallas o vegetación que puedan afectar a los registros, posición y distancia respecto de grandes áreas de emisión, condicionantes orográficos que actúan sobre las circulaciones de viento, altitud, etc.). Este conocimiento es fundamental en la interpretación de las series temporales de contaminantes y de variables meteorológicas, ya que la posición geográfica, y todos los aspectos asociados a ella influyen decisivamente su evolución.

III. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

5. Análisis de los datos de ozono en la Región de Murcia.

5.1. Estadísticos y patrones espacio-temporales.

Empezando por una visión general tomamos como punto de partida los resultados de los estadísticos principales y los perfiles diarios promedio mostrados en las figuras 14 y 15. La primera de ellas muestra varios estadísticos representativos de los niveles de ozono registrados en cada estación de la RMUREX (Percentiles 1, 25, 75 y 99, mínimo, máximo y promedio, calculados a partir de los promedios horarios del periodo 2011-2017⁷).

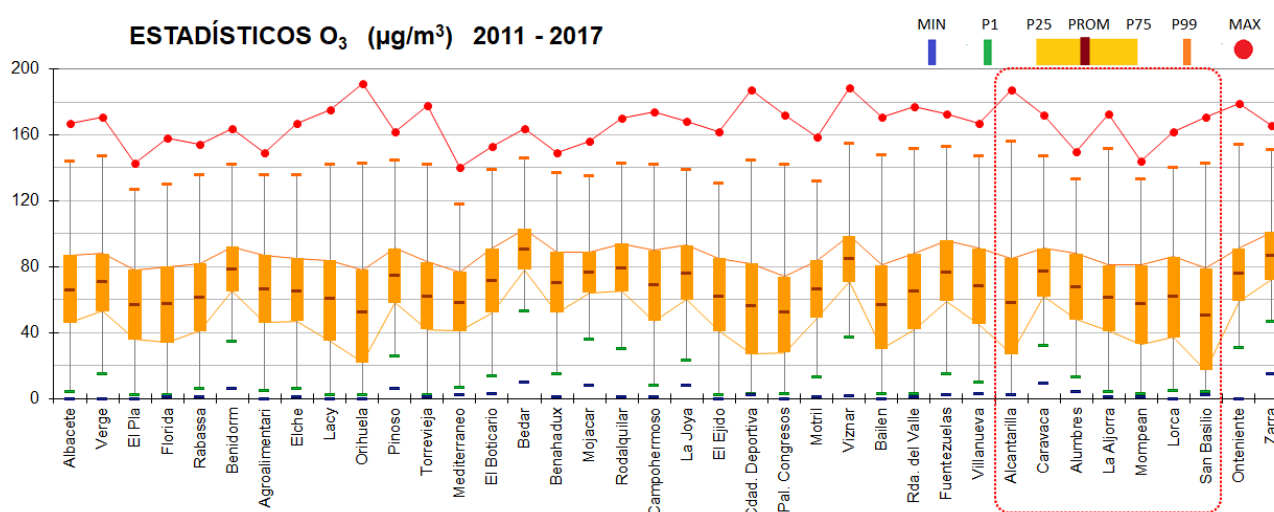


Figura 14: Estadísticos principales de las estaciones de la RMUREX en el periodo 2011-2017. Calculados a partir de los promedios horarios (solo estaciones con al menos el 50% de datos en todo el periodo)

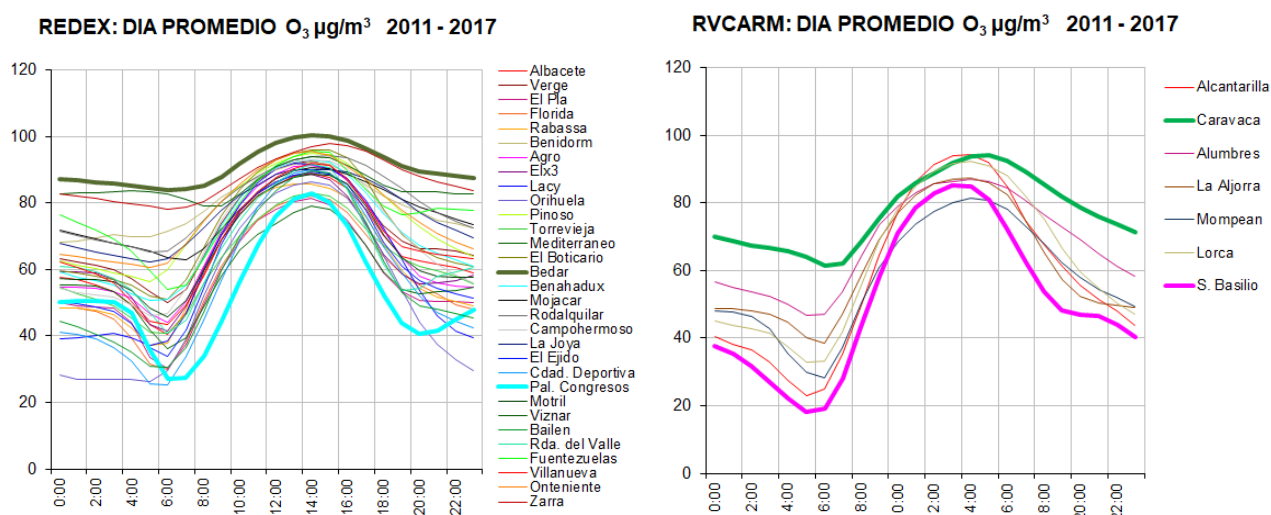


Figura 15: Perfiles diarios promedio de las estaciones de la REDEX y RVCARM calculados a partir de los promedios horarios del periodo 2011-2017 (hora UTC)

⁷ El periodo 2011-2017 es el que permite obtener resultados más comparables (muchas estaciones no se dan de alta hasta avanzado 2010, y por otra parte no se han recibido datos de 2018 de la red de Andalucía, de Albacete y de Zarra, ver figura 6).

Los estadísticos de las estaciones de la RVCARM se encuentran en rangos similares a los de las estaciones de las provincias colindantes. Alcantarilla y San Basilio destacan por la amplitud del intervalo P_{25} - P_{75} (entre estos dos percentiles se encuentra el 50% de los valores de una muestra). Esta amplitud se debe más al valor relativamente bajo del P_{25} que al del P_{75} , y refleja la abundancia de concentraciones bajas, especialmente durante la noche y primera hora de la mañana, como se aprecia en los correspondientes perfiles diarios (similar a Pal. Congressos, Granada). Estos valores mínimos se explican por la cercanía de estos emplazamientos al tráfico. Por su parte Caravaca muestra una amplitud mucho menor y valores más altos para el mismo intervalo, a causa de su posición en una cota elevada, alejada del tráfico y con menor posibilidad de deposición de ozono sobre el terreno (similar a Bedar, Almería). En cuanto a los valores del P_{99} (más representativo que el valor máximo), el de Alcantarilla se encuentra entre los más altos, similar a Viznar (Granada), y ligeramente por encima de Ronda del Valle y Fuentezuelas (Jaén) y de La Aljorra y Onteniente (en Murcia y Valencia respectivamente). Aunque este valor no destaca significativamente por encima del resto, sí nos indica que Alcantarilla registra con relativa frecuencia niveles más elevados que el resto de emplazamientos. De hecho es una de las cuatro estaciones que han registrado máximos por encima del Umbral de Información ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio horario) en el periodo 2011-2017.

Abundando en los patrones temporales, la figura 16 muestra la evolución anual del perfil del día promedio en las estaciones de la RMUREX. Es la misma representación de la figura 14 pero separando los valores para cada mes, de enero a diciembre. Todas las series muestran una estacionalidad muy marcada, con los valores máximos en los meses centrales del año y los más bajos en los de invierno, como corresponde a un compuesto cuya formación está asociada a la incidencia de la radiación solar. Las estaciones de la RVCARM se encuentran dentro del rango de perfiles del conjunto, aunque se aprecia que los máximos de Alcantarilla, especialmente entre mayo y septiembre, destacan en la parte alta de ese rango junto con otras como Onteniente, Zarra, Bedar, Viznar o Fuentezuelas.

RMUREX: DIA PROMEDIO MES A MES O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 2011-2017

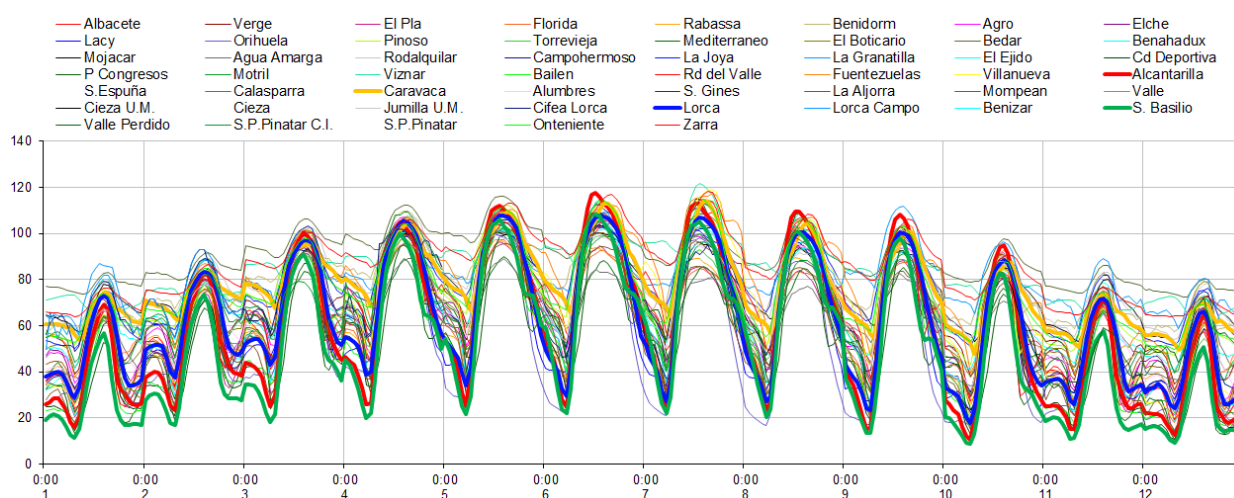


Figura 16: Evolución de los perfiles diario promedio de ozono mes a mes para las estaciones de la RMUREX. Calculados en base a los datos horarios del periodo 2011-2017. Algunas estaciones de la RVCARM se han destacado con una línea más gruesa.

Es interesante destacar en la figura anterior que los niveles máximos de primavera y verano se encuentran en varias estaciones muy cercanos al valor objetivo de protección a la salud ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Esto significa que el número de superaciones de este valor objetivo depende mucho del número de situaciones favorables a la formación y acumulación de ozono que se puedan dar en el año. Y esto depende a su vez de variaciones en los factores que determinan las concentraciones de ozono, emisiones y condiciones meteorológicas fundamentalmente. De la descripción de las condiciones que caracterizan los niveles elevados de ozono en la RM nos ocupamos en el siguiente apartado.

Siguiendo con la visión global el gráfico de la figura 17 con los perfiles del año promedio integrados para todas las estaciones de la RVCARM y la REDEX por separado, apenas muestra diferencias entre ambas series. Estos perfiles, calculados a partir de los máximos diarios de los promedios octohorarios, aunque enmascaran las diferencias entre estaciones concretas (que sí se pueden apreciar en las anteriores figuras 15 y 16), muestran que, en general, los niveles máximos promediados para toda la Región de Murcia son similares a lo largo de todo el año a los promediados para el resto del territorio del sureste peninsular.

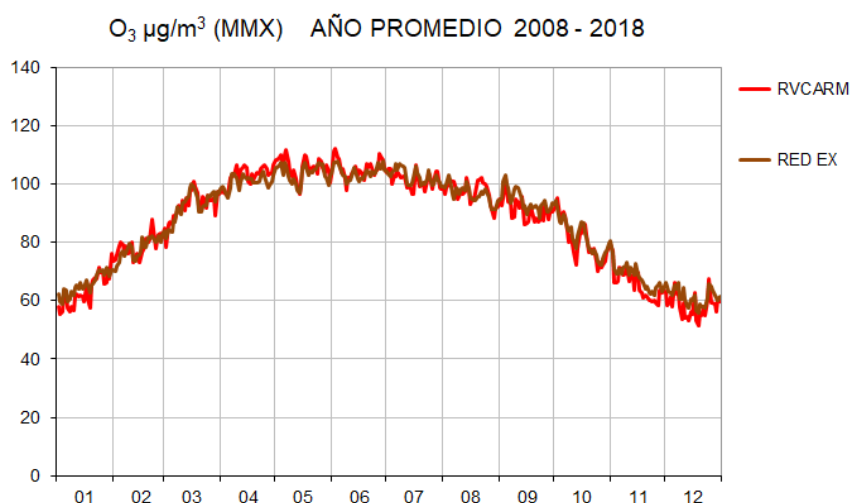


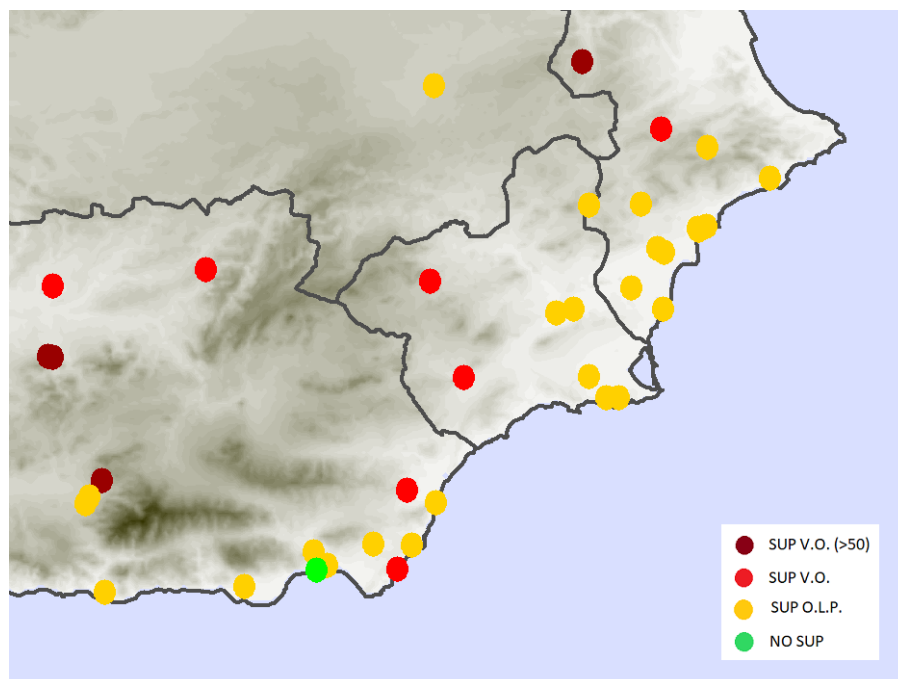
Figura 17: Comparación de los perfiles anuales promedio de ozono de la RVCARM y la “red externa” (integrando en cada caso todas las estaciones del grupo). Calculados a partir de los máximos octohorarios diarios del periodo 2008-2018

En términos de superaciones del valor objetivo los mapas de la figura 18 y los gráficos de la figura 19 ilustran una situación similar en sus patrones espacio-temporales. Los mapas muestran la distribución de superaciones de los valores objetivo (V.O.) y Objetivo a Largo Plazo (O.L.P.) para la protección de la salud humana (PSH) y de la vegetación (PV). Los resultados corresponden al año 2017, último año del periodo en que se dispone de datos de todas las estaciones. El V.O. P.S.H. se supera en varias estaciones del interior y prelitoral, en alguno de los casos (Zarra, Viznar, Fuentezuelas y Rda. del Valle) con más de 50 superaciones como promedio de 2015-2017⁸. En la costa predominan las estaciones que no superan el V.O., pero sí el O.L.P. En la RVCARM son Lorca y Caravaca las que superan el V.O., y aunque no en 2017 también Alcantarilla lo supera con frecuencia (de

⁸ El criterio para el cumplimiento del V.O. P.S.H. ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el máximo diario del promedio de 8h) es que no se deben exceder las 25 superaciones como promedio de los 3 últimos años. Y para el V.O. P.V. no superar los $18000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la AOT40 como promedio de los 5 años anteriores (ver anexo I).

hecho con los datos disponibles lo hará en la evaluación de 2018 con 31 superaciones de promedio para el periodo 2016-2018).

Protección a la Salud Humana (2017)



Protección a la Vegetación (2017)

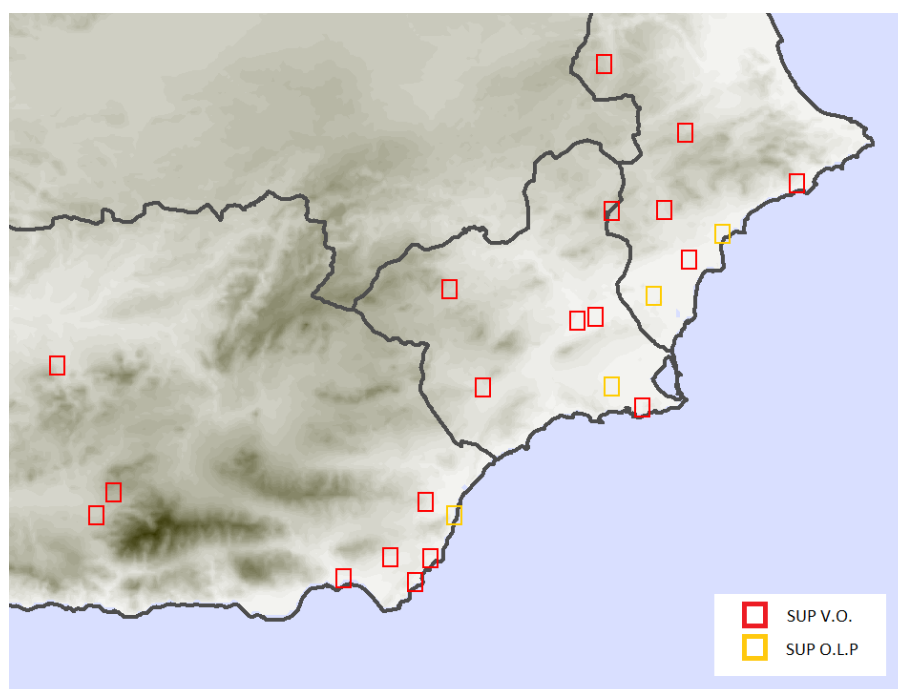


Figura 18: (Arriba) Distribución de superaciones del V.O. y O.L.P de Protección a la Salud. (Abajo) Distribución de superaciones del V.O. y O.L.P de Protección a la Vegetación (solo estaciones rurales y suburbanas, ya que las estaciones urbanas no son hábiles para la vigilancia de la vegetación).

Los gráficos de la figura 19, con la distribución mensual de las superaciones del V.O., muestran básicamente el mismo comportamiento estacional en la RVCARM y en la REDEX, con el mayor número de superaciones en los meses centrales del año.

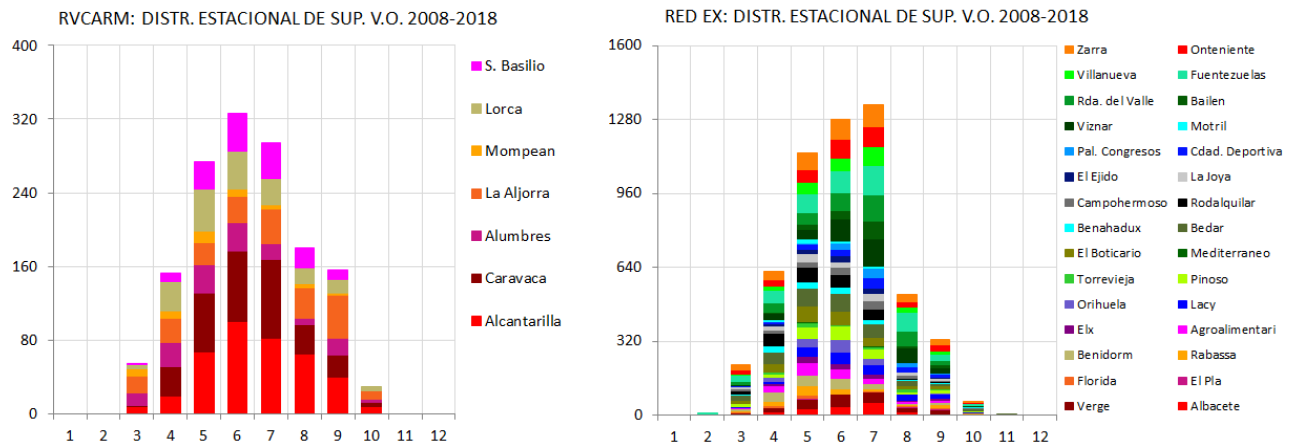


Figura 19: Distribución estacional (enero-diciembre) de superaciones del Valor Objetivo los dos grupos.

Si analizamos la evolución interanual de las superaciones (figura 20) vemos que, aunque con diferencias importantes, abundan las estaciones en el rango de 20-60 superaciones anuales en ambas redes. Las variaciones interanuales se deben como se ha apuntado anteriormente fundamentalmente a variaciones meteorológicas. En la RVCARM Alcantarilla y Caravaca son las estaciones que registran el mayor número de ellas (también Benizar, que dejó de operar en 2010). Y llaman la atención el escaso número de superaciones en 2015 (no se observa lo mismo en la REDEX), y las 93 superaciones de Alcantarilla en 2010, sobre un promedio de 35 para el periodo completo 2008-2018.

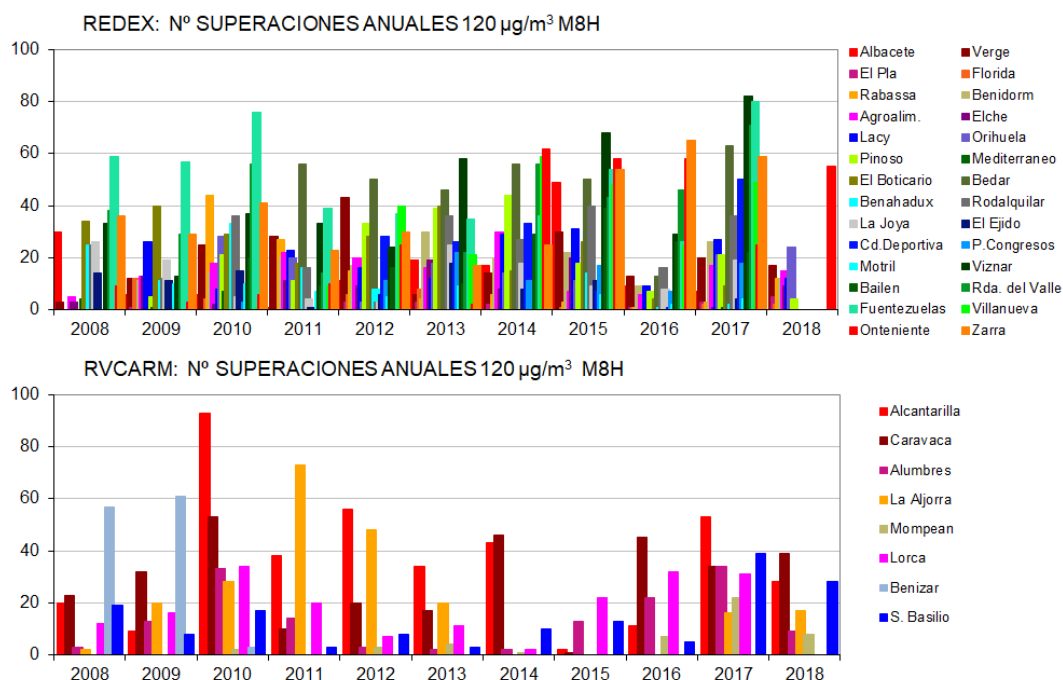


Figura 20: Número anual de superaciones del V.O. P.S.H en los dos grupos en el periodo 2008-2018 (excepto Benizar, solo estaciones con al menos 5 años de datos y operativas en la actualidad).

Por último, las situaciones episódicas de superación del Umbral de Información (establecido en $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio horario) son muy escasas en toda la RMUREX. La figura de abajo muestra que estas no se dan todos los años, y cuando se han registrado ha ocurrido en una sola ocasión (excepto en 2008, con 2 superaciones en San Basilio). Estas cifras están muy alejadas de las que se dan en las áreas de España más afectadas por estos episodios (sotavento de Madrid y Barcelona, donde habitualmente se registran 6 o más superaciones por año).

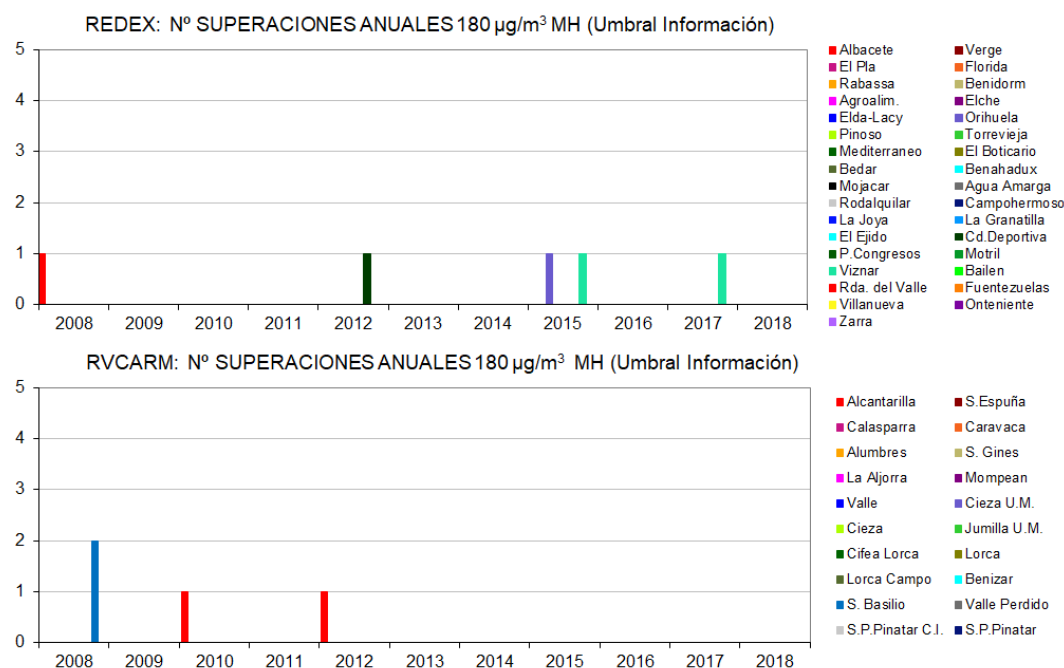


Figura 21: Número anual de superaciones del Umbral de Información (referencia legal para situaciones episódicas de altas concentraciones) en los dos grupos en el periodo 2008-2018.

Estos resultados globales permiten apreciar que los niveles de ozono la Región de Murcia no difieren significativamente de los que se registran en todo el sureste peninsular. El perfil anual promedio de las concentraciones es similar para la RVCARM y la REDEX, y el perfil diario promedio es también similar entre estaciones que se localizan en entornos similares. La influencia de emisiones cercanas, la posición a sotavento de grandes áreas de emisión, y la altitud del emplazamiento son los factores que marcan las diferencias en estos perfiles dentro de todo el territorio abarcado por la RMUREX. En términos de superaciones, la distribución mensual de superaciones del V.O sigue el mismo patrón en la Región de Murcia y en las provincias colindantes. Estas son habituales todos los años, y afectan más a puntos del interior o el prelitoral que a los de la franja costera. El Umbral de Información apenas se ha superado en alguna ocasión, y no todos los años. La RVCARM en particular no registra superaciones del U.I. desde 2012 (en la estación de Alcantarilla, que igual que en 2010 registró una superación).

5.2. Análisis de la dinámica del ozono en la Región de Murcia.

En este apartado se analiza con más detalle el comportamiento de los niveles de ozono en la Región de Murcia. El análisis se centra en el periodo abril-septiembre cuando las concentraciones son más altas, y como en los apartados anteriores el análisis se hará en el contexto de la RMUREX, que incluye también las estaciones de las provincias colindantes.

5.2.1. Distribución de las emisiones.

Partimos de una distribución de emisiones urbanas e industriales⁹ concentradas en dos puntos: En Cartagena-Escombreras, con más de 200.000 hab., una importante área portuaria, y un polo industrial de primer orden (Complejo petroquímico Repsol, C.T. Escombreras, C.T.C.C. Cartagena, planta Enagas,...), y en el entorno de Murcia-Alcantarilla-Molina del Segura, que supera los 600.000 hab., y en el que abundan las industrias del sector químico, con emisiones significativas de compuestos orgánicos volátiles (Plasbel, Mivisa, Plásticos Romero, etc.). A estas se suman otras áreas urbanas dispersas de menor tamaño (Lorca, Cieza, Totana...), otros focos industriales significativos como Energyworks y Sabic en La Aljorra, y grandes vías de circulación de tráfico interurbano como la A7 y la A-30.

Fuera de la Región de Murcia pero dentro del ámbito geográfico abarcado, hay que añadir las áreas urbanas de Alicante y Elche (incluyendo la actividad del puerto y el aeropuerto de Alicante), y los focos industriales de la cementera de CEMEX en San Vicente (Alicante) y la C.T. de Carboneras en la costa de Almería.

5.2.2. Vientos dominantes

Sobre esta distribución de fuentes interesa caracterizar los vientos dominantes que ejercen el transporte atmosférico de las emisiones y sus productos secundarios como el ozono. Para ello nos valemos de los datos recibidos de las torres meteorológicas de la RVCARM, y de las torres de AEMET mostrados en la figura 7 (solo hasta el año 2010) que permiten complementar los de la RVCARM en puntos donde no se dispone de estación, así como disponer de datos de Andalucía, especialmente de Almería, para valorar por ejemplo la posibilidad de transporte hacia la Región de Murcia de emisiones de focos como la C.T. de Carboneras.

Las rosas de viento que se muestran en los paneles de la figura 22(a-f) se han calculado para el periodo Primavera-Verano (abril-septiembre) de un año dentro del periodo 2008-2018, no siempre el mismo por no disponer en todos los casos de suficientes datos para el cálculo. Aunque no se muestran por considerarse innecesario, todas las rosas han sido calculadas para todos los años disponibles y como es de esperar, salvo falta de datos o registro de datos erróneos, se repiten con ligeras variaciones los mismos patrones.

⁹ Los focos industriales citados se encuentran en la base de datos del *European Pollutant Release and Transfer Register* (E-PRTR), con emisiones al aire de precursores de ozono cuantificadas al menos para alguno de los últimos años. En el E-PRTR constan otros focos industriales en la RM de los cuales no figuran datos y no se citan en el texto. En cualquier caso para los objetivos de este estudio no se requiere un inventario exhaustivo y actualizado de todas las emisiones, sino un conocimiento general de la distribución de los focos más importantes de emisión de precursores.

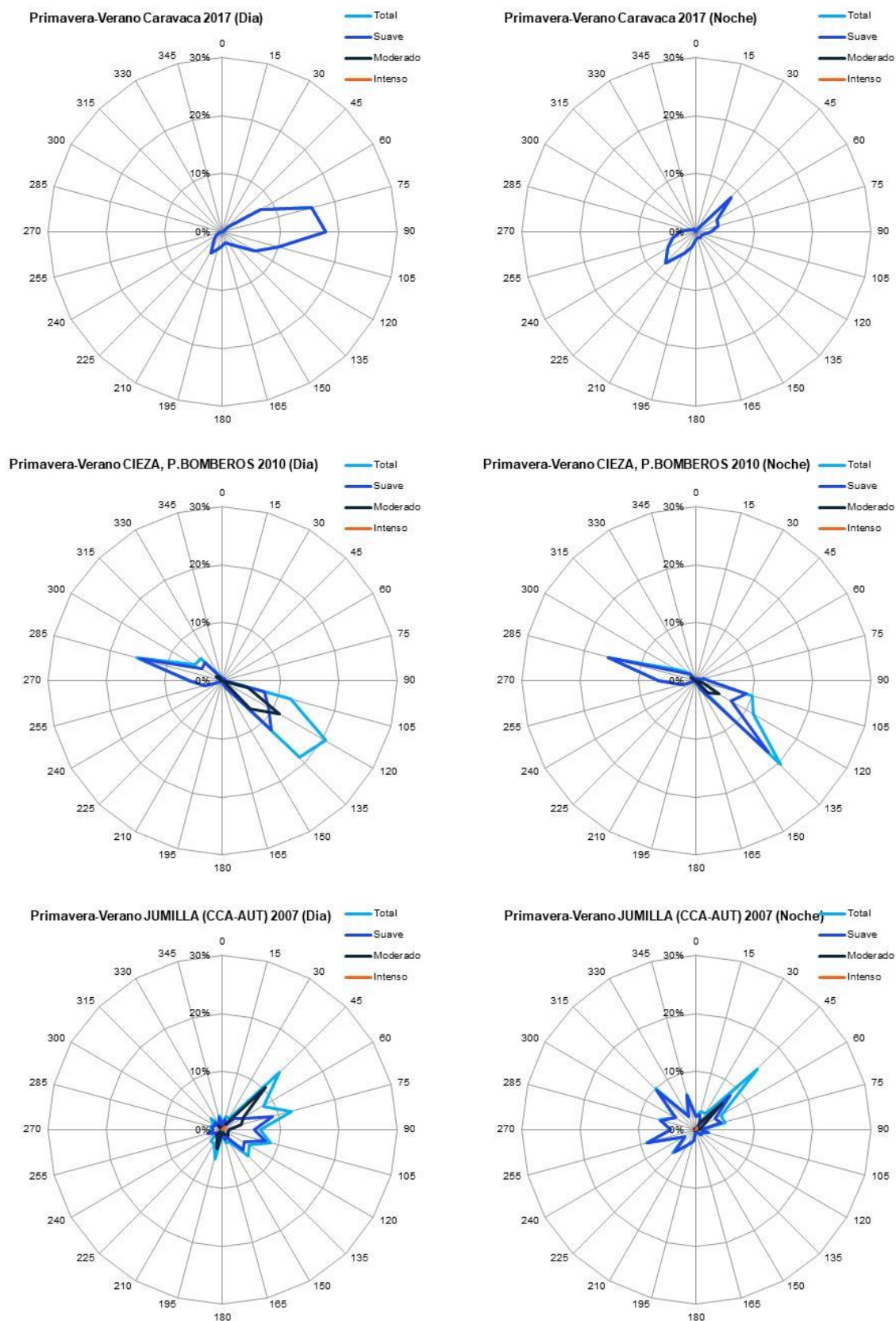


Figura 22a: Rosas de viento de primavera-verano de Caravaca, Cieza y Jumilla. A la izquierda periodo diurno (8:00-20:00h hora local), y a la derecha el periodo nocturno (20:00-8:00h hora local). Leyenda: *Total* $v > 0.5$ m/s; *Suave* $0.5 < v < 5$ m/s; *Moderado* $5 < v < 10$ m/s; *Intenso* $v > 10$ m/s.

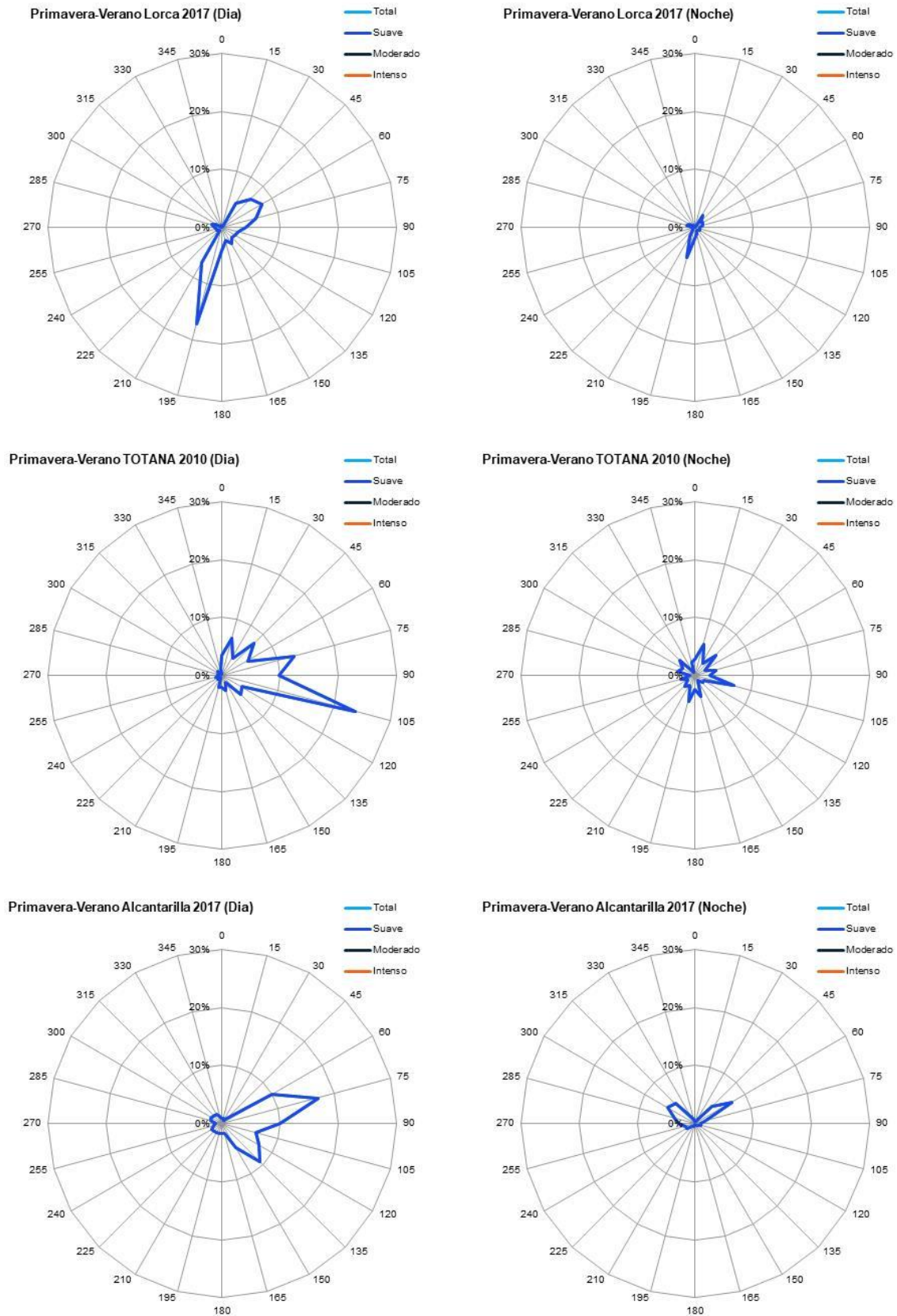


Figura 22b: Rosas de viento de primavera-verano de Lorca, Totana, y Alcantarilla. El periodo diurno abarca el intervalo 8:00-20:00 h y el nocturno 20:00-8:00 h (en hora local = UTC+2). Leyenda: *Total* $v > 0.5$ m/s; *Suave* $0.5 < v < 5$ m/s; *Moderado* $5 < v < 10$ m/s; *Intenso* $v > 10$ m/s.

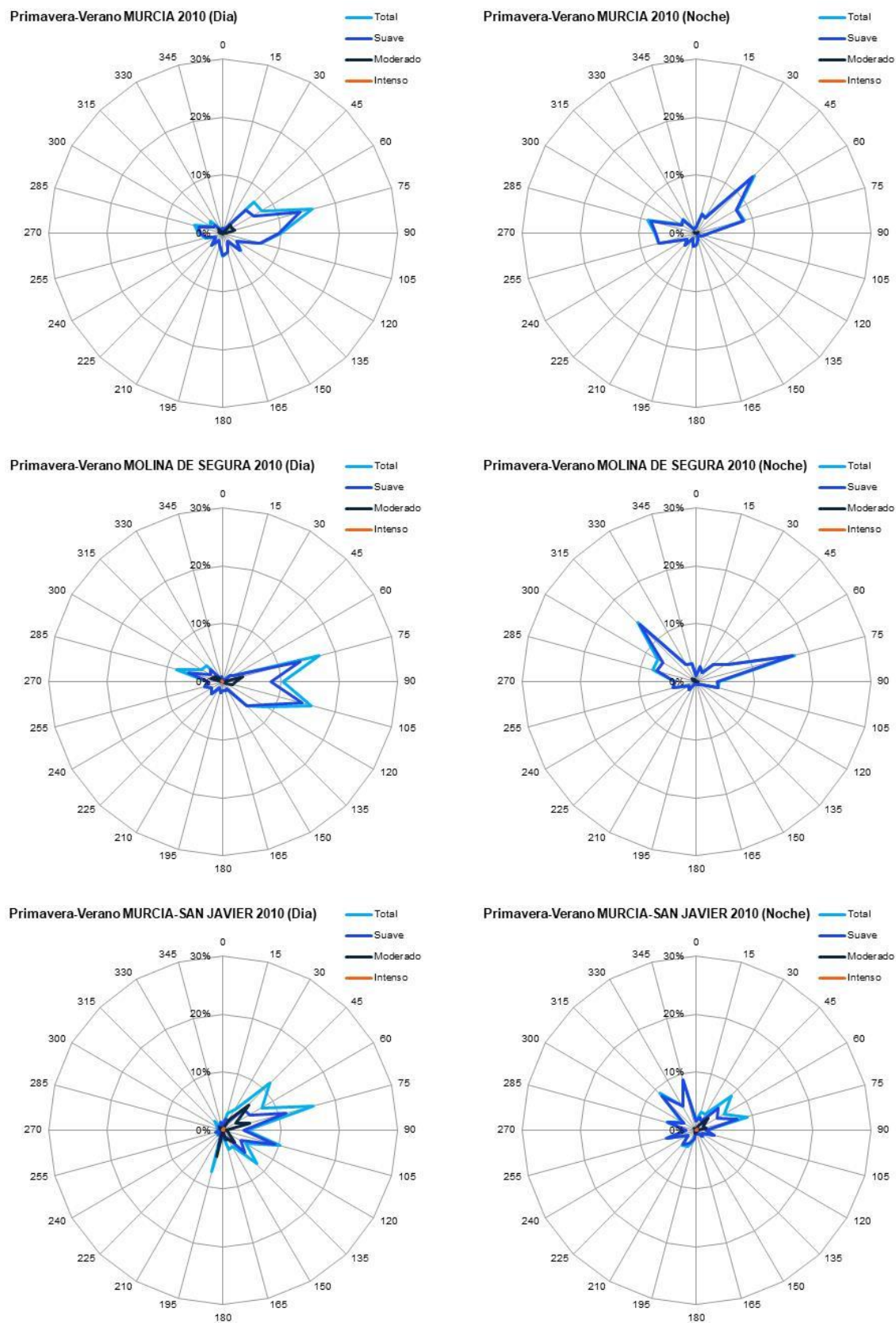


Figura 22c: Rosas de viento de primavera-verano de Murcia, Molina del Segura y San Javier. El periodo diurno abarca el intervalo 8:00-20:00 h y el nocturno 20:00-8:00 h (en hora local = UTC+2). Leyenda: *Total* $v > 0.5 \text{ m/s}$; *Suave* $0.5 < v < 5 \text{ m/s}$; *Moderado* $5 < v < 10 \text{ m/s}$; *Intenso* $v > 10 \text{ m/s}$.

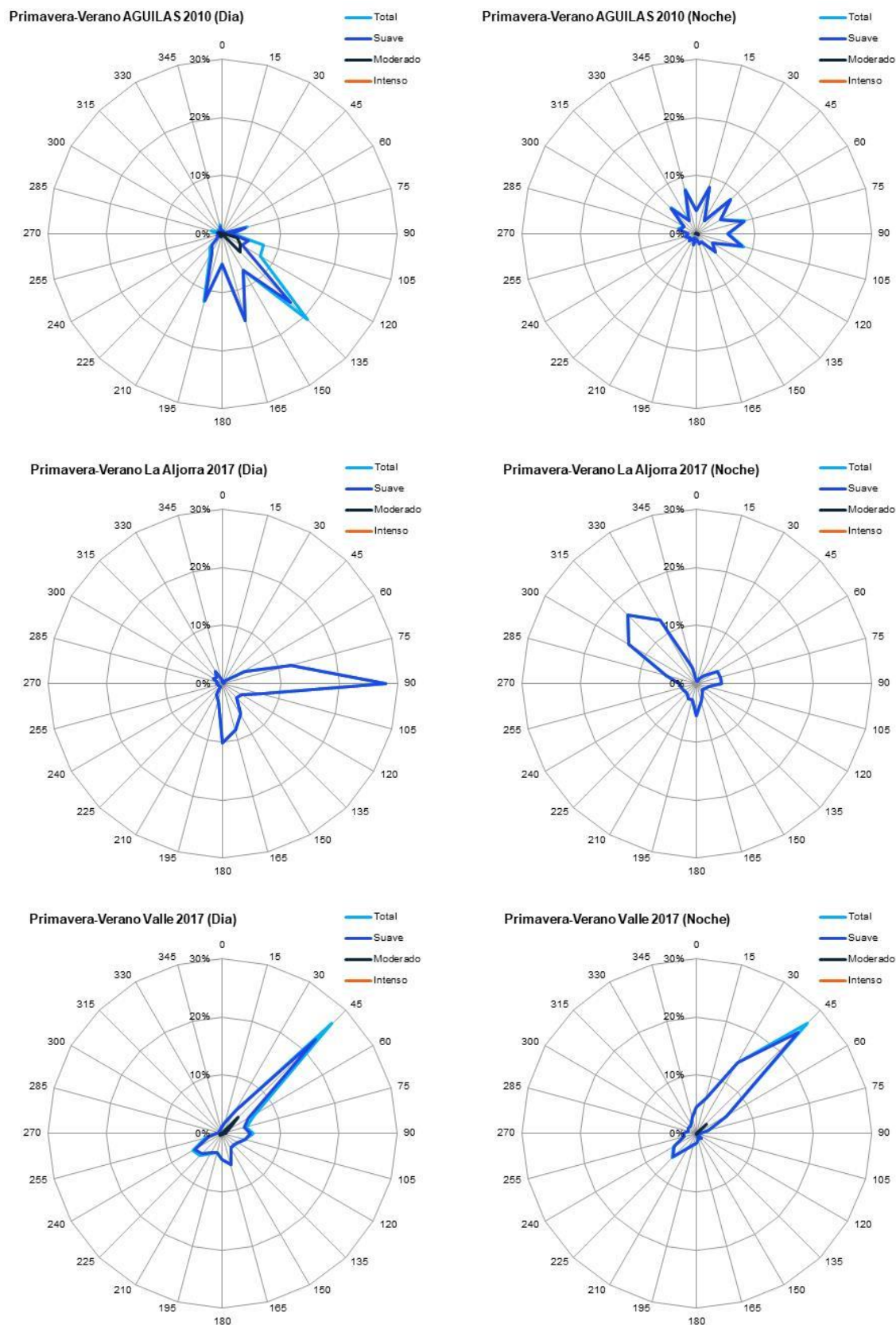


Figura 22d: Rosas de viento de primavera-verano de Águilas, La Aljorra Y Valle. El periodo diurno abarca el intervalo 8:00-20:00 h y el nocturno 20:00-8:00 h (en hora local = UTC+2). Leyenda: *Total* $v > 0.5$ m/s; *Suave* $0.5 < v < 5$ m/s; *Moderado* $5 < v < 10$ m/s; *Intenso* $v > 10$ m/s.

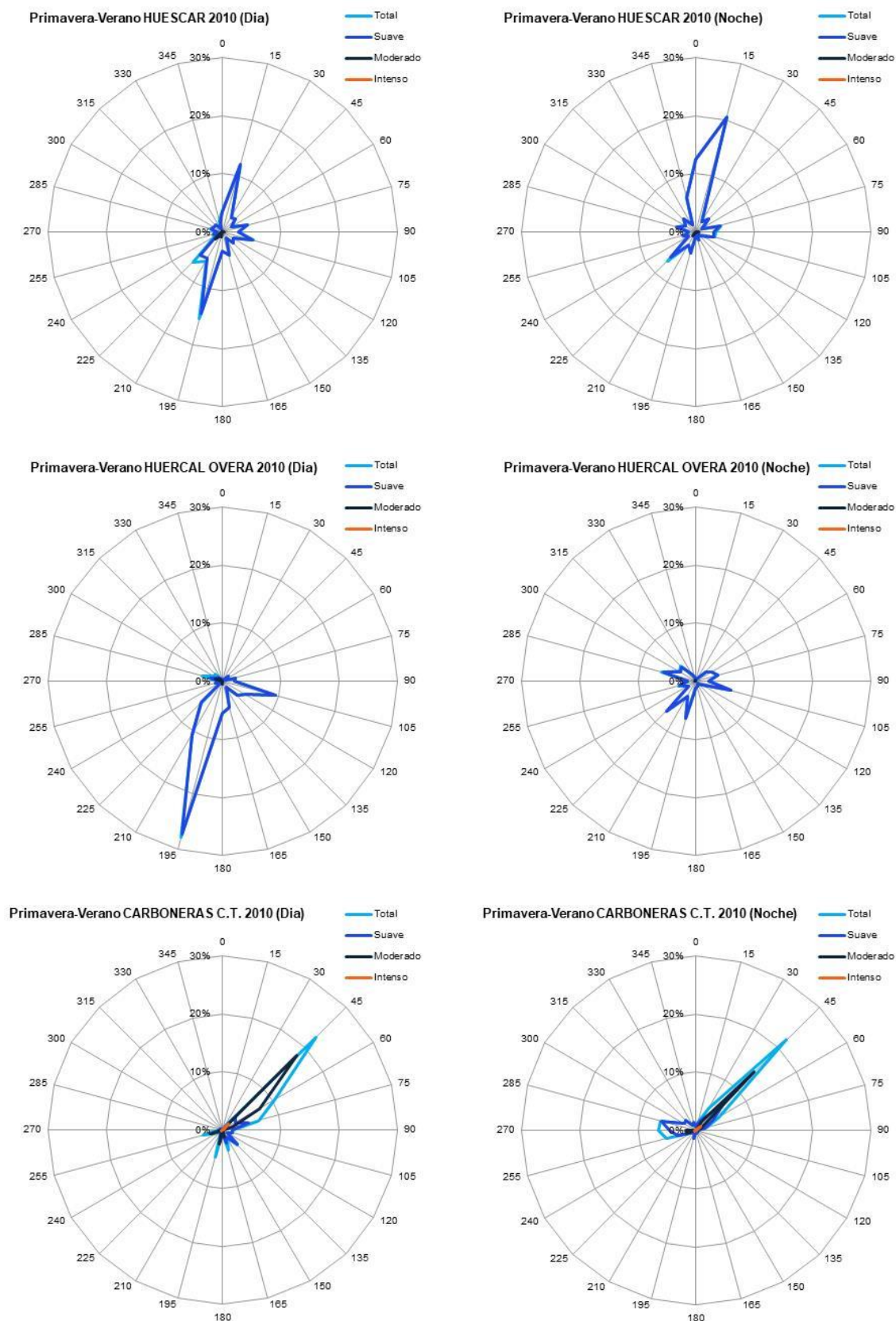


Figura 22e: Rosas de viento de primavera-verano de Huescar (Granada), Huércal-Overa, y Carboneras (Almería). El periodo diurno abarca el intervalo 8:00-20:00 h y el nocturno 20:00-8:00 h (en hora local = UTC+2). Leyenda: Total $v > 0.5$ m/s; Suave $0.5 < v < 5$ m/s; Moderado $5 < v < 10$ m/s; Intenso $v > 10$ m/s.

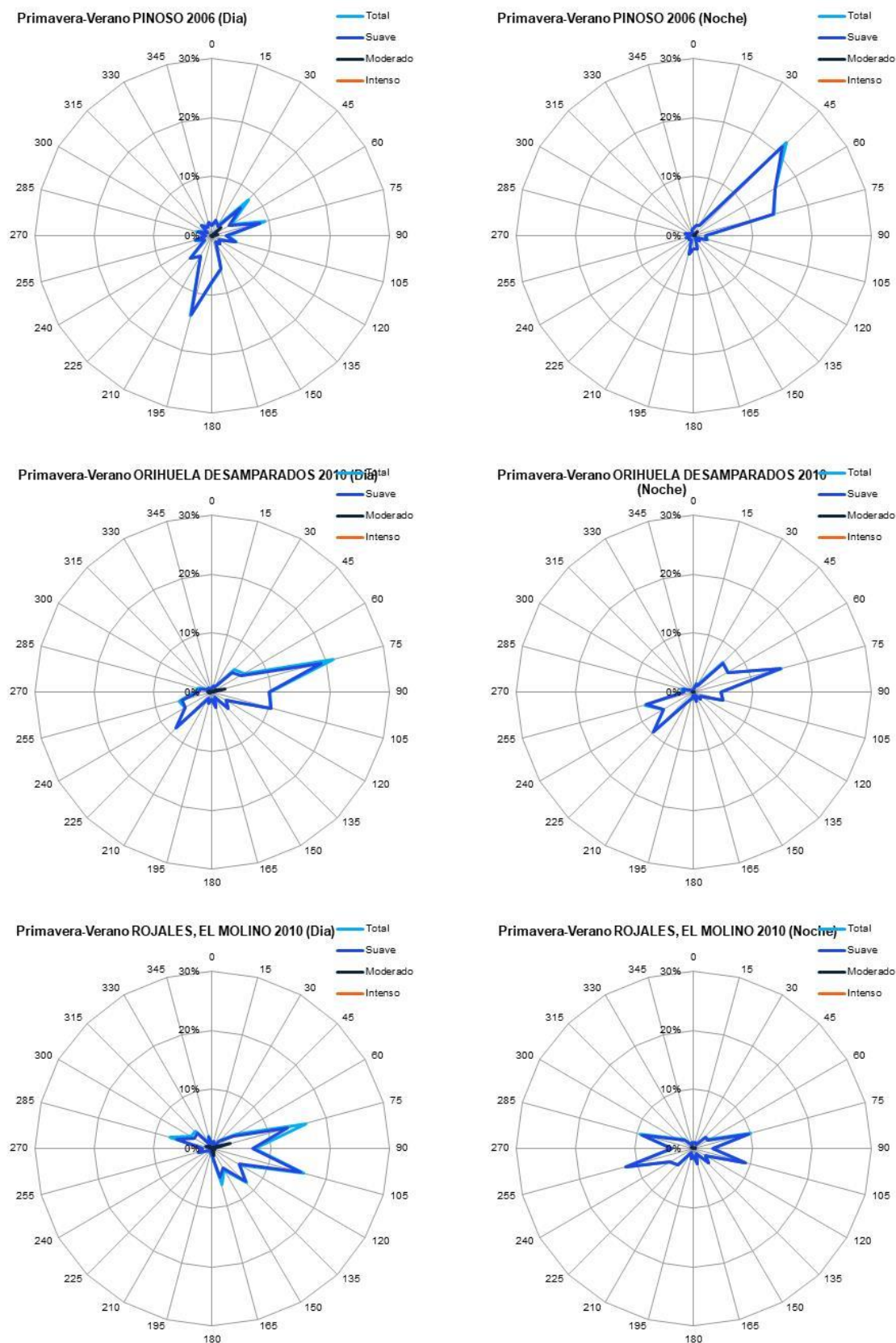


Figura 22f: Rosas de viento de primavera-verano de Pinoso, Orihuela y Rojales en Alicante. El periodo diurno abarca el intervalo de 8:00-20:00 h y el nocturno 20:00-8:00 h (en hora local = UTC+2).
 Leyenda: Total $v > 0.5 \text{ m/s}$; Suave $0.5 < v < 5 \text{ m/s}$; Moderado $5 < v < 10 \text{ m/s}$; Intenso $v > 10 \text{ m/s}$.

Las rosas de viento anteriores muestran el predominio, entre abril y septiembre, de viento de componente E (rango ENE-ESE) durante el periodo diurno en la mayor parte de la Región de Murcia. Se trata de vientos de mesoescala con alternancia noche-día, donde la orografía favorece durante el día las brisas de la costa este sobre las de la costa sur.

En algunos puntos esta orografía provoca ligeras variaciones: En Águilas la orientación de la línea de costa y el calentamiento de las laderas sur de la Sierra de Almenara, induce brisas en el eje SE-NO; en Lorca la ubicación de la torre meteorológica, en el paso que proporciona la Rambla de Lorca entre las sierras de Peña Rubia y Tercia, posibilita vientos de componente sur desde el valle del Guadalentín hacia el interior; en Cieza la orografía en el entorno próximo a la torre, altera la canalización NNO-SSE del valle del Segura registrando vientos en el eje NO-SE (e igual que en Lorca los registros ponen de manifiesto otra vía de transporte atmosférico entre el área de Murcia-Alcantarilla y el interior de la región); y en Totana el viento de componente ENE que predomina al menos en la mitad oriental del valle del Guadalentín se registra aquí como un E más marcado, debido a la influencia de las laderas este de la Sierra de Espuña, y posiblemente también a la ausencia a esta altura de barreras orográficas en dirección al este, prolongando el viento del E que registra La Aljorra. La Aljorra también registra con menos frecuencia viento de componente S, sugiriendo situaciones que favorecen la llegada de brisa desde la costa sur en lugar de desde la costa este (aunque con una barrera montañosa la costa sur ofrece a esta altura el paso de la brisa en puntos como Cartagena o El Portus). Por su parte la torre de Valle, en un pequeño valle muy encajonado y cercano al cabo de Palos, registra vientos constantes del NE. Este viento persistente contribuiría al transporte hacia el mar de las emisiones del área industrial de Escombreras, minimizando en general la posibilidad de un impacto directo de estas emisiones en el territorio de la Región de Murcia (nos referimos exclusivamente al periodo abril-septiembre). En todo caso no se puede descartar una posible entrada de parte de estas emisiones por la costa sur, en caso de que se introdujeran dentro de la circulación de brisa, que como antes se ha dicho se registra con alguna frecuencia en La Aljorra. En el apartado siguiente veremos que los registros de ozono en La Aljorra son coherentes con esta hipótesis.

En el este de Almería Huércal-Overa registra viento del SSO que tendría continuidad hacia el valle del Guadalentín, y que en algún punto convergería con la que llega en sentido contrario desde el otro lado del valle. Esta convergencia ayudaría a la penetración de la masa aérea hacia el interior, como registra la torre de Lorca y puede ocurrir en otros puntos como Totana, en el paso entre las sierras de Tercia y de Espuña a través de la Rambla de los Molinos (lo que daría una tercera explicación para la marcada componente E registrada por la torre de Totana). Más al norte en Almería los registros de Huescar (junto a los vistos en Caravaca) no muestran la misma continuidad hacia el este, situación que se explica por la barrera orográfica que suponen las sierras de Cazorla y del Segura para las circulaciones entre el Valle del Guadalquivir y las sierras murcianas (al menos para los vientos de mesoescala que predominan en primavera y verano), y más al sur en Carboneras se registra viento constante del NE. Los registros de Carboneras permiten descartar un transporte directo de las emisiones de la C.T. allí ubicada hacia la Región de Murcia. Incluso es poco probable que lo puedan hacer de forma indirecta, como se ha sugerido en el caso de Escombreras, puesto que no se alcanza a ver ningún factor que favorezca esta posibilidad, sino más bien al contrario (distancia, barreras orográficas, predominio de vientos del E en todo el mar de Alborán de abril a septiembre...).

Por último, al sur de Alicante los registros de Orihuela y Rojales, en la comarca de la Vega Baja muestran vientos del este con continuidad hacia Murcia capital y Valle del Guadalentín. Más al norte los datos de Pinoso registran vientos de NE que tendrían continuidad hacia la zona de Cieza, y con más frecuencia del S, que tendrían continuidad hacia la zona de Yecla. Estos registros no implican necesariamente el transporte hacia estas zonas de emisiones procedentes del área urbana de Alicante. Las barreras orográficas al este de Pinoso no favorecen este transporte, que se canaliza más eficazmente por los valles del Vinalopó y el Montnegre hacia el interior norte de la provincia de Alicante.

Todos estos datos sugieren una dinámica del ozono en la Región de Murcia más ligada a las circulaciones del este, y por tanto más parecida a la del sur de la Comunidad Valenciana que a la del este de Andalucía. Como veremos en el siguiente apartado el análisis de los datos de ozono confirma esta situación.

5.2.3. Análisis de las situaciones de niveles elevados de ozono.

En este apartado se analizan las situaciones que dan lugar a niveles elevados de ozono en la Región de Murcia. Para ello se toma como referencia los días de superación del V.O. de Protección a la Salud ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el máximo diario del promedio de 8 horas)¹⁰, y los días de superaciones del $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio horario, como representativos de las situaciones episódicas, ya que como vimos en el apartado 5.1 (figura 21), el Umbral de Información ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio horario) apenas se supera en todo el periodo 2008-2018.

Para todo este periodo el número de días en que se superó el V.O. en la RVCARM es de 751 (un promedio de 68 días al año). De estos si consideramos el número en que la superación se registra al menos en 2 estaciones la cifra es de 415 días, de los cuales el 60% ocurre en periodos de 3 o más días consecutivos. En las página siguientes las figuras 23(a-e) muestran diversos ejemplos de estos periodos de superación a lo largo del periodo analizado.

Las estaciones con mayor número de superaciones son Alcantarilla (387 días, que equivalen a un promedio 35 superaciones anuales), Caravaca (320 días, 29 como promedio anual), y La Aljorra (224 días, 20 de promedio anual). Y las que menos superaciones registran son Mompean (47 días, 4 de promedio anual), San Basilio (153 días, 14 de promedio anual), y Lorca (que una vez corregida la serie -ver AnexolIII- registró 187 días de superación correspondientes a 17 de promedio anual).¹¹

En cuanto a las superaciones de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (mh) en el mismo periodo se han contabilizado 65 días. En 14 de ellos se superó en dos estaciones, nunca en más, siendo la pareja Alcantarilla-San Basilio la más común (8 días). La estación con más días de superación es Alcantarilla (37), seguida de San Basilio (12), Caravaca (8), La Aljorra (7) y Lorca (1).

¹⁰ Estrictamente la superación del V.O. se calcula en base anual e implica la superación del valor $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio de 8 horas consecutivas más de 25 días al año como promedio de los últimos 3 años. Aquí nos estamos refiriendo a las superaciones aisladas de este valor.

¹¹ No se incluyen las cifras de San Gines, Benizar y Valle, las dos primeras porque se dieron de baja en 2010 y la segunda porque el monitor de ozono se instaló en 2018.

RED MUREX: Series de ozono del periodo 1-16 septiembre 2010 (valores horarios)

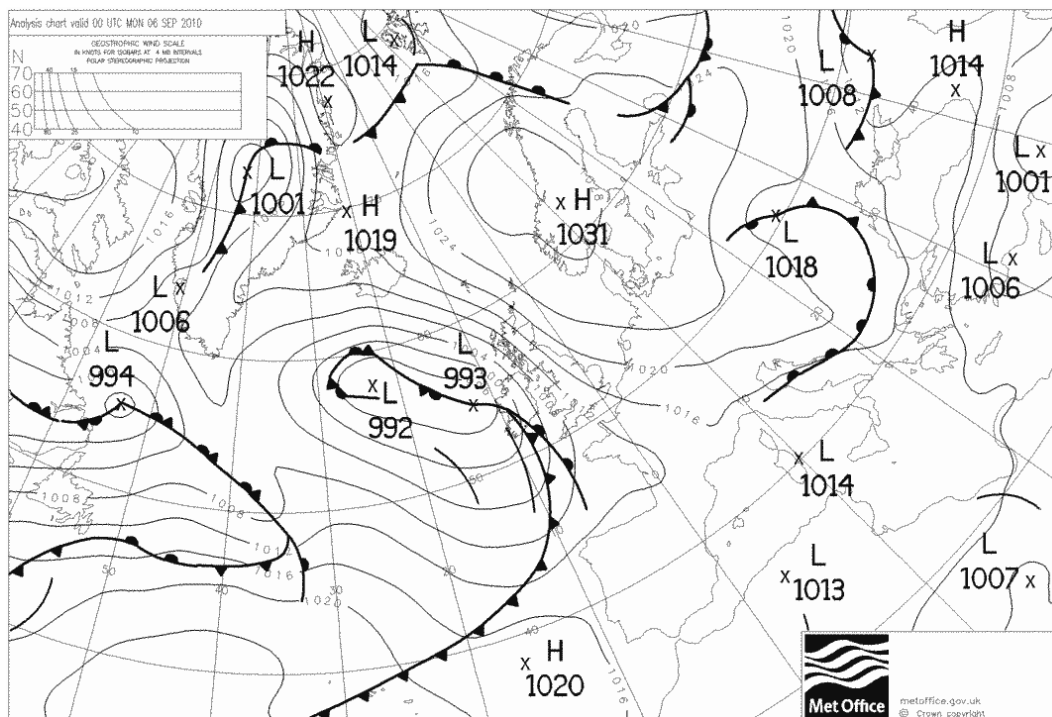
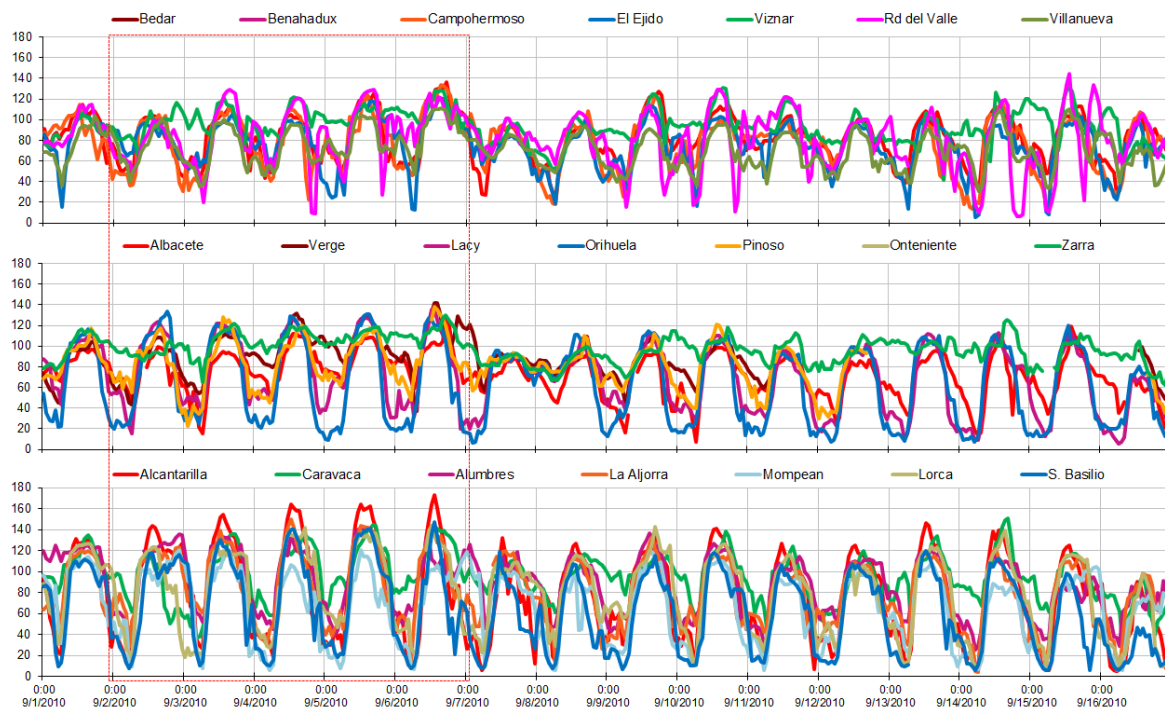


Figura 23a: (Arriba) Los tres gráficos de arriba muestran por separado las series de la estaciones de Andalucía oriental, Región de Murcia y Comunidad Valenciana. Entre los días 2 y 5 se aprecia un periodo de incremento gradual de las concentraciones máximas en los tres grupos, con la superación del V.O. en varias estaciones, en la R.M. entre 3 y 6 estaciones lo superan dependiendo del día. (Abajo) El mapa de presiones correspondiente al día 6/9 muestra una situación de altas presiones y pantano barométrico en toda la península, que favorece el desarrollo de las circulaciones de mesoescala. El frente que se aproxima por el atlántico acaba barriendo el sureste de la península el día 7/9, dando lugar a una bajada generalizada de las concentraciones.

RED MUREX: Series de ozono del periodo 1-16 mayo 2011 (valores horarios)

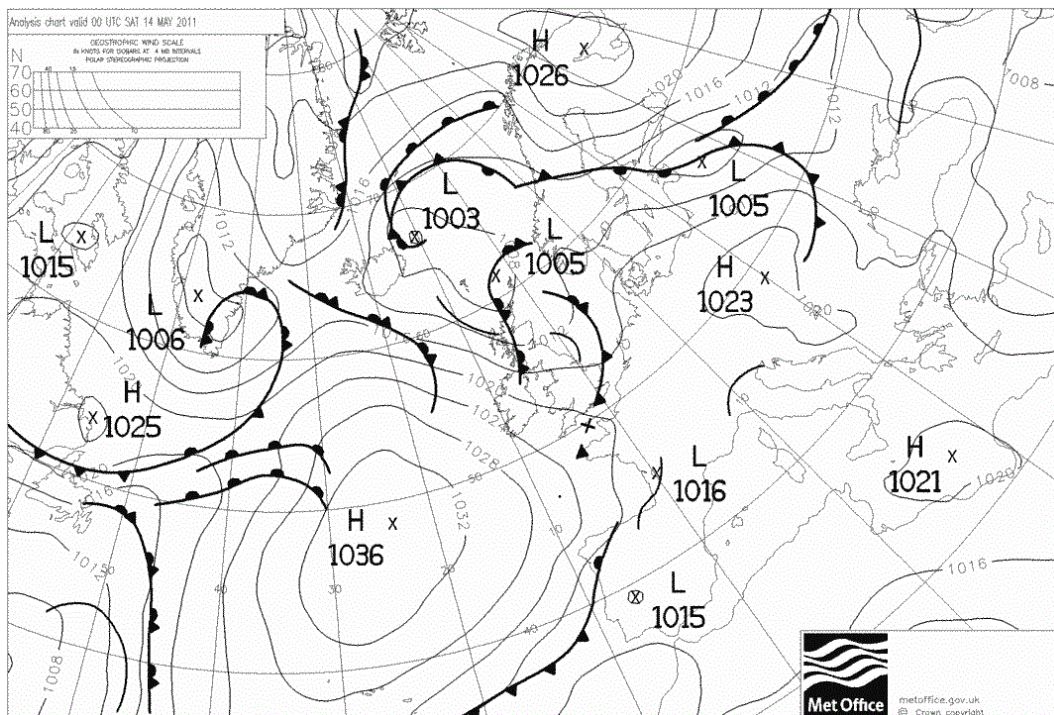
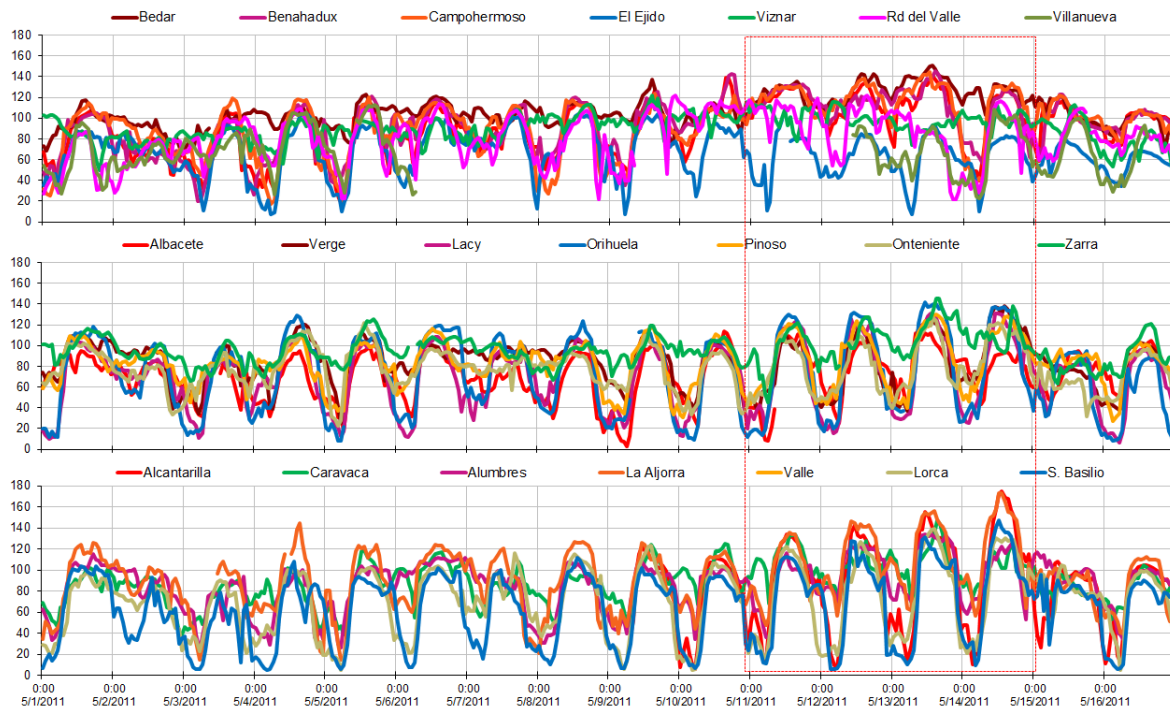


Figura 23b: (Arriba) Entre los días 11 y 14 se aprecia un periodo de incremento gradual de las concentraciones máximas en los tres grupos (Andalucía oriental, Región de Murcia y Sur de la Comunidad Valenciana), más marcada en la R.M. y C.V., con la superación del V.O. en varias estaciones (en la R.M. entre 3 y 5 dependiendo del día), llegando el día 14 hasta valores próximos a los 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Alcantarilla y La Aljorra. (Abajo) El mapa de presiones correspondiente al día 14/5 muestra una situación anticiclónica, sin gradiente barométrico y con desarrollo de la baja térmica sobre península, que favorece el desarrollo de las circulaciones de mesoescala. El día 15 la combinación del anticiclón con el reforzamiento de los centros de bajas presiones en centroeuroa induce la entrada de aire desde centroeuroa cambiando las propiedades y la composición de la masa aérea, que se traduce en una caída de las concentraciones.

RED MUREX: Series de ozono del periodo 1-16 septiembre 2012 (valores horarios)

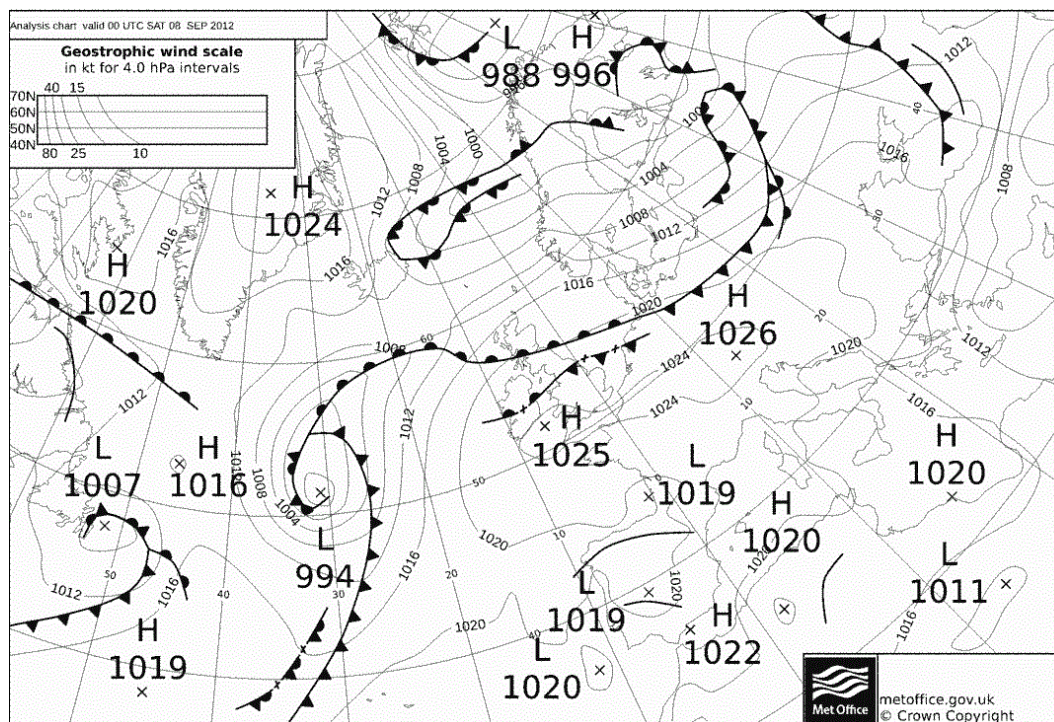
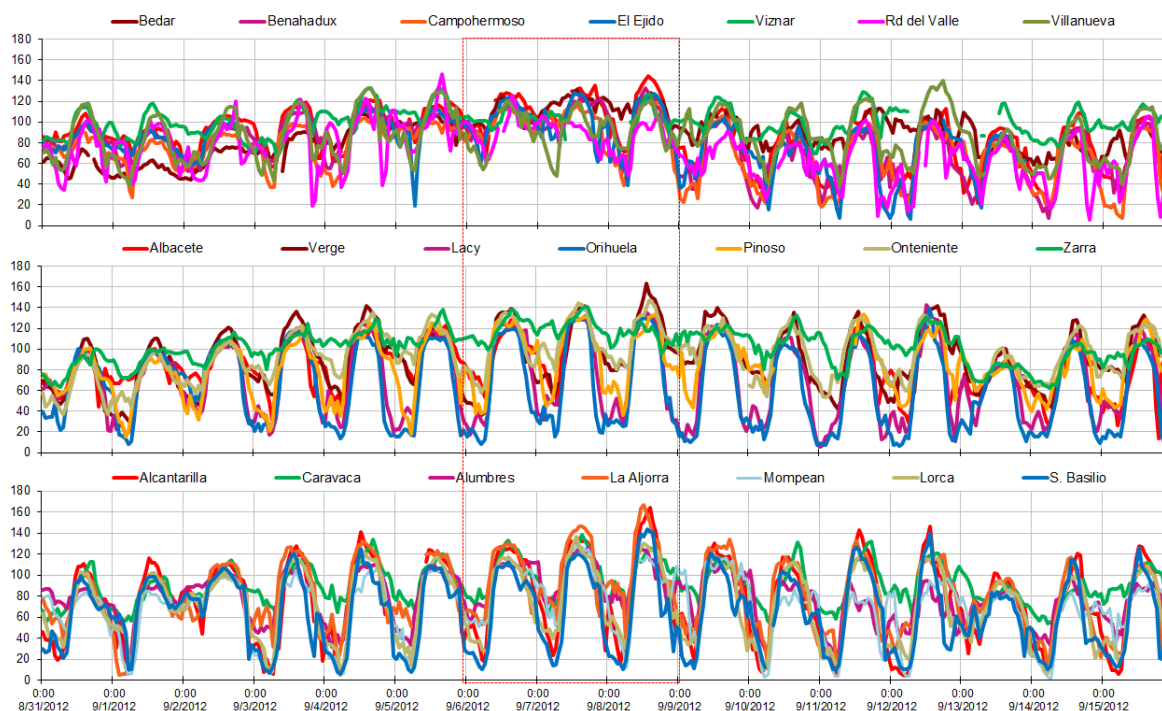


Figura 23c: (Arriba) Entre los días 6 y 8 se aprecia un periodo de incremento gradual de las concentraciones máximas en los tres grupos (Andalucía oriental, Región de Murcia y Sur de la Comunidad Valenciana), con la superación del V.O. en varias estaciones (en la R.M. entre 3 y 6 dependiendo del día). (Abajo) El mapa de presiones correspondiente al día 8/9 muestra una situación anticiclónica sobre centrouropa, menos definida en la península, pero bajo altas presiones y sin apenas gradiente barométrico, que favorece el desarrollo de las circulaciones de mesoescala.

RED MUREX: Series de ozono del periodo 1-16 julio 2013 (valores horarios)

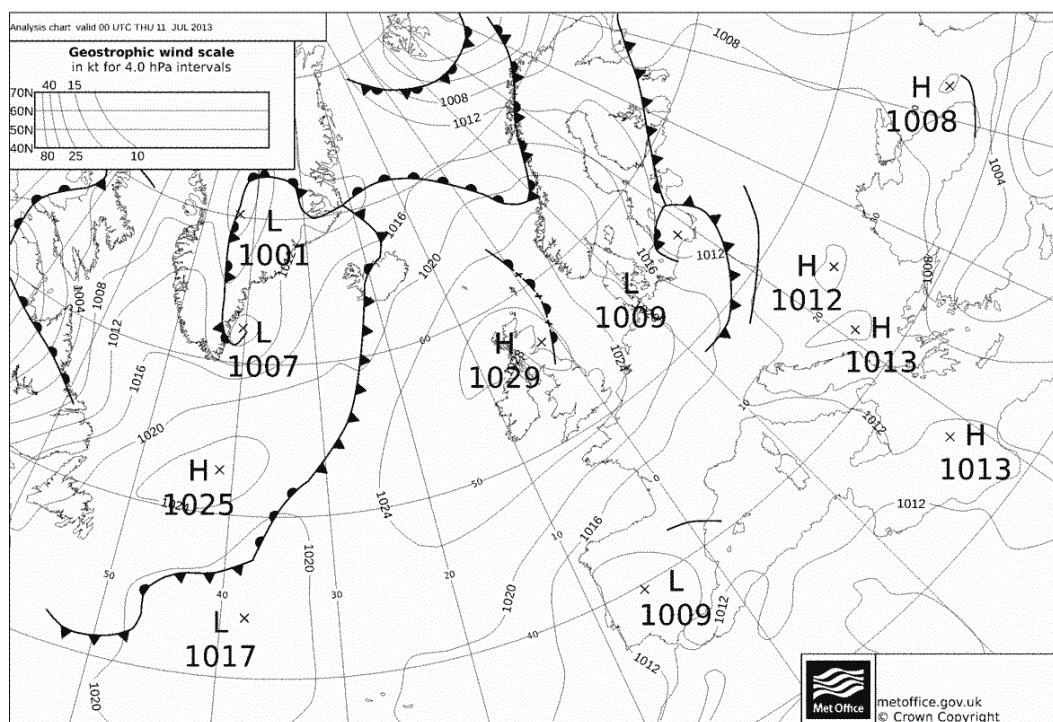
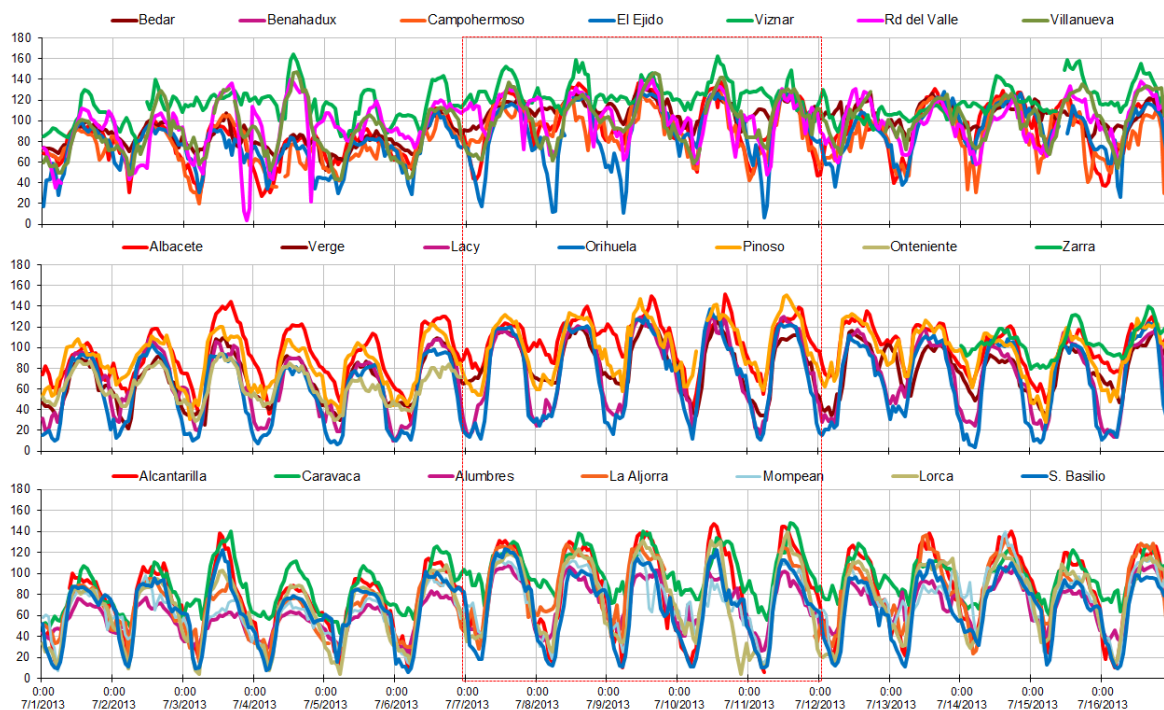


Figura 23d: (Arriba) Entre los días 7 y 12 se aprecia un periodo de incremento gradual de las concentraciones máximas en los tres grupos (Andalucía oriental, Región de Murcia y Sur de la Comunidad Valenciana), con la superación del V.O. en varias estaciones (en 2 o más de la R.M.). (Abajo) El mapa de presiones correspondiente al día 11/7 muestra una situación anticiclónica sobre centrouropa, y desarrollo de la baja ibérica en la península y escaso gradiente barométrico, que favorece el desarrollo de las circulaciones de mesoescala.

RED MUREX: Series de ozono del periodo 7-22 junio 2017 (valores horarios)

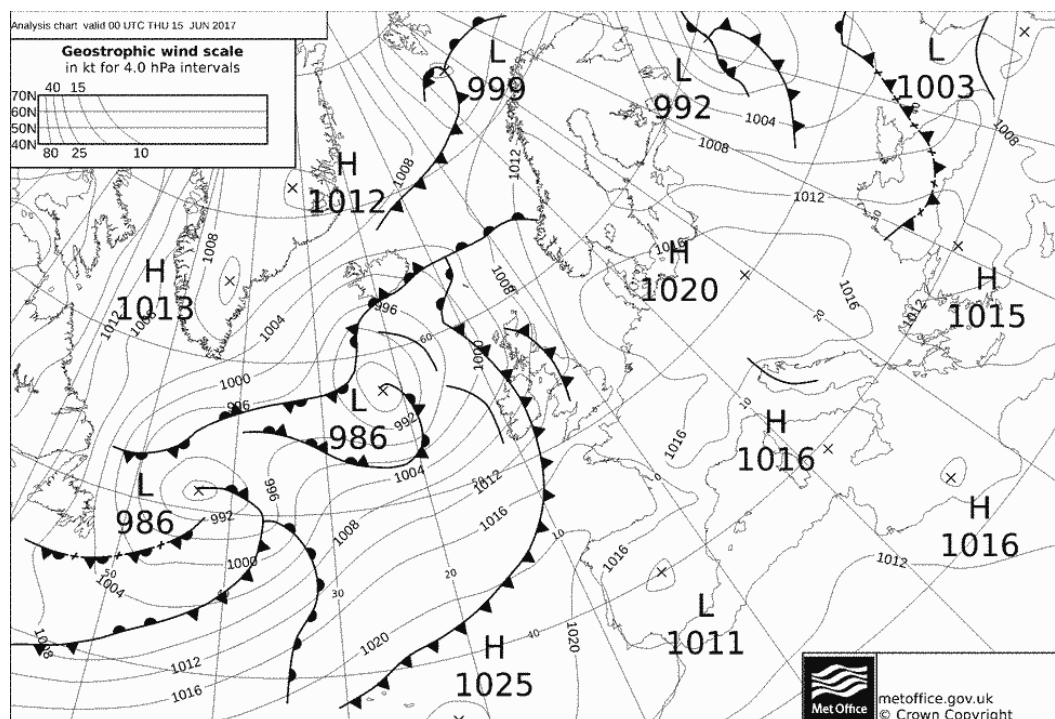
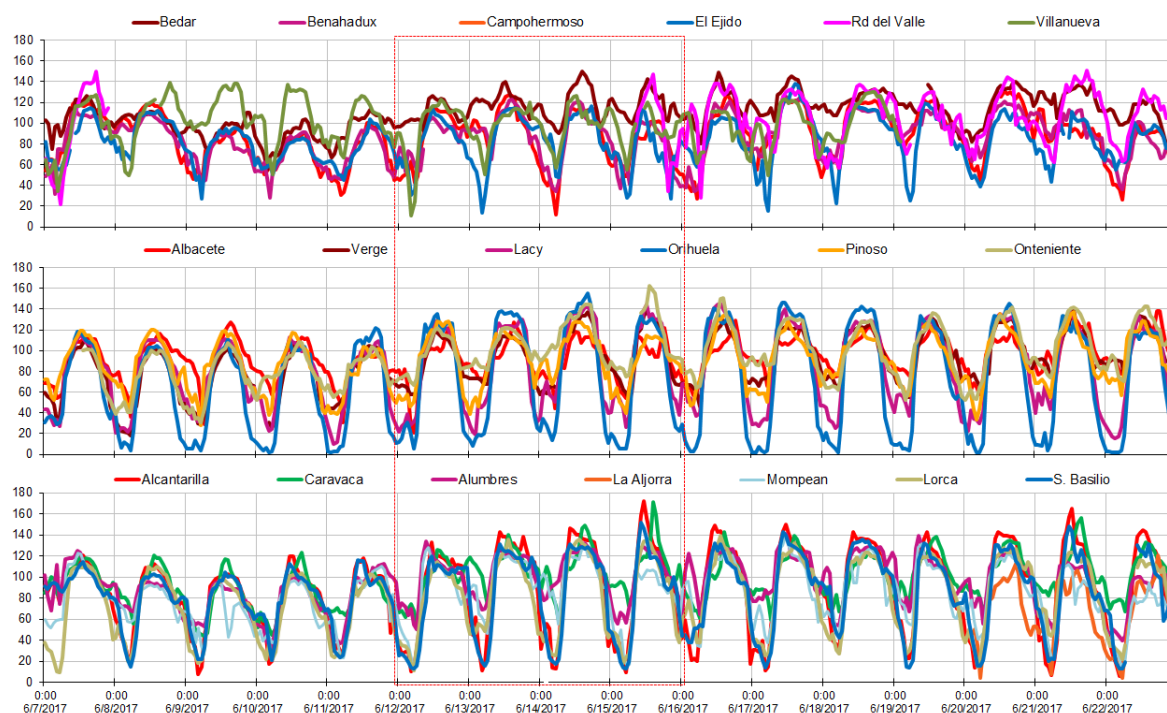


Figura 23e: (Arriba) Entre los días 12 y 15 se aprecia un periodo de incremento gradual de las concentraciones máximas en los tres grupos (Andalucía oriental, Región de Murcia y Sur de la Comunidad Valenciana), con la superación del V.O. en varias estaciones (en la R.M. 5-6 dependiendo del día). A partir del 16 y hasta el 24 de junio siguen registrándose superaciones del V.O. en no menos de 3 estaciones en la RM, aunque las concentraciones máximas se mantienen estables. (Abajo) El mapa de presiones correspondiente al día 15/6 muestra una situación anticiclónica y desarrollo de la baja térmica ibérica en la península sin apenas gradiente barométrico, que favorece el desarrollo de las circulaciones de mesoescala.

Los ejemplos anteriores muestran situaciones meteorológicas parecidas, caracterizadas por las altas presiones de origen anticiclónico, y a menudo la formación de la baja térmica ibérica. Estas condiciones dan lugar a cielos despejados, altas temperaturas y desarrollo de circulaciones de mesoescala, factores que favorecen tanto la formación como la acumulación de ozono en días sucesivos, mientras se mantengan estas condiciones y, como veremos a continuación, mientras se mantengan las emisiones de precursores. El resultado de todo ello son niveles elevados de ozono, con frecuencia por encima del V.O.

La recarga de ozono en la masa aérea se explica por los ciclos de recirculación asociados a los sistemas de brisa, que son habituales en la costa mediterránea peninsular bajo las condiciones anticiclónicas de primavera y verano¹² (ver Anexoll). Como se puede apreciar en los gráficos anteriores los niveles evolucionan de manera muy similar en todo el territorio abarcado por la RMUREX, y en general los periodos de incremento gradual y las superaciones ocurren de forma simultánea en estaciones de la Región de Murcia y de provincias colindantes. No se trata por tanto de una situación que afecta de forma aislada o independiente al territorio de la RM, sino que tiene lugar a una escala mayor.

En términos de **distribución semanal de superaciones** de los $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (m8h) la dinámica descrita da lugar a los resultados que muestra la figura para diferentes estaciones rurales y suburbanas en el área de estudio.

DISTRIBUCIÓN SEMANAL DE SUPERACIONES DE $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 2008-2018

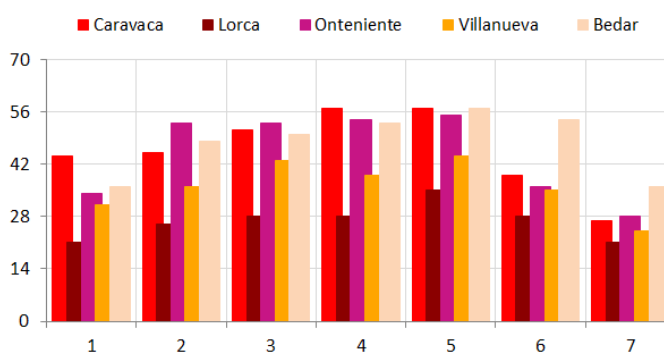


Figura 24: Distribución semanal de superaciones del V.O. en estaciones rurales y suburbanas de la RMUREX.

Esta distribución semanal pone de manifiesto los dos factores principales que determinan la dinámica del ozono: emisiones y condiciones meteorológicas. Por un lado confirma la

¹² Los bajos registros de velocidad en la RVCARM (que en principio hemos asociado a la baja altura de las torres meteorológicas), no permiten descartar que, junto a la recirculación asociada al sistema de brisas, en zonas como el valle del Guadalentín-Segura, pueda tener algún peso la recarga de ozono asociada a la formación diaria de la capa de mezcla (según hemos visto en primavera-verano en esta zona pueden converger vientos procedentes de ambos lados del valle y favorecer las calmas). Así, en áreas de emisión como Murcia-Alcantarilla, en ausencia de viento, parte de las emisiones del día podrían quedar durante la noche "atrapadas" en la capa residual nocturna desacoplada de la superficie. Posteriormente por la mañana, durante el proceso formación de la capa de mezcla (por la turbulencia vertical que genera el calentamiento del terreno), los contaminantes allí presentes, entre ellos el ozono, impactarían de nuevo en la superficie sumándose a la producción del día. En todo caso la baja calidad de los registros de velocidad de viento (además de bajos muestran poca variabilidad) no ha permitido un análisis más detallado de este aspecto, que aquí solo se apunta como una hipótesis.

tendencia al incremento gradual de los niveles bajo condiciones meteorológicas favorables, y en consecuencia al incremento de superaciones mientras se mantengan estables las emisiones (de lunes a viernes). Y por otro muestra el efecto de la reducción general de las emisiones durante el fin de semana, que se traduce en una reducción en el número de superaciones (la reducción viernes-domingo es del 53% en Caravaca y del 40% en Lorca).

Los incrementos en el periodo laborable se explican por la adición del ozono producido en el día al ozono recirculado y a la componente de fondo. Y la reducción del fin de semana se explica por la caída de la producción del día debido a la reducción de precursores. En definitiva el gráfico revela la existencia de diferentes componentes en la concentración de ozono en un punto: Una componente local consistente en la producción del día a partir de emisiones en el entorno próximo o en áreas de emisión más alejadas respecto a las cuales el punto se encuentra a sotavento, y otra componente, que en realidad será la suma de la recirculación en el mediterráneo occidental y de los niveles de fondo.

Como contrapartida a la reducción de los niveles en las zonas rurales que se observa los fines de semana, la química no lineal del ozono provoca el aumento de niveles y de superaciones en las áreas urbanas origen de estas emisiones (el llamado “efecto fin de semana” ya comentado en la introducción e ilustrado en la figura 3). Dentro de la RVCARM este fenómeno se aprecia claramente en la estación de San Basilio, donde el número de superaciones en sábados o domingos llega a duplicar el de un día laborable. Este efecto indeseable debe tenerse en cuenta al implementar posibles medidas de reducción por parte de los gestores de calidad del aire.

DISTRIBUCIÓN SEMANAL DE SUPERACIONES DE $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 2008-2018

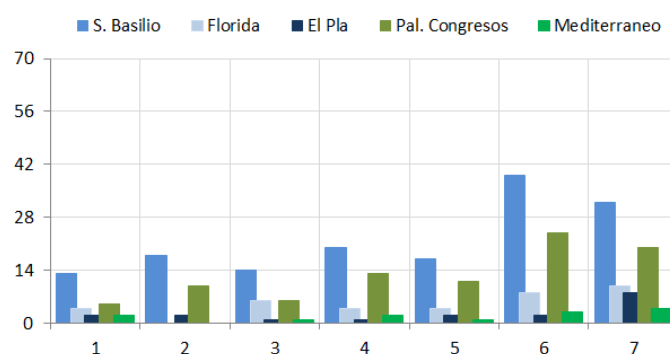


Figura 25: Distribución semanal de las superaciones del V.O. en estaciones de áreas urbanas de la RMUREX.

Siguiendo con el análisis de las situaciones de niveles elevados de ozono, los gráficos de las figuras 26(a-f) muestran a la izquierda los perfiles del día promedio de Alcantarilla, Caravaca, La Aljorra, Lorca y San Basilio (NO , NO_2 , O_3 , DIR, VELx10 , TEMx2). En cada caso se compara el perfil promedio de abril a septiembre para el periodo 2011-2017, con los perfiles filtrados para los días de superación del V.O. y del valor $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el mismo periodo. A la derecha se muestra la composición vectorial del día promedio de cada mes (ver explicación en el pie de la figura 13), con el filtro correspondiente para las superaciones.

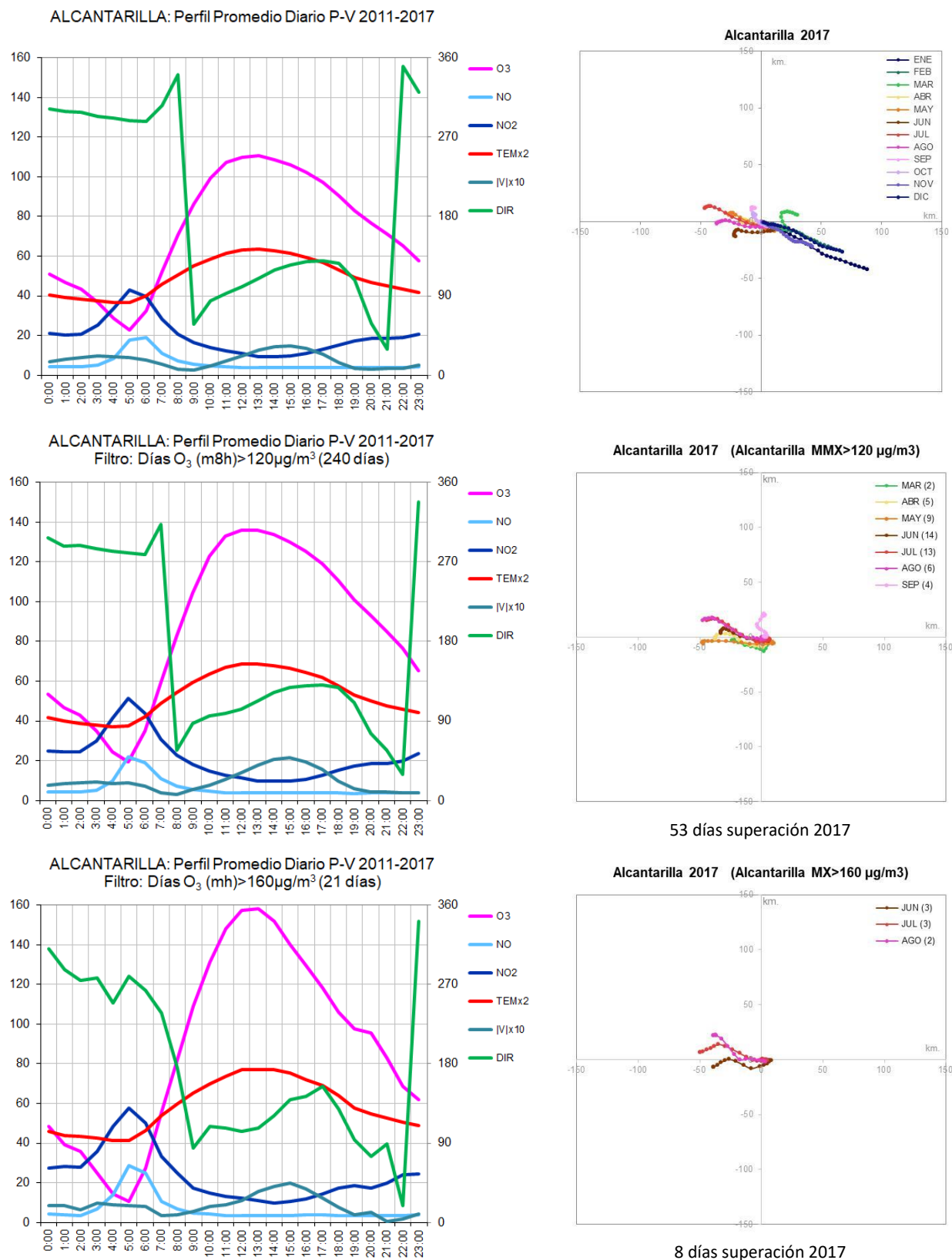
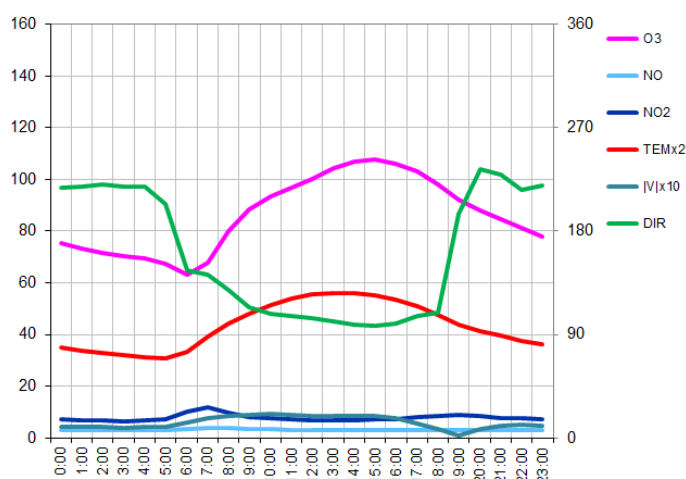
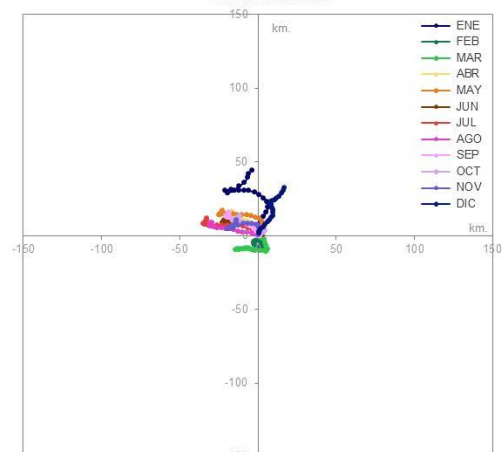
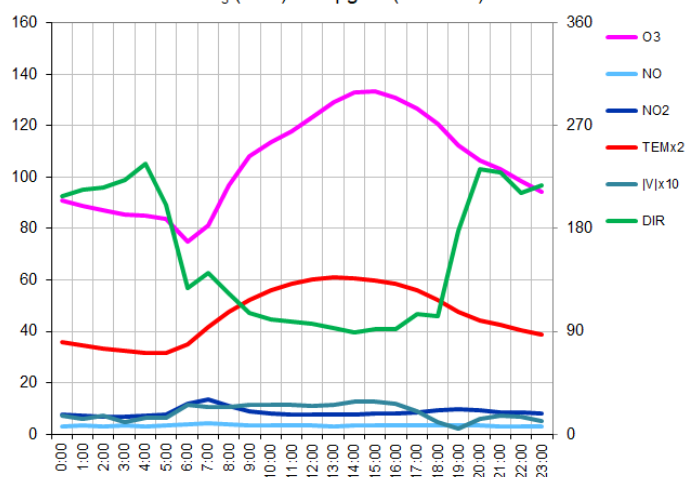
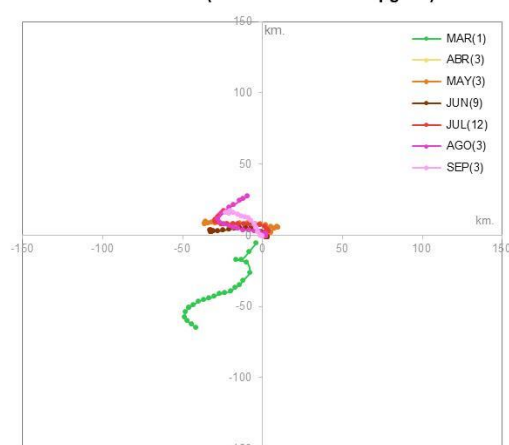


Figura 26a: (Izquierda) Perfiles del día promedio de Alcantarilla entre abril y septiembre para el periodo 2011-2017 (hora UTC). De arriba abajo: perfil total, perfil filtrado para superaciones del V.O, y perfil filtrado para superaciones de 160 µg/m³ como promedio horario. (Derecha) Composiciones vectoriales de los datos de viento separados por meses con el filtro correspondiente. La leyenda informa del número de superaciones por mes.

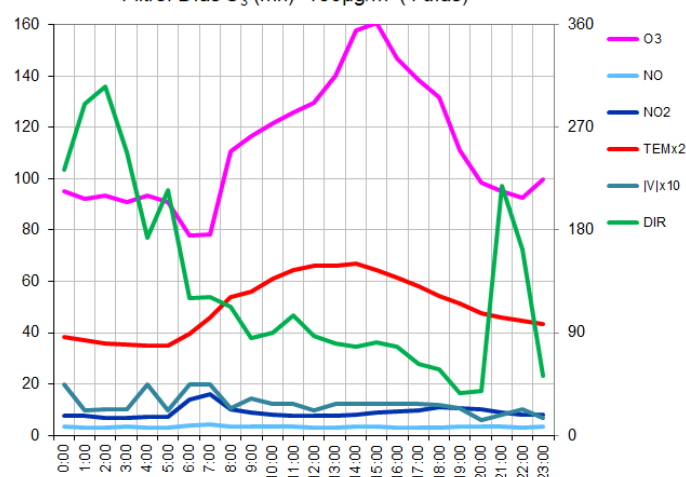
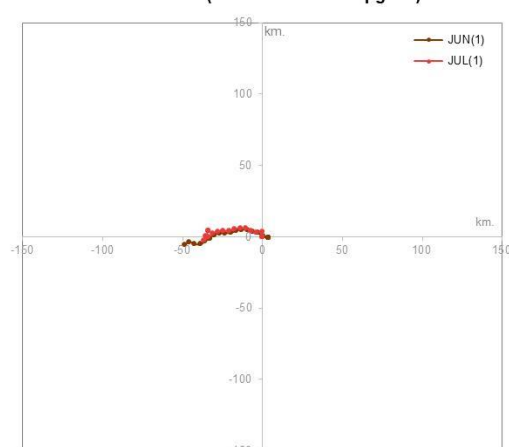
CARAVACA: Perfil Promedio Diario P-V 2011-2017



Caravaca 2017

CARAVACA: Perfil Promedio Diario P-V 2011-2017
Filtro: Días O₃ (m8h)>120µg/m³ (176 días)Caravaca 2017 (Caravaca MMX>120 µg/m³)

34 días de superación 2017

CARAVACA: Perfil Promedio Diario P-V 2011-2017
Filtro: Días O₃ (mh)>160µg/m³ (4 días)Caravaca 2017 (Caravaca MX>160 µg/m³)

2 días de superación 2017

Figura 26b: (Izquierda) Perfiles del día promedio de Caravaca entre abril y septiembre para el periodo 2011-2017 (Hora UTC). De arriba abajo perfil total, filtrado para superaciones del V.O, y filtrado para superaciones de 160 µg/m³ como promedio horario. (Derecha) Composiciones vectoriales de los datos de viento separados por meses con el filtro correspondiente. La leyenda informa del número de superaciones por mes.

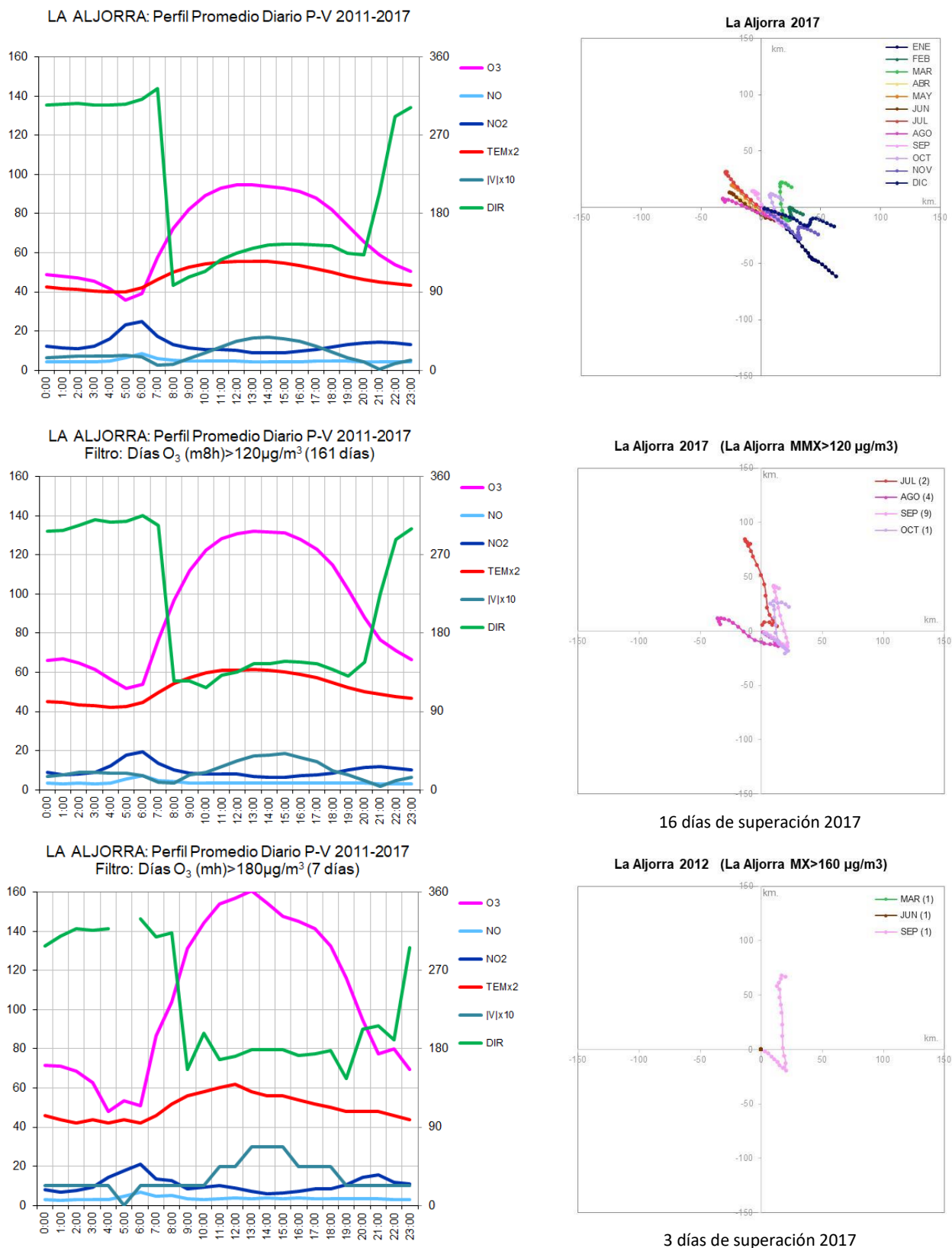
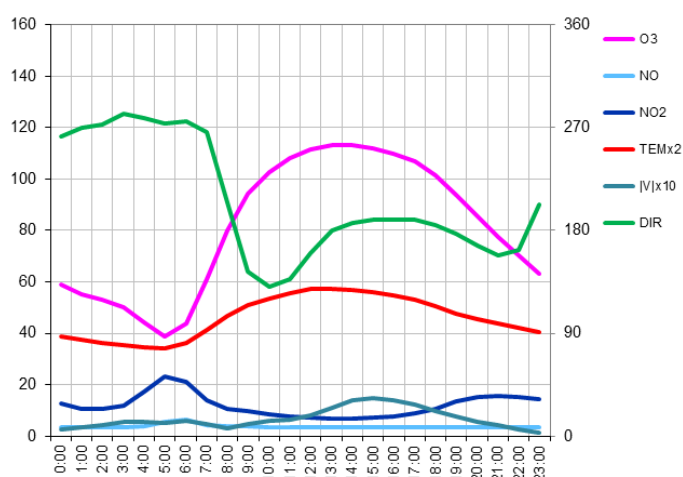
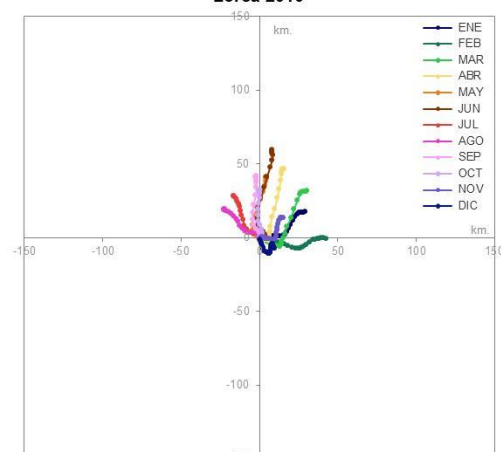
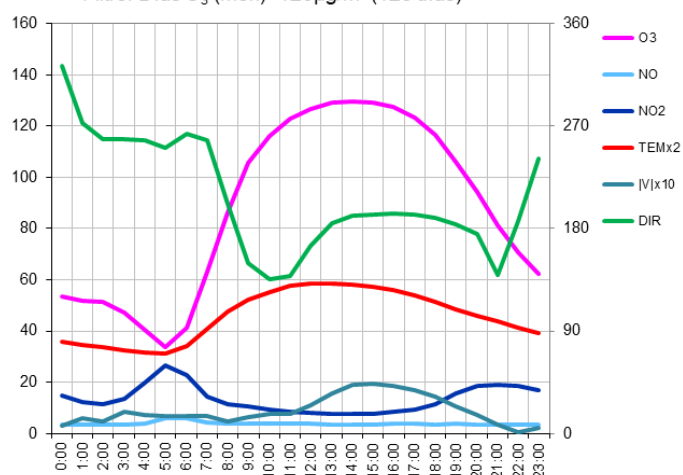
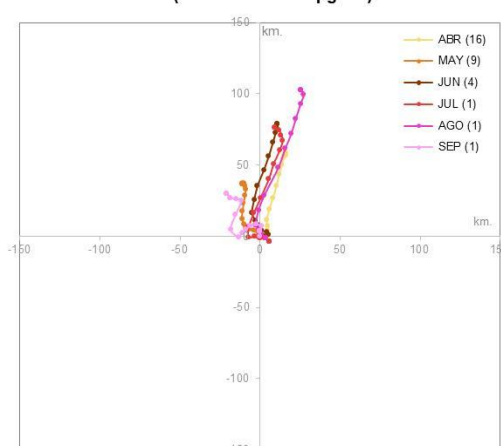


Figura 26c: (Izquierda) Perfiles del día promedio de La Aljorra entre abril y septiembre para el periodo 2011-2017 (Hora UTC). De arriba abajo perfil total, filtrado para superaciones del V.O, y filtrado para superaciones de 160 µg/m³ como promedio horario. (Derecha) Composiciones vectoriales de los datos de viento separados por meses con el filtro correspondiente. La leyenda informa del número de superaciones por mes.

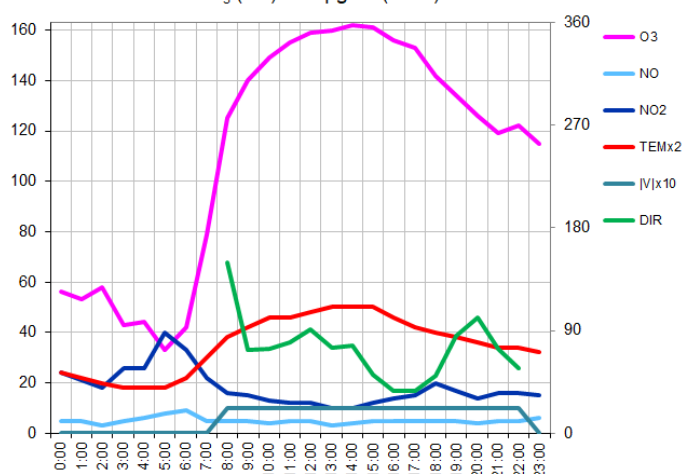
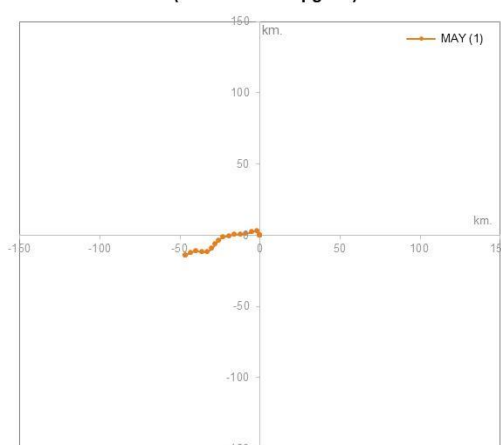
LORCA: Perfil Promedio Diario P-V 2011-2017



Lorca 2016

LORCA: Perfil Promedio Diario P-V 2011-2017
Filtro: Días O₃ (m8h)>120µg/m³ (125 días)Lorca 2016 (Lorca MMX>120 µg/m³)

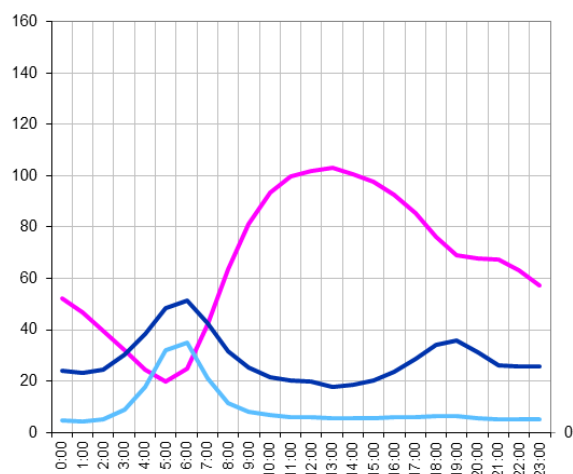
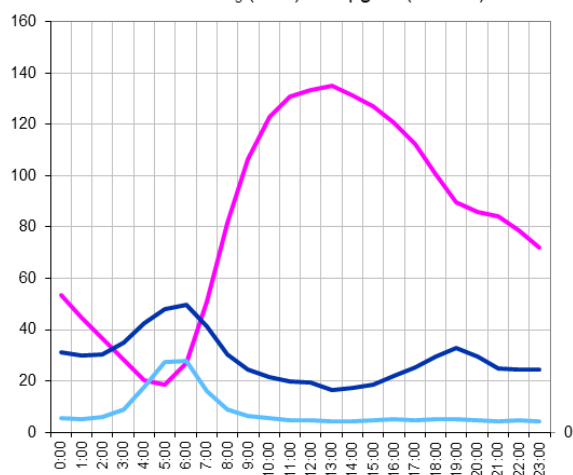
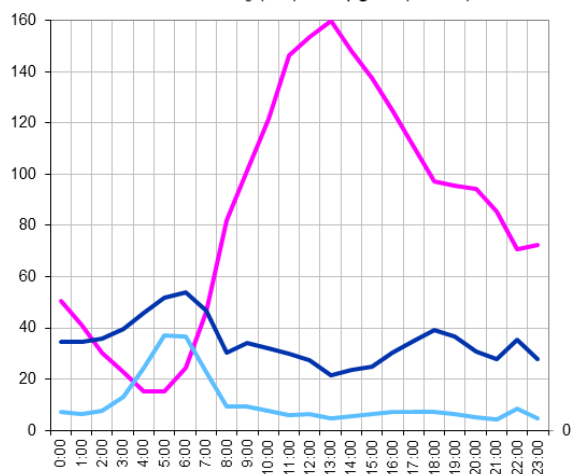
32 días de superación 2016

LORCA: Perfil Promedio Diario P-V 2011-2017
Filtro: Días O₃ (mh)>160µg/m³ (1 día)Lorca 2016 (Lorca MX>160 µg/m³)

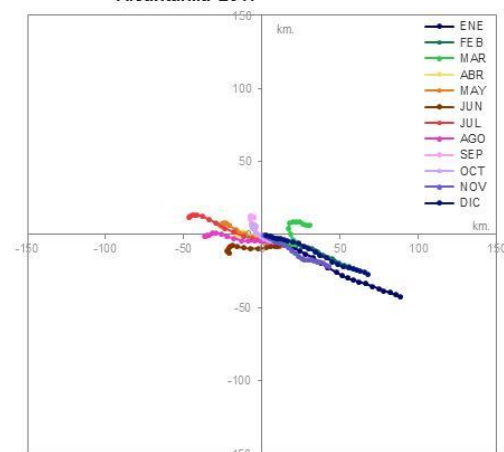
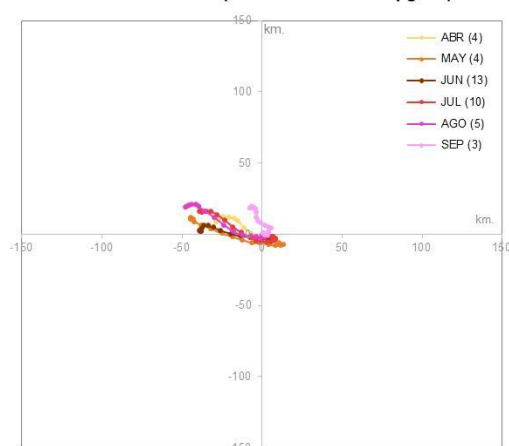
1 día de superación 2016

Figura 26d: (Izquierda) perfiles del día promedio de Lorca entre abril y septiembre para el periodo 2011-2017 (Hora UTC). De arriba abajo perfil total, filtrado para superaciones del V.O, y filtrado para superaciones de 160 µg/m³ como promedio horario. (Derecha) Composiciones vectoriales de los datos de viento separados por meses con el filtro correspondiente. La leyenda informa del número de superaciones por mes.

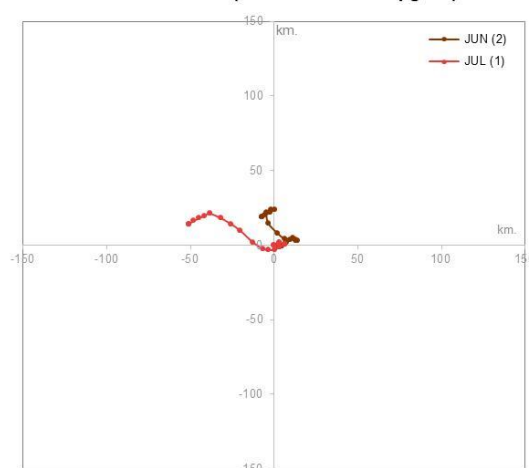
SAN BASILIO: Perfil Promedio Diario P-V 2011-2017

SAN BASILIO: Perfil Promedio Diario P-V 2011-2017
Filtro: Días O₃ (m8h)>120µg/m³ (81 días)SAN BASILIO: Perfil Promedio Diario P-V 2011-2017
Filtro: Días O₃ (mh)>160µg/m³ (5 días)

Alcantarilla 2017

Alcantarilla 2017 (S. Basilio MMX>120 µg/m³)

39 días de superación 2017

Alcantarilla 2017 (S. Basilio MX>160 µg/m³)

3 días de superación 2017

Figura 26e: (Izquierda) Perfiles del día promedio de San Basilio entre abril y septiembre para el periodo 2011-2017 (Hora UTC). De arriba abajo perfil total, filtrado para superaciones del V.O, y filtrado para superaciones de 160 µg/m³ como promedio horario. (Derecha) Composiciones vectoriales (datos de Alcantarilla) de los datos de viento separados por meses con el filtro correspondiente. La leyenda informa del número de superaciones por mes.

Los gráficos anteriores permiten abundar en la descripción de las situaciones de niveles elevados de ozono. En todos los casos se dan en días con temperatura por encima de la media, más altas en los episodios de superación de los $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (mh) que en los del V.O. Caravaca, Alcantarilla y San Basilio registran las superaciones bajo circulación del E, y Lorca y La Aljorra con viento del sur. En el caso de Lorca, como se explicó en el apartado anterior, esta componente tiene que ver con la circulación desde el valle del Guadalentín hacia el interior a través de la Rambla de Lorca, y en el caso de La Aljorra con aquellas situaciones que favorecen la llegada de la brisa de la costa sur, frente a las más frecuentes de brisa del E.

En Lorca la circulación del S puede estar favorecida por la convergencia de los vientos del SO, desde el Valle de Almanzora en Almería, y los del ENE desde Murcia-Alcantarilla. En ese caso se puede presumir que, aparte de la componente local que pueda formarse a partir de las emisiones propias de Lorca, la circulación proveniente de Murcia-Alcantarilla tendrá una mayor contribución a los niveles de ozono en Lorca, teniendo en cuenta que la carga de emisiones será significativamente mayor a lo largo del recorrido desde el mediterráneo, que la circulación procedente del SO, donde no hay áreas importantes de emisión (aunque puede contener niveles significativos de fondo).

Por su parte los resultados de La Aljorra sugieren el transporte atmosférico hacia este punto de ozono formado a partir de las emisiones de la zona de Cartagena-Escombreras bajo determinadas condiciones meteorológicas. Aunque hay que señalar que en el caso de episodios de altas concentraciones (tomando los $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mh como referencia) estas no se dan desde 2012 (en todo el periodo 2008-2018 se han registrado 7 superaciones de este valor, 4 en 2011 y 3 en 2012).

En el caso de Caravaca, en una zona rural poco poblada y con escasas emisiones, puede descartarse una componente local significativa. Las concentraciones máximas se producen a las 15h (UTC), con 2 h de retraso respecto a Alcantarilla, S.Basilio o La Aljorra, en forma de un pico destacado superpuesto sobre un perfil promedio habitual, más evidente en los días de episodios $\text{mh} > 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este comportamiento indica el transporte hasta este punto de ozono con procedencia del este. Los datos meteorológicos disponibles no permiten confirmar el origen probable de estas concentraciones en el área Murcia-Alcantarilla en un recorrido directo o indirecto (en el segundo caso ya sea a través del valle del Segura pasando por Cieza, o a través del Valle del Guadalentín y ascendiendo posteriormente hacia el interior). Las composiciones vectoriales calculadas para la torre de Alcantarilla en los días de superación en Caravaca no son muy concluyentes, pues sugieren la ruta directa en el caso de superaciones del V.O., y más bien la segunda ruta indirecta, a través del Guadalentín y posterior ascenso hacia el norte, para las situaciones episódicas (figura 27). La posibilidad de entrada directa de estas concentraciones desde el mediterráneo, en una ruta al norte de Murcia-Alcantarilla, resulta muy poco probable en base a los datos disponibles de las torres de AEMET en Jumilla y Calasparra en 2010. Ambas muestran circulaciones de componente sur en la franja interior al este de Caravaca para los días de superación en esta estación (figura 28).

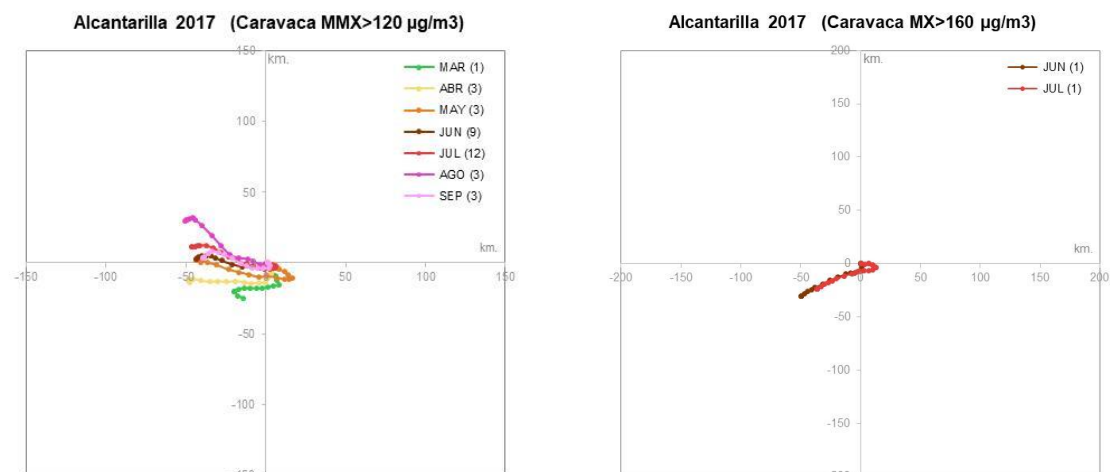


Figura 27: Composición vectorial de los datos de viento en Alcantarilla para los días de superación del V.O y de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Caravaca en 2017. Las trayectorias del viento se dirigen respectivamente al O-ONO y SO.

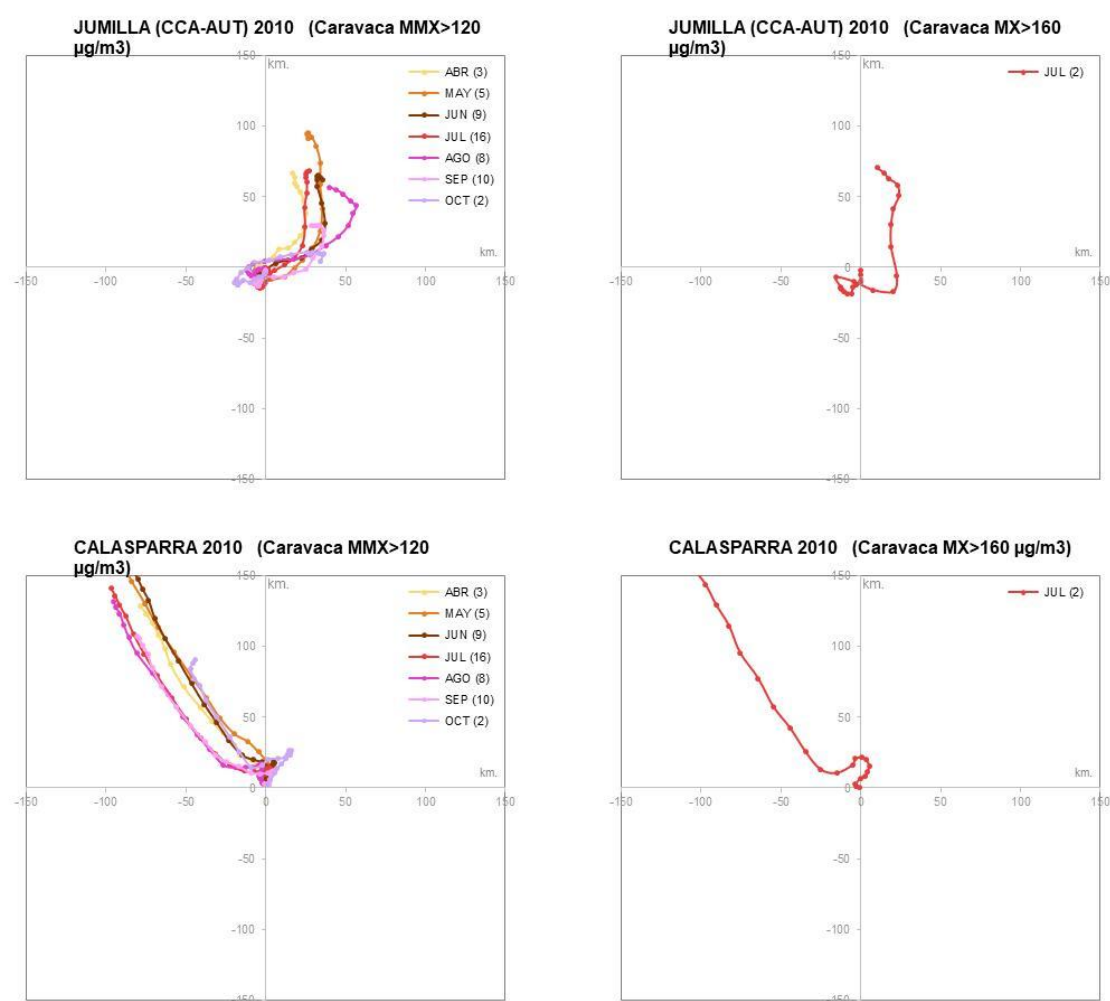


Figura 28: Composición vectorial de los datos de viento en Jumilla y Calasparra para los días de superación del V.O y de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Caravaca en 2010. Las trayectorias del viento se dirigen al N en Jumilla y al NO en Calasparra.

En cuanto a Alcantarilla los días de niveles altos registran las concentraciones máximas a las 12:00-13:00 UTC con circulación del E y velocidades moderadas (antes de que estas alcancen el máximo y el viento tienda a girar a SE). Este comportamiento sugiere una importante componente local en los niveles de ozono que se suma a las concentraciones que puedan entrar desde la Vega Baja de Alicante (figura 29). En cuanto a la componente local, su proximidad y posición a sotavento de la propia población de Alcantarilla y de la ciudad de Murcia, y la existencia de focos industriales del sector químico en la zona (emisiones de VOCx), proporcionan una mezcla de precursores que favorece la formación de ozono en el entorno próximo a las emisiones.

Por último en San Basilio los registros para días de niveles elevados muestran un comportamiento similar a Alcantarilla, aunque en esta estación como se ha visto anteriormente, estas situaciones están asociadas en gran medida al efecto fin de semana (figuras 3 y 25). Prácticamente la mitad de superaciones del VO se producen en sábados y domingos.

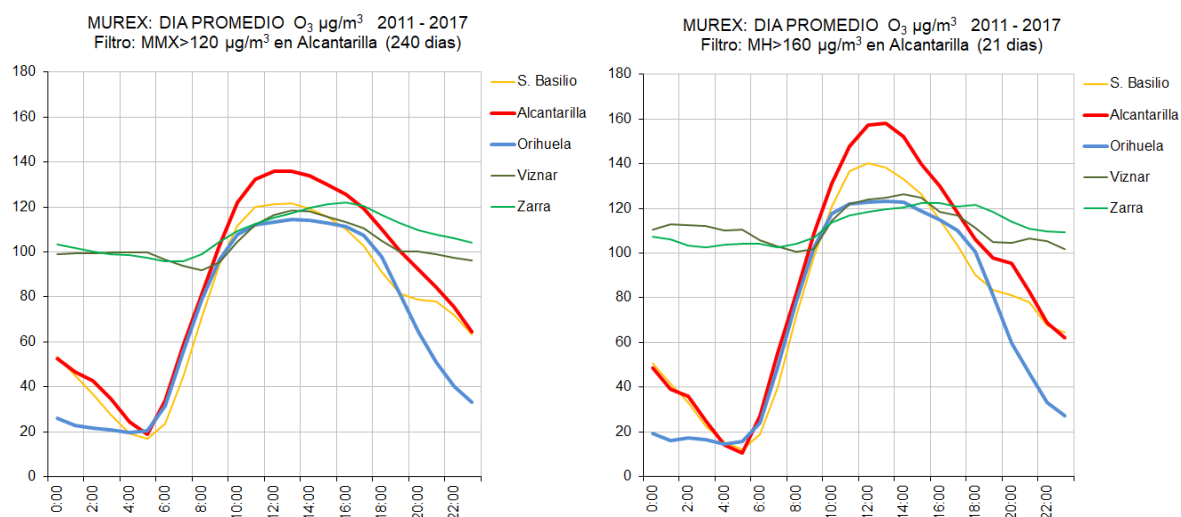


Figura 29: Perfiles promedio diario para los días de superación del V.O. (izquierda) y del valor $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mh (derecha) en Alcantarilla en el periodo 2011-2017. Los registros de Orihuela muestran una componente significativa de ozono que penetra desde el sur de Alicante (que será una suma de ozono recirculado en la costa, niveles de fondo y ozono producido a partir de las emisiones en esta zona). Por su parte los registros de Viznar y Zarra de la red EMEP, representativos a los niveles de fondo en el SE peninsular, muestran niveles máximos semejantes a Orihuela.

Ambos casos, Alcantarilla y San Basilio, ponen de manifiesto que, por un lado, la contribución a los niveles de ozono de componentes de escala mayor a la local (niveles de fondo junto con ozono recirculado de origen mediterráneo), y por otro, el incremento de ozono en el área urbana de Murcia a causa de las reducciones de emisiones de precursores el fin de semana, plantean problemas a la hora de diseñar medidas de reducción a escala local.

IV. POSIBILIDADES DE EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL OZONO SOBRE LA VEGETACIÓN EN LA REGIÓN DE MURCIA.

El principal objetivo la presente sección no es realizar una evaluación de los efectos del ozono sobre la vegetación en la Región de Murcia sino evaluar la posibilidad potencial de llevar a cabo este tipo de estudio en base a la observación en campo de daños visibles y de la estimación de las excedencias de los niveles críticos de ozono. En esta sección, en primer lugar, se introducen aspectos generales sobre los efectos del ozono sobre la vegetación. Le sigue un apartado en el que se discuten los daños visibles causados en las hojas de las plantas por este contaminante, y se recomiendan algunas plantas sensibles presentes en la zona como posibles indicadoras de impactos del ozono. Finalmente, se recopila la información existente sobre niveles críticos de vegetación que podrían ser aplicados en la Región de Murcia.

6. Efectos del ozono sobre la vegetación.

Los efectos del ozono sobre las plantas se han documentado en multitud de estudios, muchos de ellos realizados en condiciones controladas. El ozono entra en las hojas a través de los estomas y produce una serie de efectos que van desde alteraciones fisiológicas a daños visibles o reducciones en el crecimiento de las plantas, cuando los mecanismos de defensa y de reparación se ven superados.

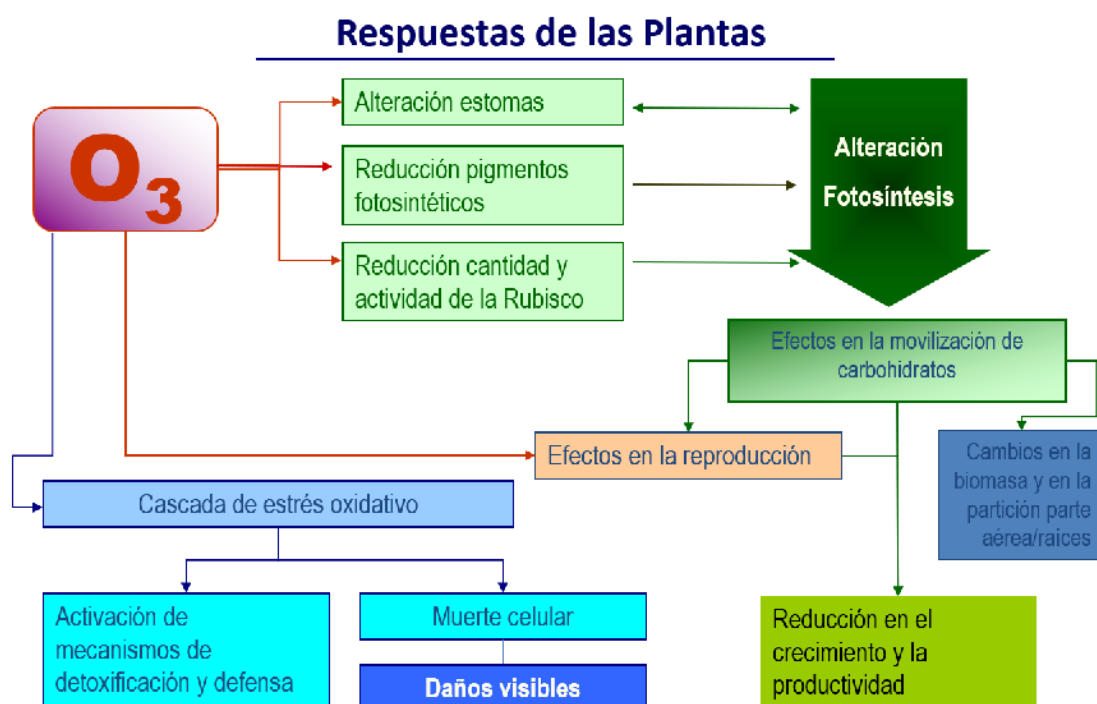


Figura 30: Esquema de los efectos del ozono sobre la vegetación.

Algunos de los primeros efectos que se observan se presentan a nivel fisiológico. El ozono afecta principalmente a la fotosíntesis a través de varios mecanismos. Diversos estudios han encontrado que la Rubisco (el enzima responsable de la fijación del carbono en la fase oscura de la fotosíntesis) se ve afectada inicialmente, lo que produce una bajada en la asimilación de CO₂ por la planta. El ozono, además, produce una degradación de los pigmentos fotosintéticos que también limita la actividad fotosintética. También se ha documentado un cierre de los estomas o una mala regulación del intercambio de vapor de agua en plantas que crecen bajo niveles elevados de ozono. Este efecto puede estar causado por una acción directa de este contaminante sobre los estomas como a través de un aumento del CO₂ intracelular (causado por la disminución en la actividad de la Rubisco) que favorece un mayor cierre estomático. Al final, las plantas sensibles afectadas por concentraciones elevadas de ozono presentan una disminución en la asimilación de CO₂ que repercutirá en una mejor fijación de carbono y producción de carbohidratos. Otro efecto frecuentemente observado es una menor eficiencia del uso del agua respecto al CO₂ asimilado (WUE, Water Use Efficiency, por sus siglas en inglés).

Tras la entrada en la hoja, el ozono acaba produciendo especies de oxígeno reactivo (ROS, por sus siglas en inglés) que incluyen iones de oxígeno, radicales libres y peróxidos tanto inorgánicos como orgánicos. Estos ROS causan daños celulares y también activan los mecanismos de detoxificación y defensa de las plantas como es el caso de la producción de moléculas antioxidantes como el ácido ascórbico o la activación de enzimas antioxidantes (catalasas, peroxidasas...), lo que supone un gasto energético para la planta. En algunas especies se observa una acumulación de taninos y de calosa, una sustancia que también se acumula como respuesta a los daños mecánicos, o de ataques de insectos u hongos. A nivel celular este contaminante causa alteraciones anatómicas características. La zona más alterada de las hojas suele ser el parénquima en empalizada, la parte más activa en la fotosíntesis. Se produce una degeneración de los cloroplastos y el tonoplasto de las vacuolas se altera. Las paredes celulares se degradan, acumulándose sustancias pépticas que forman como pequeñas gotas en las paredes celulares. En un estadio más avanzado, las células del parénquima en empalizada colapsan, aumentan los espacios intercelulares, y los daños son visibles externamente. También hay alteraciones secundarias en el floema de los haces vasculares: la forma de las células de este tejido se modifica y se depositan sustancias que dificultan la circulación de la savia. Frecuentemente, las hojas afectadas por estos procesos se desprenden antes que en las plantas que crecen en condiciones con niveles bajos de ozono y en general se acelera la senescencia de las hojas.

La menor síntesis de carbohidratos repercute en un menor crecimiento de las plantas y su productividad. En los árboles, el crecimiento y la producción pueden disminuir, y en un número considerable de estudios se observa que los efectos son proporcionalmente mayores en las raíces que en la parte aérea. En los cultivos sensibles disminuye la producción y la calidad de los frutos. Estas reducciones en el crecimiento pueden producirse sin que haya daños visibles en las hojas.

Finalmente, en la vegetación natural, el estrés crónico producido por el ozono podría favorecer el ataque de diferentes patógenos en las plantas que son más sensibles. También favorecería la predominancia de los genotipos más resistentes de las diferentes especies, e incluso potenciar los cambios en las comunidades a favor de las especies más resistentes.

6.1. Daños visibles por ozono.

Dado que el ozono no se acumula en las hojas, al contrario que otros contaminantes como el dióxido de azufre o los fluoruros, la única manera de identificar zonas con impactos por este contaminante es la observación de daños visibles en plantas sensibles. La observación de daños visibles se ha incorporado en programas internacionales como el Forest Health Monitoring en Estados Unidos o el ICP-Forest, que coordina una red europea de salud forestal, incluyendo España. Otro programa internacional, el ICP-Vegetation, ha realizado observaciones no sistemáticas de daños por ozono en cultivos, encontrando diversas especies que mostraban síntomas en todo el levante de la Península Ibérica. El ozono causa daños típicos en las hojas. Las hojas jóvenes están siempre menos afectadas. En las plantas de hoja ancha, el ozono, típicamente produce pequeñas punteaduras necróticas (“stippling”, de color amarillo, marrón o rojizo) que normalmente afectan sólo al haz de las hojas, y no se presentan en el envés excepto en casos de daño severo. Las punteaduras están relativamente mal delimitadas, al contrario que las manchas causadas por insectos u hongos. Los nervios permanecen verdes, y no son atravesados por estas punteaduras. Para ser daños por ozono, la observación al microscopio puede ser de ayuda, si se confirma que los daños afectan al parénquima en empalizada y no son simplemente superficiales (restringidos a la epidermis). En coníferas, los daños típicos por ozono son un moteado clorótico difuso que afecta a las acículas más viejas. Para más información, en la web www.ozoneinjury.org, desarrollada por la Fundación CEAM, se muestran fotos de daño por ozono en diversas especies, tanto inducidos experimentalmente como observados en el campo.

En Europa, la zona donde los daños son más abundantes es el sur de Suiza i el norte de Italia, lo que coincide con la presencia de niveles elevados de ozono y de una vegetación que incluye un número abundante de especies sensibles, que además disponen de agua en abundancia. En las zonas más secas, como en buena parte de la Península Ibérica, la presencia de síntomas está menos extendida, por diversos motivos. Las plantas esclerófilas están adaptadas a resistir mejor el estrés. Algunas de estas plantas presentan un sistema de antioxidantes más eficiente para combatir estreses como la sequía, la fuerte radiación solar, y también el ozono. Por otro lado, frente a una situación de estrés hídrico, las plantas cierran los estomas y por tanto reducen el ozono que la planta toma de la atmósfera, y en consecuencia los daños producidos por este contaminante.

A continuación, se incluyen fotos de algunas plantas en las que es posible observar daños en el mediterráneo y que podrían ser de interés para realizar observaciones de campo en la Región de Murcia. Cabe señalar que la observación de síntomas de ozono en el campo es complicada ya que los síntomas se pueden confundir con los causados por otros factores. Es por ello que hay siempre un cierto nivel de incertidumbre en la asignación de los daños de campo a este contaminante.

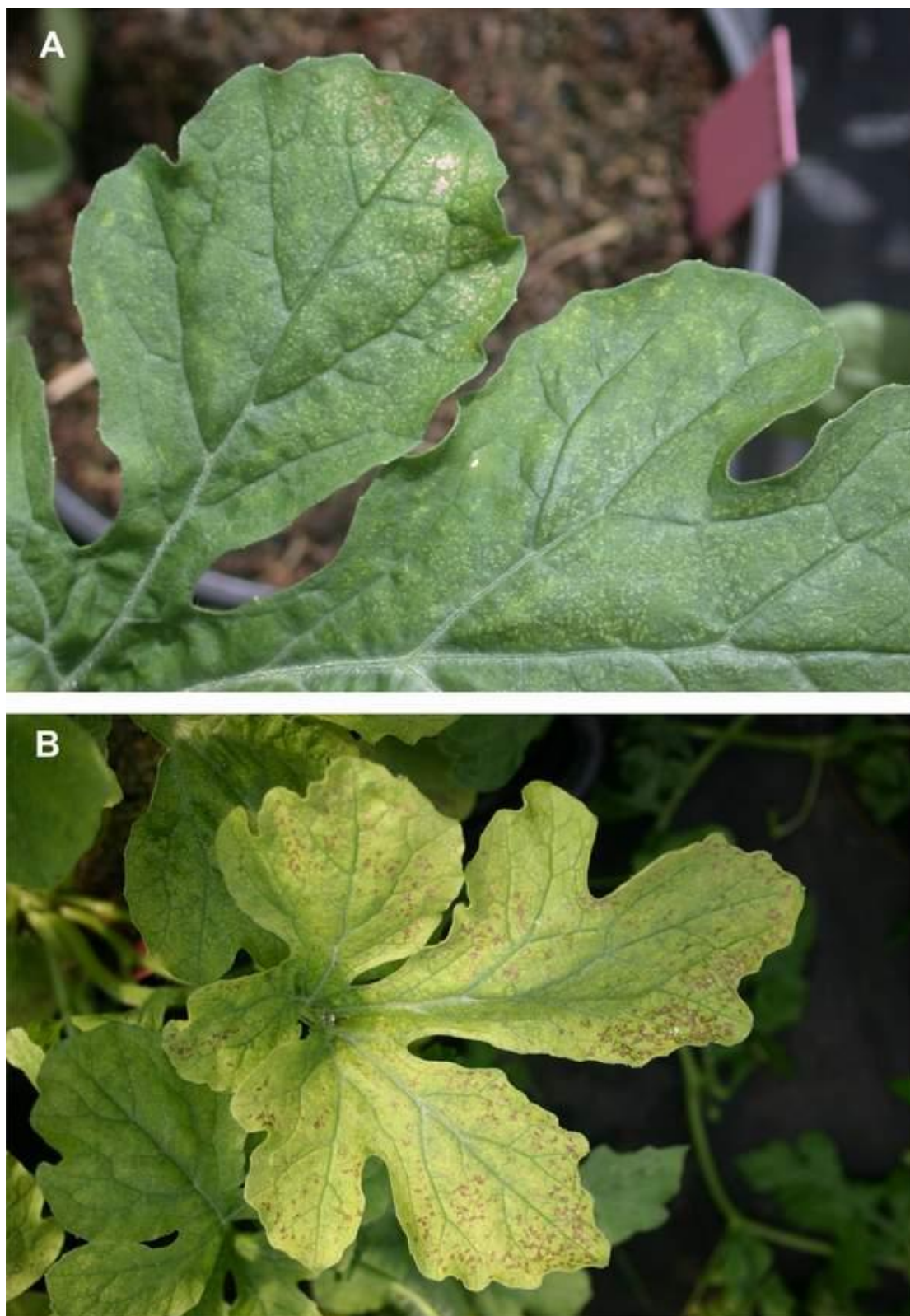


Figura 31: Daños por ozono en sandía reproducidos en condiciones controladas (fuente: CEAM)

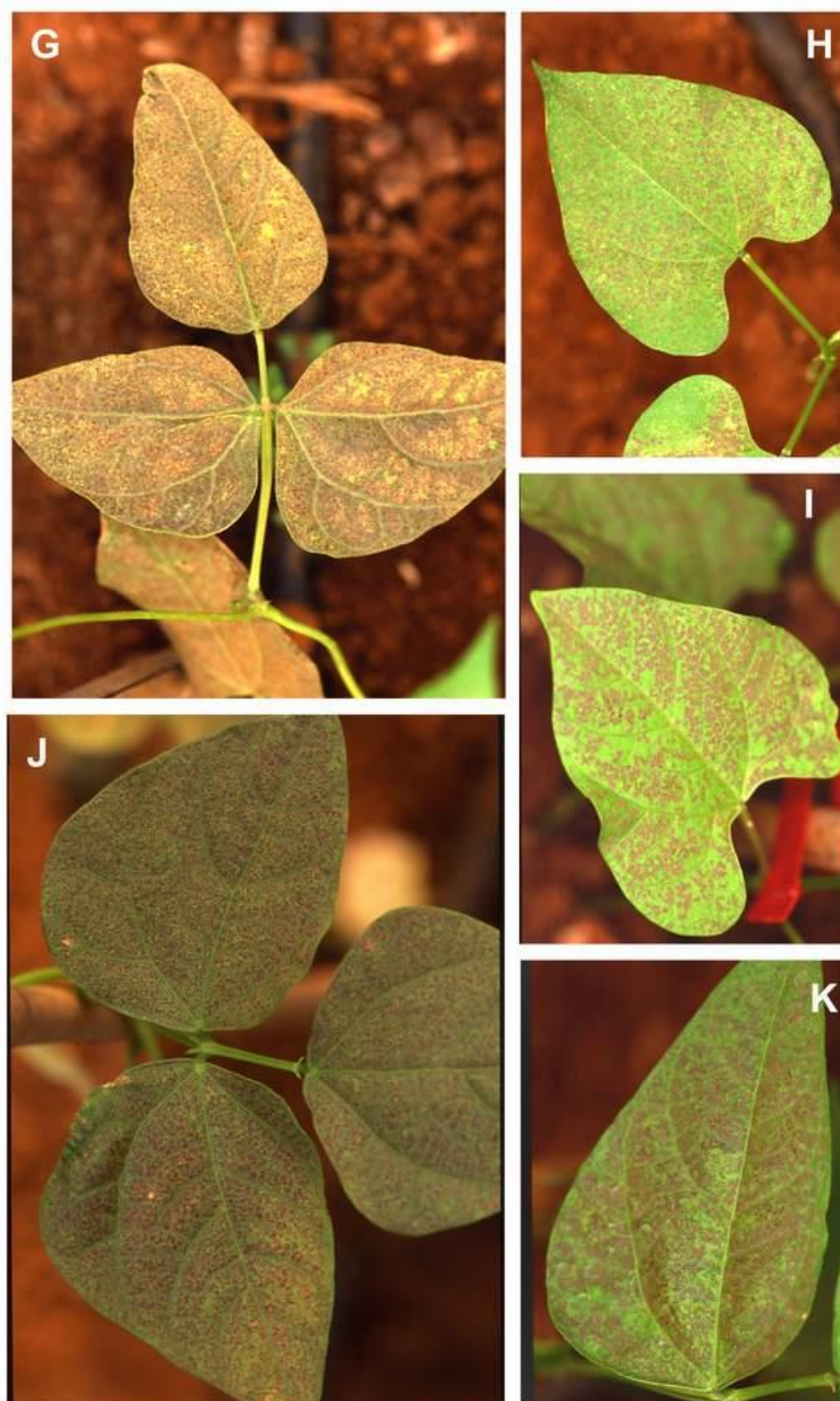


Figura 32: Daños por ozono en judía reproducidos en condiciones controladas (fuente: CEAM)



Figura 33: Daños por ozono en tomate reproducidos en condiciones controladas (fuente: CEAM)



Figura 34: Daños por ozono en patata reproducidos en condiciones controladas (fuente: CEAM)

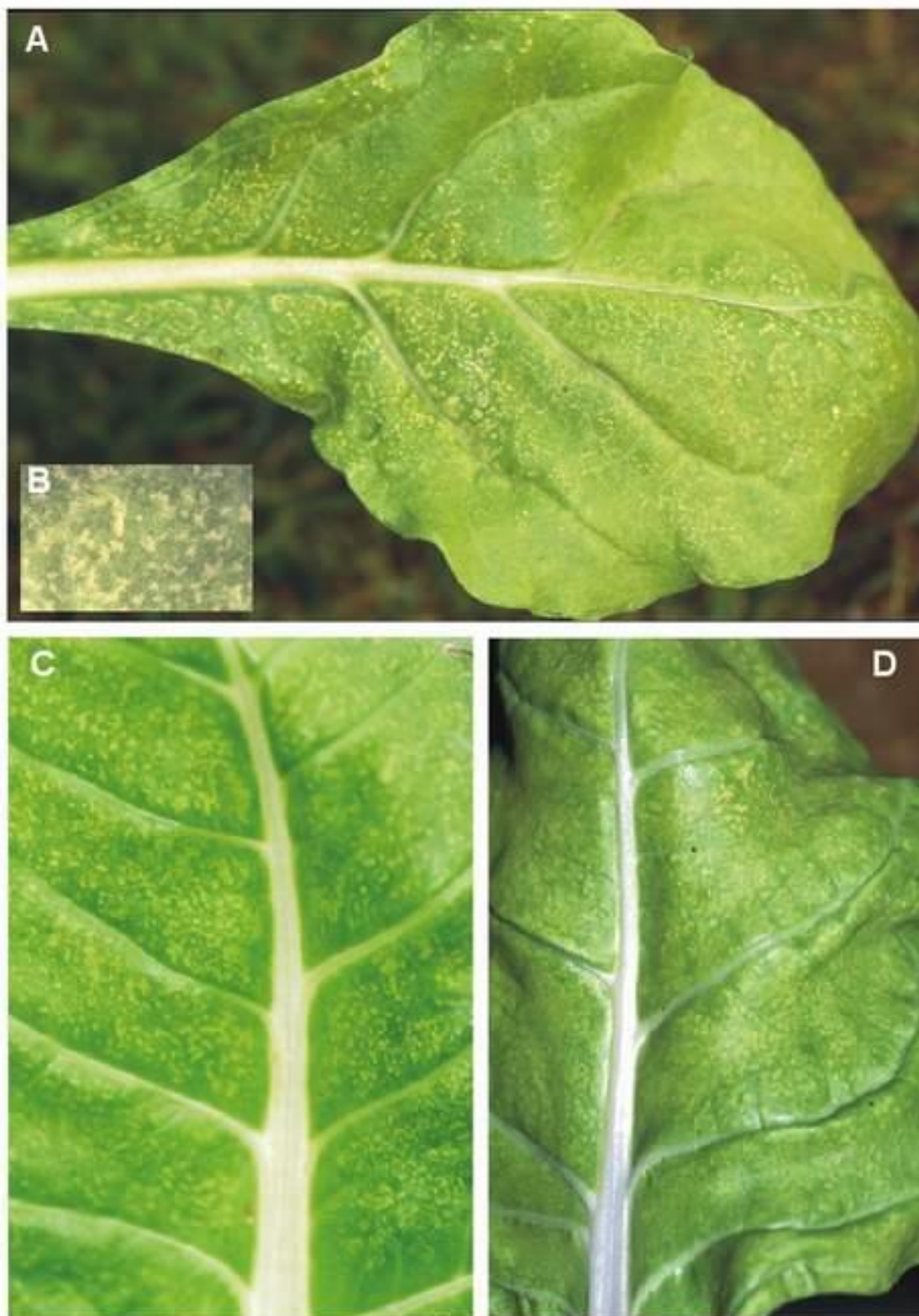


Figura 35: Daños por ozono en acelga reproducidos en condiciones controladas (fuente: CEAM)



Figura 36: Daños por ozono en Hibisco reproducidos en condiciones controladas (fuente: CEAM)



Figura 37: Daños por ozono en Ailanto reproducidos en condiciones controladas (fuente: CEAM)



Figura 38: Daños por ozono en pino carrasco reproducidos en condiciones controladas (fuente: CEAM)



Figura 39: Daños por ozono en morrionera reproducidos en condiciones controladas (fuente: CEAM)

7. Evaluación de riesgos para la vegetación

Si bien la observación de daños por ozono es una evidencia de que este contaminante produce efectos en las plantas, la evaluación de los impactos de este contaminante en términos de productividad se lleva a cabo utilizando funciones de respuesta. Estas funciones se establecen normalmente en base a resultados de experimentos llevados a cabo en condiciones controladas, típicamente en Cámaras de Techo Descubierta (OTCs, por sus siglas en inglés). En estas cámaras se exponen las plantas a diferentes concentraciones de ozono. Normalmente existe un tratamiento de aire filtrado, con valores de ozono por debajo de los ambientales, un tratamiento de aire no filtrado (concentraciones ambientales) y uno o varios tratamientos en los que se incrementan las concentraciones ambientales de ozono. Las métricas de ozono utilizadas para las funciones de respuesta pueden basarse en la exposición (exposición-respuesta) o en el flujo estomático de ozono (dosis-respuesta). Dependiendo del tipo de planta que se exponga al ozono, la variable de respuesta de interés varía. Así, mientras que en los árboles forestales son de especial relevancia los efectos sobre la biomasa (productividad) o las tasas de crecimiento, en los cultivos importa principalmente la producción y calidad de los frutos o grano. En la vegetación herbácea natural, la producción de semillas es un parámetro relevante, ya que afecta al mantenimiento de las poblaciones. Por tanto, en condiciones experimentales se establecen relaciones de las variables de respuesta de interés con diferentes métricas del ozono y a partir de las funciones establecidas se pueden evaluar los riesgos por este contaminante de los diferentes tipos de vegetación.

- **Métrica basada en la concentración de ozono en el aire: AOT40**

Una de las métricas más utilizadas para el ozono es el AOT40. Es un índice de exposición acumulado por encima de un valor umbral. El umbral se establece al comprobarse la mayor importancia de las concentraciones en el desarrollo de los daños a la vegetación y se considera que por debajo de ese umbral no se producen daños. El AOT40 se define como la suma de las excedencias horarias de ozono sobre los 40 ppb durante las horas del día durante un periodo de acumulación que depende del tipo de vegetación, 3 o 3,5 meses para los cultivos, 6 y 3 meses para vegetación herbácea seminatural perenne y anual respectivamente, y la estación de crecimiento para los árboles. La directiva europea 2008/50/CE establece que, durante el día, estos valores sobre 40 ppb se han de considerar únicamente entre las 8:00 y las 20:00 CET. En el marco del Convenio de Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia (CLRTAP, por sus siglas en inglés), sin embargo, el periodo de acumulación diario se establece entre las horas en que la radiación global $>50 \text{ W m}^{-2}$.

- **Métrica basada en los flujos estomáticos de ozono: “Phytotoxic Ozone Dose” (PODY)**

Más recientemente se ha propuesto otro tipo de métrica basada en los flujos estomáticos de O_3 . Los efectos observados del ozono en la vegetación están más fuertemente relacionados con la captación de ozono a través de los estomas de las hojas que con la concentración de ozono en el aire alrededor de las plantas. Los estomas responden a las condiciones ambientales como la temperatura, la luz, el déficit de presión de vapor y la

humedad del suelo. Por este motivo, pueden darse situaciones con niveles elevados de ozono en el aire que concurren con condiciones (por ejemplo, un déficit hídrico elevado déficit de presión de vapor) en las que las plantas presenten los estomas cerrados, limitando los impactos del contaminante. Para estimar los flujos estomáticos de ozono se utiliza el modelo multiplicativo DO3SE, que tiene en cuenta la variación en la apertura y el cierre de los estomas con factores climáticos, del suelo y fenológicos a través de diversas funciones. Aplicando este modelo, al final se calculan los flujos estomáticos acumulados sobre un umbral Y (Phytotoxic Ozone Dose over a Threshold Y, PODY) durante un periodo de acumulación que es diferente para cada tipo de vegetación. Estos flujos sirven para establecer relaciones dosis-respuesta con las variables de respuesta relevantes para cada tipo de vegetación, de igual manera que con el AOT40.

7.1. Niveles críticos de ozono relevantes para la vegetación mediterránea.

A partir de las relaciones exposición- y dosis-respuesta, basadas en las métricas AOT40 y PODY se han propuesto diversos niveles críticos para la protección de la vegetación. En la directiva 2008/50/CE se establecen unos valores objetivo para la protección de la vegetación, en un AOT40=18 000 $\mu\text{g m}^3 \text{ h}$ promediados en un período de cinco años, con un periodo de acumulación de mayo a julio. Además, se establece un valor objetivo a largo plazo para la protección de la vegetación en un AOT40=6 000 $\mu\text{g m}^3 \cdot \text{h}$, sin definir la fecha en el que este objetivo más estricto debería cumplirse. Por otra parte, el CLRTAP ha establecido diversos niveles de ozono para la protección de los diferentes tipos de vegetación. Estos niveles se resumen en la Tabla 2. El periodo de acumulación varía desde los 3 meses de los cultivos agrícolas a toda la estación de crecimiento en el caso de los árboles.

Tipo de vegetación	Efecto (reducción)	Efecto potencial al nivel crítico	Nivel crítico
Cultivos agrícolas	Producción	5%	AOT40=3000 ppb h (3 meses)
Cultivos hortícolas	Producción	5%	AOT40 AOT40=6000 ppb h (3,5 meses)
Vegetación herbácea perenne seminatural	Crecimiento	10%	AOT40 AOT40=5000 ppb h (6 meses)
Vegetación herbácea anual seminatural	Crecimiento y/o producción semilla	10%	AOT40=3000 ppb h (3 meses o ciclo vital)
Árboles	Crecimiento	5%	AOT40=5000 ppb h (estación crecimiento)

Tabla 2: Niveles críticos de ozono establecidos en el CLRTAP para los diferentes tipos de vegetación

Para el caso específico de la Región de Murcia, se podrían calcular todos estos niveles críticos en base a los datos de las estaciones de calidad del aire. Sin, embargo, por tratarse de una zona seca, es probable que la estimación de los efectos del ozono en el

crecimiento o la productividad de la vegetación en base al AOT40 sobreestime los impactos. En zonas secas y cálidas, las plantas tienden a cerrar los estomas a mediodía, justo cuando los niveles de ozono son altos. Por tanto, niveles elevados de ozono en el aire no implican necesariamente que el ozono que alcanza los tejidos de las plantas a través de los estomas sean necesariamente altos, por verse los flujos estomáticos reducidos. Por esta razón sería más conveniente que los riesgos del ozono se establecieran también en base a la metodología de los flujos. En la siguiente tabla, tomada del Manual LRTAP (2017) se indican los diferentes tipos de vegetación para los que hay parametrizaciones del modelo DO3SE disponibles (Tablas 4 y 5) y que por tanto se podrían aplicar en la zona. Una limitación es que en algunas de las parametrizaciones hace falta el contenido de agua del suelo, lo que se podría obtener de modelos.

Tipo de cultivo	Efecto (reducción)	Efecto potencial al nivel crítico	Nivel crítico
Tomate	Producción	5%	POD6=2.0
Tomate	Calidad fruto	5%	POD6=3.8
Trigo	Producción grano	5%	POD6=1.3
Trigo	Peso de 1000-gramos	5%	POD6=1.5
Trigo	Producción de proteína	5%	POD6=2.0
Patata	Producción	5%	POD6=2.0

Tabla 3: Niveles críticos de ozono para cultivos considerados en el Manual LRTAP (2017)

Tipo de vegetación	Efecto (reducción)	Efecto potencial al nivel crítico	Nivel crítico
Especies deciduas	Biomasa total	4%	POD6=10.4
Especies perennes	Biomasa total	4%	POD6=47.3

Tabla 4: Niveles críticos de ozono para árboles considerados en el Manual LRTAP (2017)



IV. RESUMEN Y CONCLUSIONES.

El ozono troposférico es un contaminante secundario de origen fotoquímico, formado a partir de sus precursores; Óxidos de Nitrógeno (NO_x, que incluye el óxido y el dióxido de nitrógeno, NO y NO₂) y Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), en presencia de radiación solar. Los NO_x son de origen fundamentalmente antropogénico, cuya mayor contribución proviene de los procesos de combustión del transporte y la industria, y los COVs incluyen gran variedad de especies tanto de origen antropogénico como natural (emisiones de la vegetación).

Este estudio se ha basado en el análisis de los datos históricos registrados por la RVCARM y las estaciones de las provincias limítrofes en el periodo 2008-2018. El análisis de la dinámica del ozono en la Región de Murcia con la metodología aplicada tiene limitaciones debido a la concentración de las estaciones en pocos puntos del territorio (Cartagena-Escombreras, Murcia-Alcantarilla, Lorca y Caravaca), y a la compleja orografía, que dificulta la identificación de la continuidad de las circulaciones de viento. Por otra parte los datos procedentes de las campañas con la Unidades Móviles no han sido de mucha ayuda, ya que estas se han llevado a cabo preferentemente en invierno (orientadas a la vigilancia de las quemas agrícolas), cuando menos relevantes son los niveles de ozono. Hay que señalar además que en la fase previa de depuración de datos se ha anulado un 3.5% de los datos de ozono de la red, y se ha corregido la serie de Lorca entre diciembre de 2009 y enero de 2014, periodo en que los registros están afectados por un offset de aproximadamente 20 µg/m³.

En todo caso, el análisis sistemático de los datos ha permitido la caracterización de los aspectos más importantes de la dinámica del ozono en la Región de Murcia: patrones espacio-temporales, rutas de transporte de la masa aérea en situaciones de niveles elevados de ozono, identificación de las zonas de mayor impacto de este contaminante y de fuentes significativas de emisiones en la Región de Murcia. Además se ha analizado la contribución de concentraciones que se añaden a la producción fotoquímica del día, y que provienen de la recirculación de la masa aérea en el mediterráneo y de niveles de fondo a mayor escala. Esta componente, no asignable a ninguna fuente identificable, limita el margen de maniobra para reducir los niveles de ozono en base a medidas de control de las emisiones locales, y dificulta el cumplimiento del Valor Objetivo de Protección a la Salud (120 µg/m³ como promedio de 8 horas que no han de superarse más de 25 días al año como promedio de los 3 últimos años).

Las principales conclusiones del estudio son las que se enumeran a continuación:

- Los niveles de ozono registrados por la RVCARM se encuentran en rangos similares a los de las estaciones de las provincias colindantes. Alcantarilla, especialmente entre mayo y septiembre, destaca en la parte alta del rango, junto con Bedar (Almería), Viznar (Granada), Fuentezuelas (Jaén), Onteniente y Zarra (Valencia).
- Las concentraciones elevadas están asociadas fundamentalmente a situaciones anticiclónicas de primavera y verano, a menudo con la formación de la baja térmica ibérica. Estas condiciones dan lugar a cielos despejados, altas temperaturas y desarrollo de circulaciones de mesoescala, factores que favorecen tanto la

formación como la acumulación de ozono en días sucesivos, mientras se mantengan las condiciones. Como consecuencia de dicha acumulación la mayor parte de superaciones del valor $120 \mu\text{g}/\text{m}^3(\text{m}8\text{h})$ se produce durante periodos de varios días de incremento gradual de las concentraciones.

- Estos periodos de recarga o acumulación de ozono se observan de forma simultánea en estaciones de la Región de Murcia y de las provincias colindantes. No se trata por tanto de una situación que afecta de forma aislada o independiente al territorio de la RM, sino que tiene lugar a una escala mayor.
- En varias estaciones de la RVCARM los niveles máximos en primavera y verano se encuentran a menudo muy cercanos a los $120 \mu\text{g}/\text{m}^3(\text{m}8\text{h})$. Esto hace que el número de superaciones anuales de este valor, y por tanto la superación del V.O., dependa mucho del número de situaciones favorables a la formación y acumulación de ozono que se puedan dar en el año, el cual está sujeto a ligeras variaciones interanuales.
- En el periodo 2008-2018 la RVCARM solo ha registrado 4 superaciones del Umbral de Información ($\text{mh} > 180 \mu\text{g}/\text{m}^3$), la última de ellas en Alcantarilla en 2012. Por su parte las superaciones del valor $120 \mu\text{g}/\text{m}^3(\text{m}8\text{h})$ afectan todos los años a la mayor parte del territorio.
- Caravaca, Alcantarilla y San Basilio registran las superaciones del valor $120 \mu\text{g}/\text{m}^3(\text{m}8\text{h})$ y del valor de referencia $160 \mu\text{g}/\text{m}^3(\text{mh})$ bajo circulación del E, y Lorca y La Aljorra lo hacen con viento del sur.
- En Lorca la circulación del S puede estar favorecida por la convergencia de los vientos del SO, desde el Valle de Almanzora en Almería, y los del ENE desde Murcia-Alcantarilla. Se puede presumir que, aparte de la componente local que pueda formarse a partir de las emisiones propias de Lorca, la circulación proveniente de Murcia-Alcantarilla tendrá una mayor contribución a los niveles de ozono que la circulación procedente del SO, donde no hay áreas importantes de emisión.
- Los resultados de La Aljorra sugieren el transporte atmosférico hacia este punto de ozono formado a partir de emisiones de la zona de Cartagena-Escombreras bajo condiciones meteorológicas que favorecen las brisas de la costa sur frente a las de la costa este, en general más frecuentes.
- En el caso de Caravaca puede descartarse una componente local significativa. El retraso en el registro del pico de máximas concentraciones indica el transporte hasta este punto de ozono con procedencia del este. Los datos meteorológicos disponibles no permiten confirmar el origen probable de este aporte en el área Murcia-Alcantarilla en un recorrido directo o indirecto, ya sea a través del valle del Segura pasando por Cieza, o a través del Valle del Guadalentín y ascendiendo posteriormente hacia el interior.
- En Alcantarilla los días de niveles altos registran las concentraciones máximas a las 12:00-13:00 UTC con circulación del E y velocidades moderadas (antes de que estas alcancen el máximo y el viento tienda a girar a SE). Este comportamiento sugiere una importante componente local en los niveles de ozono que se suma a las concentraciones que puedan entrar desde la Vega Baja de Alicante. En cuanto a la

componente local, su proximidad y posición a sotavento de la propia población de Alcantarilla y de la ciudad de Murcia, y la existencia de focos industriales del sector químico en la zona (emisiones de VOCx), proporcionan una mezcla de precursores que favorece la formación de ozono en este emplazamiento.

- La reducción de las emisiones durante el fin de semana se traduce en una reducción en el número de superaciones del valor $120 \mu\text{g}/\text{m}^3(\text{m}8\text{h})$ en las zonas rurales y suburbanas poco afectadas por emisiones próximas. La reducción viernes-domingo es del 53% en Caravaca y del 40% en Lorca.
- Como contrapartida, la química no lineal del ozono provoca los fines de semana el aumento de los niveles y las superaciones en las áreas urbanas origen de estas emisiones ("efecto fin de semana"). Dentro de la RVCARM este aumento se observa en la estación de San Basilio, donde el número de superaciones del valor $120 \mu\text{g}/\text{m}^3(\text{m}8\text{h})$ se duplica los fines de semana respecto a los días laborables.
- Los niveles de ozono incluyen en general una componente de fondo significativa, para la que se requieren estudios específicos, en base a herramientas de modelización que permitan su cuantificación y una mejor identificación de su origen/es. La reducción de esta componente, suma a su vez de varias contribuciones (recirculación en el la cuenca mediterránea occidental y niveles de fondo a mayor escala), se encuentra fuera del margen de maniobra de los gestores de la calidad del aire de la Región de Murcia, y requiere por tanto medidas a escala nacional e internacional.
- En base a la experiencia adquirida en otras zonas del mediterráneo, las plantas que pueden presentar un mayor potencial para detectar impactos del ozono mediante la observación de daños visibles en el campo serían: 1) cultivos sensibles como el tomate, la patata, la acelga, la sandía o las judías; 2) plantas silvestres como la morrionera y el pino carrasco; 3) plantas ornamentales como el hibisco y el árbol del cielo. Con todo, cabe señalar que la incertidumbre asociada a la observación de estos daños en el campo puede ser alta.
- Por lo que respecta a los niveles críticos de ozono, cabe señalar que en la región de Murcia las plantas pueden crecer en condiciones en los que el agua es limitada y se presenta un déficit de presión de vapor elevado, lo que favorece el cierre estomático. Estas condiciones podrían por tanto limitar el impacto de los niveles ambientales de ozono existentes en la zona sobre determinados tipos de vegetación, especialmente si no está regada. Dado que los niveles críticos de ozono basados en los flujos estomáticos (Phytotoxic Ozone Dose, POD) tienen en cuenta los efectos de las diferentes condiciones ambientales en la absorción de ozono por parte de la planta, se considera que, de cara a un futuro estudio, estos niveles críticos son más adecuados para la estimación de los riesgos en la Región de Murcia que los basados en la exposición al ozono (AOT40).



V. BIBLIOGRAFIA

- CEAM (2009) *Estudio y Evaluación de la contaminación atmosférica por ozono troposférico en España. Informe final.*
- CEAM (2010) Manual del procedimiento de validación de datos de la R.A.V.C.A. de la Comunidad Valenciana. Preparado para la DG Cambio Climático de la Cons. MAAUH de la G.V.
- CEAM (2014) Informe Proyecto CONOZE. Contaminación por Ozono en España.
- Comisión europea (2013) *Comunicación de la Comisión al Parlamento europeo, al Consejo, al Comité económico y social europeo y al Comité de las regiones. Programa «Aire Puro» para Europa.*
- Comisión europea (2013b) Research Findings in support of the EU Air Quality. Review
- Cristofanelli P., Bonasoni P. (2009) *Background ozone in the southern Europe and Mediterranean area: Influence of the transport processes.* Environmental Pollution 157, 1399-1406.
- Derwent R.G, Davies T.J. (1994) *Modelling the impact of NOx or hydrocarbon control on photochemical ozone in Europe,* Atmospheric Environment 28, 2039-2052
- Derwent R. G. (2008), New Directions: Prospects for regional ozone in northwest Europe, Atmospheric Environment, 42:1958-1960
- Diéguez J.J., Palau J.L., Perez-Landa G., Stein A., Millán M.M. (2004) Guidelines on the output from the UAQIFs for the Castellón area, Spain.- FUMAPEX Guidelines of output from UAQIFs as specified by end-users Ed: Leiv Havard Slordal- Norwegian Institute for Air Research (NILU) ISBN: 82-425-1532-8 Norway
- EEA (2018). *Air Quality in Europe-2018 Report.* EEA Report Nº12/2018
- Environment and Systems, 1999. *Photochemical pollution in the Basque Country Autonomous Community.* Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente.
- Forster P., et al (2007). *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.* In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Fiore et al. (2009) *Multimodel estimates of intercontinental source-receptor relationships for ozone pollution.* Journal Of Geophysical Research, VOL. 114, D04301
- Gangoiti G., et al. (2001) *Long-range transport and re-circulation of pollutants in the western Mediterranean during the project Regional Cycles of Air Pollution in the West-Central Mediterranean Area.* Atmospheric Environment, 35, 6267–6276
- Gangoiti G., et al. (2002) *Regional transport of pollutants over the Bay of Biscay: analysis of an ozone episode under a blocking anticyclone in west-central Europe,* Atmos. Environ., 36, 1349–1361,

IPCC (2007) *Climate Change 2007: Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.

Jaffe, DA, et al. 2018. Scientific assessment of background ozone over the U.S.: Implications for air quality management. *Elem Sci Anth*, 6: 56. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.309>

Jiménez P., et al. (2006) *Multiscale modeling of air pollutants dynamics in the northwestern Mediterranean basin during a typical summertime episode*. *Journal Of Geophysical Research*, 111, D18306

Langner J., et al (2012) *A multi-model study of impacts of climate change on surface ozone in Europe*. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 10423–10440

Lelieveld J., Dentener F.J. (2000) *What controls tropospheric ozone?* *Journal Of Geophysical Research*, 105, D3, 3531-3551

Lelieveld (2002) *Global Air Pollution Crossroads over the Mediterranean*. *Science* Vol. 298 nº 5594, 794-799.

LRTAP (2017) *Mapping Critical Levels for Vegetation, Chapter III of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends*. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. www.icpmapping.org.

McKendry I.G., Lundgren J. (2000) *Tropospheric layering of ozone in regions of urbanized complex and/or coastal terrain: a review*. *Progress in Physical Geography* 24 3

Millán M.M., et al. (1997) *Photo-oxidant dynamics in the Western Mediterranean in summer; Results of European research project*. *Journal Of Geophysical Research*, 102, D7, 8811-8823

Millán M.M., et al. (2000) *Ozone cycles in the western mediterranean basin: Interpretation of monitoring data in complex coastal terrain*. *Journal of Applied meteorology*, Vol.39, 487-508.

Millán M.M. (2009) *El ozono troposférico en el sur de Europa: Aspectos dinámicos documentados en proyectos europeos*. Documento adjunto al informe del contrato “Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por ozono troposférico en España”

MITECO (2018) *Evaluación de la calidad del aire en España 2017*

Parlamento y Comisión europea (2008) *Directiva europea 2008/50/CE relativa a la calidad del aire y a una atmósfera más limpia en Europa*.

Monks, PS, et al (2015) *Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer* *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol 15, no. 15, pp. 8889-8973

Pay M.T, et al (2017) *Ozone source apportionment during peak summer events over southwestern Europe* (under review for journal *Atmos. Chem. Phys.*)

Real Decreto 102/2011, *relativo a la mejora de la calidad del aire*.

Seinfeld J. H. and Pandis S. N. (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 1st edition. J. Wiley, New York.



Sillman S. (1999) *The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments*. Atmospheric Environment 33, 1821-1845

UNECE (2010) *Hemispheric transport of air pollution. Part A: Ozone and particulate matter*.

Velchev K., et al. (2011) Ozone over the Western Mediterranean Sea – results from two years of shipborne measurements. Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 675–688

WHO (2006). *Air Quality guidelines. Global Update 2005*.

WHO (2008), *Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution*.

WHO (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution-REVIHAAP. First Results*.



ANEXO I:

Resumen de la legislación vigente en materia de calidad del aire.

A nivel europeo la gestión de la calidad del aire tiene como referencia la **Directiva 2008/50/CE** del 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, transpuesta a la legislación española con el **R.D. 102/2011** del 28 de Enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. Esta norma recoge los principios básicos de una estrategia común en materia de calidad del aire en el ámbito de la UE, y sus objetivos se expresan en los seis puntos del Artículo 1, que en definitiva pueden resumirse en la formulación del quinto de ellos: "Mantener la calidad del aire, cuando sea buena, y mejorarla en los demás casos". Para alcanzarlo se requiere previamente la consecución de los dos primeros objetivos: "Definir y establecer objetivos de calidad del aire ambiente para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos sobre la población y el medio ambiente en su conjunto", y "Evaluar la calidad del aire en los estados miembros basándose en métodos y criterios comunes". Sobre la base de los cuales es posible abordar el control de la calidad del aire como plantea el tercer objetivo: "obtener información de la calidad del aire ambiente con el fin de ayudar a combatir la contaminación atmosférica y otros perjuicios, y controlar la evolución a largo plazo y las mejoras resultantes de las medidas nacionales y comunitarias". El cuarto objetivo es relativo a la difusión de la información: "asegurar que esa información sobre la calidad del aire ambiente se halla a disposición de los ciudadanos", y el sexto hace referencia a la necesidad de cooperación entre estados: "Fomentar el incremento de la cooperación entre los estados miembros para reducir la contaminación atmosférica".

Cualquier estrategia de control bien orientada deberá conducir al cumplimiento de estos seis objetivos, de acuerdo con los criterios también definidos en la misma directiva, y dentro de los plazos previstos.

Los objetivos de calidad del aire se establecen mediante **valores límite** y **valores objetivo**, definidos como concentraciones máximas para cada uno de los contaminantes contemplados en la norma: Dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x, suma de NO y NO₂), partículas de tamaño inferior a 10 y a 2.5 µm (PM₁₀ y PM_{2.5}), ozono (O₃), benceno (C₆H₆) y plomo (pb). El valor objetivo es equivalente al valor límite pero se admite la posibilidad de no alcanzarse¹³, y se establece para el ozono en virtud de su carácter de contaminante de naturaleza transfronteriza, y por tanto más difícilmente controlable por cada estado miembro

¹³ Valor límite: un nivel fijado basándose en conocimientos científicos, con el fin de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana, para el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza que debe alcanzarse en un período determinado y no superarse una vez alcanzado. Valor objetivo: nivel de un contaminante que deberá alcanzarse, en la medida de lo posible, en un momento determinado para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos sobre la salud humana, el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza. Objetivo a largo plazo: nivel de un contaminante que debe alcanzarse a largo plazo, salvo cuando ello no sea posible con el uso de medidas proporcionadas, con el objetivo de proteger eficazmente la salud humana, el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza. (R.D. 102/2011, Artículo 2. Definiciones)

individualmente. Además para prevenir daños en situaciones episódicas se definen también **Umbrales de alerta y de información**.

- Valores Objetivo y Objetivo a largo plazo para el ozono:

Objetivo	Período de Promedio	Valor objetivo
Protección de la salud humana	Máximo diario de las medias octohorarias del día	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que no deberá superarse más de 25 días por año civil de promedio en un período de 3 años
Protección de la vegetación	Mayo a julio	AOT40 (calculada a partir de valores horarios) 18 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$, de promedio en un período de 5 años

Objetivo	Período de Promedio	Objetivo a largo plazo
Protección de la salud humana	Máximo diario de las medias octohorarias en un año civil	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Protección de la vegetación	Mayo a julio	AOT40 (calculada a partir de valores horarios) 6000 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$

- Umbrales de Información y Alerta para el ozono:

Umbral de Información	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio de 1 hora
Umbral de alerta	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio de 1 hora

La responsabilidad de cada estado miembro, una vez establecidos estos parámetros de calidad, consiste en **evaluar, controlar** (para mantener o mejorar), e **informar** sobre la calidad del aire en sus respectivos territorios, y bajo unos mismos criterios comunes.

En lo relativo a información la ley establece la obligación de informar, entre otras cosas, de las superaciones de valores límite, valores objetivo y umbrales de información y alerta. Para la mayor parte de los contaminantes regulados, entre ellos el ozono, esta información se habrá de actualizar diariamente, y cuando sea posible cada hora. Como destinatarios de la información, además del público en general, se consideran *“organizaciones medioambientales y de consumidores, a las que representen a grupos de población sensible y otros organismos sanitarios relacionados...”*, y se propone también el uso de canales de difusión de la información gratuitos y accesibles como Internet.

En los dos apartados siguientes se resumen los criterios establecidos para la evaluación y el control.

- **Evaluación de la calidad del aire.**

Entre los criterios establecidos para la evaluación cabe destacar, por la forma en que determina toda actuación posterior, que esta habrá de realizarse sobre la base de una **zonificación** del territorio. La delimitación de las zonas no es fácil puesto que la directiva no orienta sobre como llevarla a cabo, limitándose únicamente a la definición de zona como *“parte del territorio de un estado miembro delimitada por éste a efectos de*

evaluación y gestión de la calidad del aire", y a la consideración de las aglomeraciones (conurbación con más de 250.000 habitantes) como un tipo específico de zona.

Para garantizar la cobertura del territorio y la intercomparación de los niveles en toda la UE, se contemplan aspectos tales como: métodos de medida adecuados a cada zona en función de los niveles de contaminantes que le afectan, número mínimo y ubicación de los monitores en el caso de medida en continuo, técnicas de referencia para la medida en continuo, objetivo de calidad de los datos, etc.

La evaluación se realiza anualmente, como corresponde a valores límite/ valores objetivo que se definen sobre periodos anuales (ya sea por aplicarse a promedios anuales, o bien por contabilizarse el número superaciones anuales de valores promediados en intervalos horarios, octohorarios o diarios). Entre los métodos de evaluación a utilizar se contemplan tres: medida en continuo en puntos fijos, modelización y medidas indicativas, aplicándose uno u otro en función de los niveles de cada zona en relación con los umbrales de evaluación, definidos como porcentajes de los valores límite.

En el caso del ozono para la elección del método de medida se toma como referencia los dos valores objetivo a largo plazo (protección a la salud humana y protección a la vegetación), de manera que en las zonas donde los niveles están por encima de alguno de ellos durante alguno de los 5 años anteriores, es obligatoria la medida en continuo.

La medida en continuo es el método más exigente en cuanto a los recursos técnicos y humanos necesarios para su instalación y mantenimiento. El mapa de abajo, con los resultados de la última evaluación de la calidad del aire respecto al ozono, muestra que para este contaminante en España los criterios de evaluación implican la necesidad de utilizar la medida en continuo en prácticamente la totalidad del territorio. Por tanto, las redes de calidad del aire son la principal herramienta de evaluación de la calidad del aire en relación con el ozono troposférico en España.

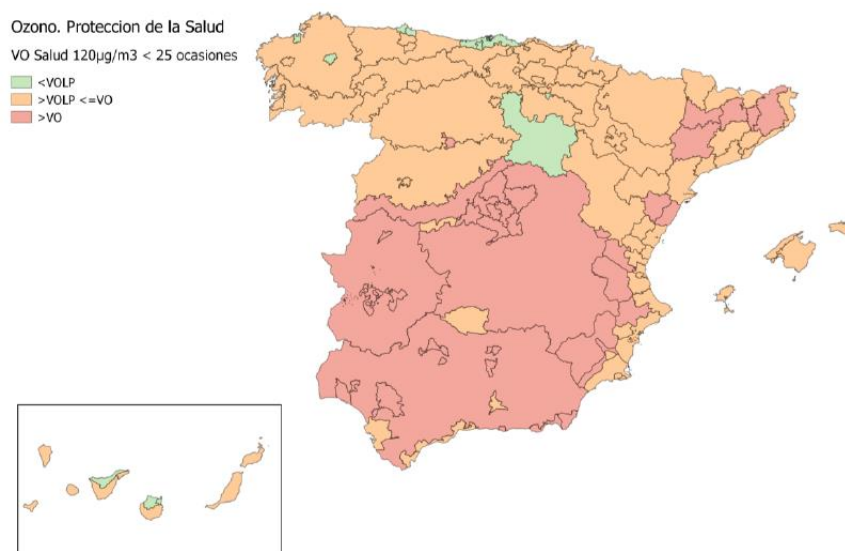


Figura AI.1: Resultados de la evaluación de 2017. Cumplimiento del Valor objetivo y Objetivo a largo plazo para la protección de la salud (MITECO, 2018)

Para la medida en continuo en puntos fijos la norma establece criterios de macroimplantación y macroimplantación, para la selección de los puntos adecuados en

los que instalar las estaciones automáticas, así como criterios sobre el número mínimo de puntos de cada tipo que se requiere en cada zona en función del número de habitantes.

- **Número mínimo de puntos de medida:**

En relación con el ozono (modificado por el punto 15 del R.D. 39/2017)

Artículo 11. Mediciones de ozono y de las sustancias precursoras.

[...]

2. En el **apartado I del anexo X** se establece el número mínimo de puntos fijos de muestreo para la medición continua del ozono en cada zona o aglomeración en la que la medición sea la única fuente de información para evaluar la calidad del aire.

3. Se deberán hacer también mediciones del dióxido de nitrógeno en al menos el 50 por 100 de los puntos de muestreo de ozono exigidos en el **apartado I del anexo X**. Las mediciones del dióxido de nitrógeno serán mediante técnicas en continuo, salvo en las estaciones rurales de fondo definidas en el apartado I del anexo IX, donde podrán utilizarse otros métodos de medición.

4. En las zonas y aglomeraciones en las que la información procedente de los puntos de muestreo para las mediciones en lugares fijos se complemente con información obtenida por modelización o mediciones indicativas, podrá reducirse el número total de puntos de muestreo especificado en el **apartado I del anexo X**, siempre que se cumplan las siguientes exigencias:

a) Que los métodos complementarios proporcionen un nivel adecuado de información para la evaluación de la calidad del aire con respecto a los valores objetivo, los objetivos a largo plazo y a los umbrales de información y de alerta.

b) Que el número de puntos de muestreo que se determine y la resolución espacial de otras técnicas sea suficiente para conocer la concentración de ozono de acuerdo con los objetivos de calidad de los datos especificados en el apartado I del anexo V y permita obtener los resultados de evaluación especificados en el apartado II del anexo V.

c) Que el número de puntos de muestreo de cada zona o aglomeración sea, como mínimo, uno por cada dos millones de habitantes o uno cada 50.000 km², seleccionando el que proporcione un mayor número de puntos de muestreo.

d) Que cada zona o aglomeración contenga al menos un punto de muestreo, y

e) Que se mida el dióxido de nitrógeno en todos los puntos de muestreo restantes excepto en las estaciones rurales de fondo.

En tal caso, se tendrán en cuenta los resultados de la modelización o de las mediciones indicativas para evaluar la calidad del aire en relación con los valores objetivo.

5. En las zonas y aglomeraciones en las que, durante cada uno de los cinco años anteriores de mediciones, las concentraciones sean inferiores a los objetivos a largo plazo, el número de estaciones de medición continua se determinará de conformidad con lo establecido en el **apartado II del anexo X**.

ANEXO X: (Corregido por el R.D. 39/2017 por el que se modifica el 10272011)

I. Número mínimo de puntos de muestreo para las mediciones fijas continuas dirigidas a evaluar la calidad del aire con vistas al cumplimiento de los valores objetivo, los objetivos a largo plazo y los umbrales de información y alerta cuando la medición continua sea la única fuente de información

Población (miles)	Agglomeraciones (Urb y suburb) (1)	Otras zonas (Suburb y Rurales) (1)	Rural de Fondo
<250		1	1 estación / 50000 km ² de promedio en todo el territorio nacional (2)
≥250, <500	1	2	
≥500, <1000	2	2	
≥1000, <1500	3	3	
≥1500, <2000	3	4	
≥2000, <2750	4	5	
≥2750, <3750	5	6	
≥3750	1 est. adicional por cada 2 mill. de hab.	1 est. adicional por cada 2 mill. de hab	

(1) Al menos una estación en las zonas donde sea probable que la población esté expuesta a las concentraciones de ozono más elevadas. En aglomeraciones, al menos, el 50 % de las estaciones deben ubicarse en áreas suburbanas.

(2) Se recomienda una estación por cada 25 000 km² en terrenos accidentados.

II. Número mínimo de puntos para la medición fija en las zonas y aglomeraciones en las que se alcancen los objetivos a largo plazo

[...]. El número de estaciones ubicadas en las aglomeraciones y otras zonas se podrá reducir a un tercio del número especificado en el apartado I. Cuando la información de estaciones de medición fijas sea la única fuente de información, debería mantenerse, como mínimo, una estación de control. [...]

• **Criterios de clasificación y ubicación de los puntos de muestreo para la evaluación de las concentraciones de ozono (Dir 2008/50/CE Anexo VIII, RD 102/2011 Anexo IX)**

• Tipo de estación: **Urbana**

- * Objetivos de la medición: Protección de la salud humana: Evaluar la exposición de la población urbana al ozono, es decir, de los casos en que la densidad de la población y la concentración de ozono sean relativamente elevadas y representativas de la exposición de la población en general.
- * Representatividad: Algunos km²
- * Criterios de macroimplantación: Lejos de la influencia de las emisiones locales debidas al tráfico, las gasolineras, etc.; localizaciones ventiladas donde puedan medirse niveles bastante heterogéneos; ubicaciones tales como zonas residenciales y comerciales urbanas, parques (lejos de los árboles), calles o plazas de grandes dimensiones con tráfico escaso o nulo, espacios abiertos característicos de instalaciones educativas, deportivas o recreativas.

• Tipo de estación: **Suburbana**

- * Objetivos de la medición: Protección de la salud humana y la vegetación: evaluar la exposición de la población y la vegetación situados en las afueras de las aglomeraciones, cuando se alcancen los niveles máximos de ozono a los que puedan estar directa o indirectamente expuestos la población y la vegetación.
- * Representatividad: Algunas decenas de km²
- * Criterios de macroimplantación: A cierta distancia de las zonas de emisiones máximas, a sotavento de las principales direcciones del viento, en condiciones favorables a la formación de ozono; casos en que la población, los cultivos sensibles o los ecosistemas naturales ubicados en los márgenes de una aglomeración se encuentren expuestos a niveles elevados de ozono; cuando proceda, algunas estaciones suburbanas pueden situarse a barlovento de las zonas de emisiones máximas para determinar los niveles regionales de fondo de ozono.

• Tipo de estación: **Rural**

- * Objetivos de la medición: Protección de la salud humana y la vegetación: evaluar la exposición de la población, los cultivos y los ecosistemas naturales a las concentraciones de ozono a escala subregional.
- * Representatividad: Niveles subregionales (Algunos cientos de km²)
- * Criterios de macroimplantación: Las estaciones podrán situarse en pequeños emplazamientos y/o en áreas con ecosistemas naturales, bosques o cultivos; áreas representativas respecto del ozono lejos de la influencia de emisiones locales inmediatas como las instalaciones industriales o las carreteras; pueden situarse en espacios abiertos pero no en las cumbres de montaña de gran altura.

• Tipo de estación: **Rural de fondo**

- * Objetivos de la medición: Protección de la vegetación y la salud humana: evaluar la exposición de los cultivos y los ecosistemas naturales a las concentraciones de ozono a escala regional, así como la exposición de la población
- * Representatividad: Niveles regionales/ nacionales/ continentales (1 000 a 10 000 km²)
- * Criterios de macroimplantación: Estaciones situadas en zonas de baja densidad de población, por ejemplo, con ecosistemas naturales o bosques, a una distancia de 20 Km. como mínimo de las zonas urbanas e industriales y alejadas de las fuentes de emisiones locales; deben evitarse las zonas donde se produzcan con frecuencia fenómenos de inversión térmica, así como las cumbres de montaña de gran altura; no se recomiendan los emplazamientos costeros con ciclos eólicos diurnos pronunciados.

• **Control de la calidad del aire.**

Como resultado de cada evaluación anual las zonas se clasifican respecto a los niveles de ozono en tres grupos; zonas que superan algún valor objetivo, zonas que no superan ningún valor objetivo pero superan alguno de los objetivos a largo plazo, y zonas por debajo de los objetivos a largo plazo. Para aquellas zonas en alguno de los dos primeros grupos se establecen requisitos destinados al control de las concentraciones. El artículo 17 de la directiva sobre "Requisitos aplicables a las zonas y aglomeraciones donde las concentraciones de ozono superen los valores objetivo y los objetivos a largo plazo" establece que:

1. Los Estados miembros tomarán todas las medidas necesarias que no conlleven costes desproporcionados para asegurarse de que se alcanzan los valores objetivo y los objetivos a largo plazo.

2. En las zonas y aglomeraciones donde se supere algún valor objetivo, los Estados miembros se asegurarán de que se aplica el programa elaborado de conformidad con el artículo 6 de la Directiva 2001/81/CE y, si procede, un plan de calidad del aire con el fin de respetar esos valores objetivo, salvo cuando no pueda conseguirse mediante medidas que no conlleven costes desproporcionados, a partir de la fecha especificada en la sección B del anexo VII de la presente Directiva"

Y el Artículo 24 indica que: *"Cuando, en una zona o una aglomeración determinada, exista el riesgo de que el nivel de contaminantes supere uno o más de los umbrales de alerta especificados en el anexo XII, los Estados miembros elaborarán planes de acción que indicarán las medidas que deben adoptarse a corto plazo para reducir el riesgo de superación o la duración de la misma. Cuando dicho riesgo se refiera a uno o varios valores límite o valores objetivo especificados en los anexos VII, XI y XIV, los Estados miembros podrán elaborar, cuando así proceda, esos planes de acción a corto plazo".*

En el caso particular del ozono el mismo apartado matiza: *"No obstante, cuando exista un riesgo de superación del umbral de alerta del ozono indicado en la sección B del anexo XII, los Estados miembros solo elaborarán esos planes de acción a corto plazo cuando consideren que hay una posibilidad significativa de reducción del riesgo o de la duración o gravedad de la situación, habida cuenta de las condiciones geográficas, meteorológicas y económicas nacionales. Al elaborar ese plan de acción a corto plazo, los Estados miembros deberán tener en cuenta la Decisión 2004/279/CE."*

La decisión 2004/279/CE a la que hace referencia este artículo es relativa a las directrices de aplicación de la anterior directiva de ozono (la 2002/3/CE). Esta decisión en su Anexo I se refiere a los aspectos a considerar en la elaboración de los planes a corto plazo, como aspectos geográficos que diferencian a los países del norte, centro y sur de Europa respecto a la posible eficacia estos planes. Para ello se apoya entre otros en los resultados obtenidos por investigadores de la Fundación CEAM (Millán, M.M., et al., 1997).

ANEXO II:

(NOTA: Este anexo es un extracto del informe del proyecto CONOZE. La bibliografía de este anexo está incluida en el capítulo VI)

Dinámica del ozono. Factores y componentes.

Las concentraciones de contaminantes en un punto son básicamente el resultado de las emisiones en su entorno o desde fuentes respecto a las cuales se encuentra a sotavento, y de los procesos físico-químicos que tienen lugar posteriormente sobre dichas emisiones (transporte de la masa aérea por el viento, movimientos verticales, reacciones químicas entre los componentes,...). Estos factores determinan en cada momento el balance entre diferentes mecanismos de aporte y de eliminación. En el modelo simple de la figura de abajo se representan estos mecanismos.

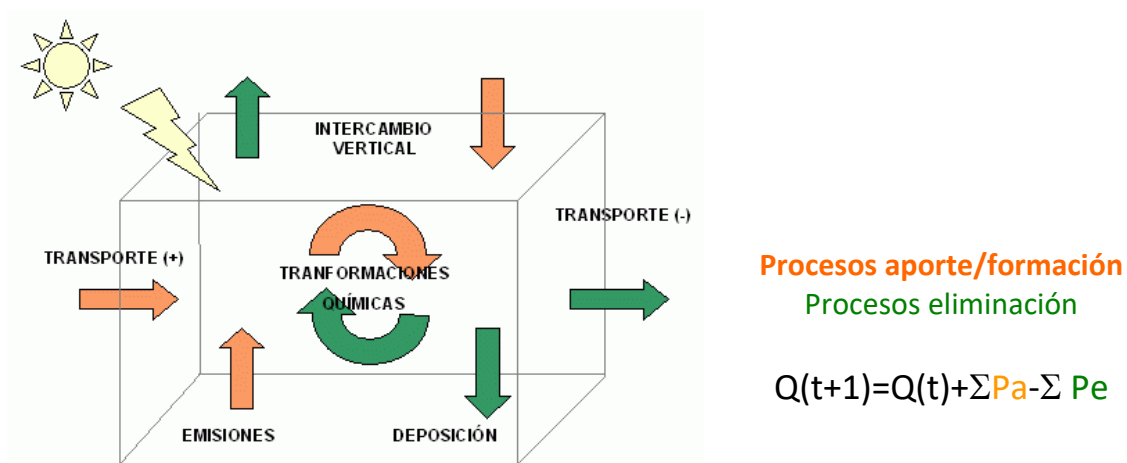


Figura All.1: Factores que determinan las concentraciones de contaminantes sobre la superficie. La concentración en cada momento es la que se tenía en el periodo anterior más el resultado neto entre los procesos de formación y aporte que hayan tenido lugar.

Entre los mecanismos de **aporte** se cuentan:

- Las emisiones primarias desde fuentes tanto naturales como antropogénicas (no en el caso del ozono que es de carácter secundario)
- La formación "in situ" de compuestos secundarios. En el caso del ozono como resultado de transformaciones fotoquímicas de los precursores emitidos desde fuentes naturales y antropogénicas (NO_x, y COV). Estas reacciones, activadas por la radiación solar, siguen ciclos diario y estacional característicos debido a la mayor actividad fotoquímica en las horas centrales del día, y los meses centrales del año.
- El aporte de contaminantes desde las parcelas vecinas a causa del transporte que ejercen los movimientos de aire, tanto en la dimensión horizontal (advección), como en la vertical (turbulencia mecánica y convectiva, forzamiento orográfico, subsidencia,...).

Y entre los mecanismos de **eliminación o destrucción**:

- Las reacciones químicas en las que interviene cada contaminante. En el caso del ozono reacciones de oxidación donde este actúa como compuesto oxidante.
- Los procesos de deposición sobre el terreno, tanto seca como húmeda.
- El transporte de contaminantes fuera de la parcela de aire a causa de los movimientos atmosféricos, tanto en la dimensión horizontal, como en la vertical.

Además, las concentraciones pueden variar en uno u otro sentido como respuesta a cambios en la profundidad de la capa de mezcla (la capa de la atmósfera en contacto con la superficie donde la turbulencia térmica y mecánica inducida por este contacto mantiene la composición del aire relativamente homogénea). La reducción de esta altura de la capa de mezcla, como ocurre bajo situaciones de inversión térmica, puede incrementar significativamente las concentraciones al reducir el volumen de mezcla.

La forma en que se combinan estos elementos en cada punto depende de múltiples factores: posición geográfica, orografía, tipo de entorno (urbano/rural/industrial), posición y distancia respecto a fuentes de emisión, situación meteorológica, hora del día, día de la semana, estación del año...

En los apartados siguientes se explica con algo más de detalle como influyen todos estos procesos y factores en el caso específico del ozono.

• Química del ozono.

La figura AII.2 sintetiza la química del ozono a partir de las reacciones en las que participan NOx y COV en presencia de radiación solar. La formación de ozono en la troposfera proviene básicamente de la fotólisis del NO₂ y la posterior recombinación del átomo de oxígeno con una molécula de O₂. De forma muy simplificada puede decirse que en ausencia de COV el ozono se mantiene en equilibrio dinámico con los NOx presentes en la mezcla, pues las moléculas de O₃ formadas se consumen casi inmediatamente en la oxidación del NO, sin que haya producción neta de ozono. La presencia de COV altera este balance pues los radicales libres producidos por degradación de estos (iniciada por la reacción con el radical hidroxilo, ·OH), desplazan al ozono en la oxidación del NO. Como resultado se obtiene una producción neta de ozono. (Seinfeld & Pandis, 1998)

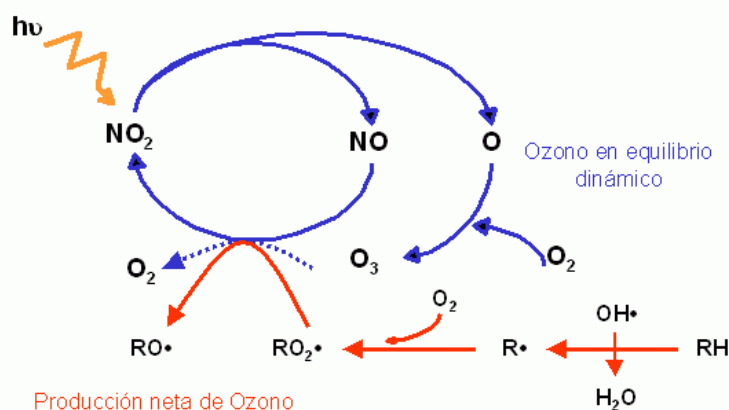


Figura AII.2: Esquema básico de la química del ozono. En ausencia de COV el ozono se mantiene en niveles moderados, en un equilibrio dinámico con los NOx. La presencia de una cantidad suficiente de VOC da lugar a la formación neta de ozono.

Esta química es en realidad altamente compleja, tanto por la cantidad de precursores que intervienen (el genérico COV engloba más de un millar de compuestos de la familia de los hidrocarburos, tanto de origen natural como antropogénico), como por tratarse de una **química no lineal**. Esto último significa que la cantidad de ozono formado o destruido no depende únicamente de la magnitud y el signo de la variación en alguno de sus precursores, sino que depende también del estado inicial de la mezcla, en gran medida de cual sea la ratio NOx/COV inicial.

Una consecuencia aparentemente paradójica es que la reducción en uno de los precursores (NOx o COV) no implica necesariamente la reducción en la cantidad de ozono formado, sino que puede suceder al contrario, y de hecho así ocurre en determinadas condiciones. El diagrama empírico de Ekma (*Empirical Kinetic Modeling Approach*) de la figura AII.3 con las isolíneas de producción de ozono en función de las concentraciones de COV y NOx muestra este comportamiento. En él se distinguen dos zonas (dos regímenes químicos) separadas por la línea que une los puntos de mayor curvatura: la llamada zona “sensible a COV” (o COV-limitada), donde la ratio NOx/COV es típicamente $> 1/8$ y en la que predominan las reacciones químicas representadas en azul en la figura AII.2, y la zona “sensible a NOx” (o NOx-limitada), con ratios inferiores y en la que las reacciones representadas en rojo en la figura AII.2 son más relevantes. En la primera, los cambios de concentración de COV, a NOx constante, producen cambios significativos y del mismo signo en el ozono. Por el contrario, las variaciones de NOx, a COV constante, dan lugar a variaciones de signo contrario en la producción neta de ozono. En la segunda zona ocurre justamente al revés. Por lo general las áreas cercanas a las fuentes de emisión (Ej. entornos urbanos) son COV-limitadas y las más alejadas son NOx-limitadas (Ej. zonas rurales).

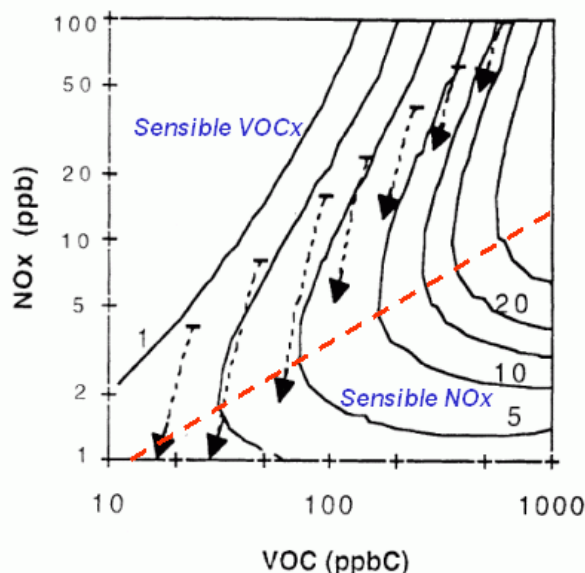


Figura AII.3 : Isopletas de la tasa de producción de ozono (ppb/h) para un día típico de verano con cielo despejado. Un incremento de NOx aumenta la producción de ozono en la zona sensible a NOx, pero sin embargo la reduce en la zona sensible a COV. Los incrementos de COV tienen el mismo efecto pero intercambiando las zonas. (Fuente: Sillman, 1999)

Los gráficos de las figuras AII.4 y AII.5, generadas a partir de registros de ozono de estaciones urbanas de España, ilustran casos reales de este comportamiento no lineal. Ambos casos muestran ejemplos en que la reducción de las emisiones de NOx debido a la disminución del tráfico, durante el fin de semana y en días festivos respectivamente, no

se traduce en una reducción de ozono, sino que dan lugar a un incremento sustancial de sus concentraciones.

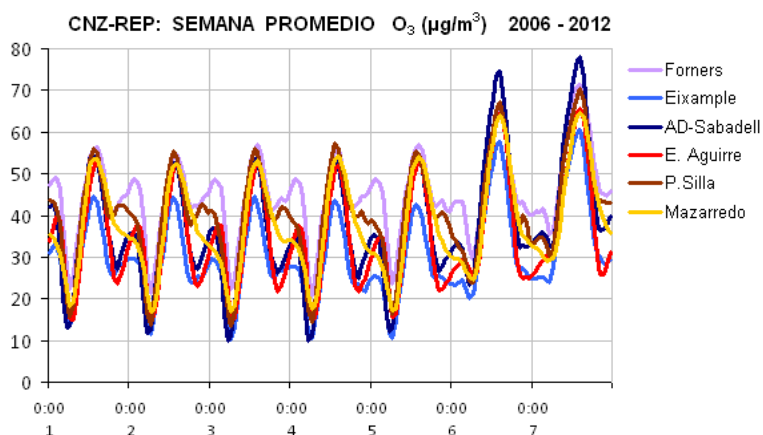


Figura AII.4: Perfil semanal promedio de ozono en estaciones urbanas de Madrid, Barcelona, Valencia, Bilbao, y Palma de Mallorca. Los fines de semana la reducción del tráfico reduce sustancialmente las emisiones de NOx. Sin embargo ello conlleva un incremento de ozono de aproximadamente un 40% como promedio para las concentraciones máximas. Este fenómeno se conoce como “efecto fin de semana”.

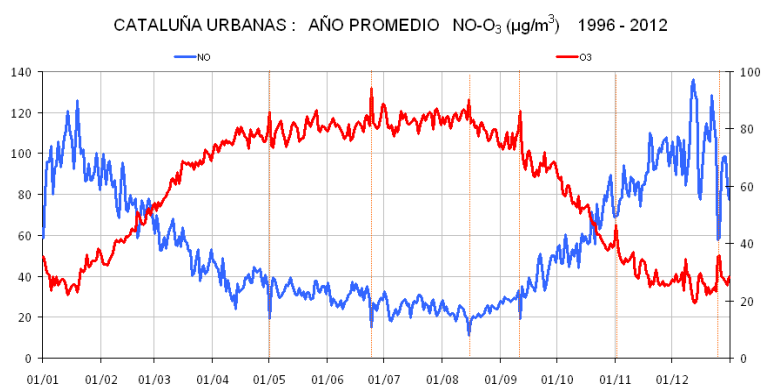


Figura AII.5: Ciclo anual promedio de O₃ y NO del conjunto de estaciones urbanas de Cataluña. Las fechas festivas (1 de Mayo, 24 Junio, 15 Agosto, 11 septiembre, 1 Noviembre, 25 y 26 Diciembre) muestran reducciones en el NO, asociadas a la reducción del tráfico, y aumentos simultáneos del ozono.

Este comportamiento del ozono en las áreas urbanas puede tener consecuencias indeseables, y debe ser manejado con prudencia en la gestión de la calidad del aire. Sin embargo, los niveles más elevados de ozono afectan especialmente a las áreas rurales, y se deben en gran medida al transporte de las emisiones urbanas, y de los productos secundarios formados, por las circulaciones de viento.

3.1. Procesos de transporte.

Los procesos de transporte y dispersión de contaminantes ocurren en todas las escalas, desde la microescala a la escala general o sinóptica, pasando por la escala local y la mesoescala o escala regional, y todos ellos se superponen en cada punto de la superficie, predominando unos sobre otros dependiendo de la época del año, de las condiciones atmosféricas dominantes y de la posición geográfica del punto considerado. La posición geográfica conlleva en sí misma unos condicionantes climáticos y meteorológicos, y además determina un escenario orográfico que influye decisivamente sobre la forma en que se configuran las circulaciones de viento debido a canalizaciones, efectos barrera, inyecciones orográficas, formación de líneas de convergencia entre diferentes masas aéreas, etc.

- **Modelo simple: Transporte de una pluma urbana.**

En el caso simple del transporte de una pluma urbana por un viento débil y de dirección constante (figura AII.6) se transita desde condiciones correspondientes a un régimen COVs-limitado a uno NO_x-limitado. Dependiendo de la composición de la pluma, la velocidad del viento y la intensidad de la radiación solar, en algún punto intermedio del recorrido se produce el máximo de concentración de ozono. Puede decirse que estos máximos corresponden a puntos geográfica y químicamente intermedios entre la zona urbana, COVs-limitada, y la zona rural a sotavento más remota, NO_x-limitada. En general, se considera que la cantidad de NO_x emitida en un área urbana determina la cantidad total de ozono formada a sotavento una vez que la fotoquímica se ha completado, mientras que la cantidad de COVs determina la tasa o velocidad de formación de este ozono.

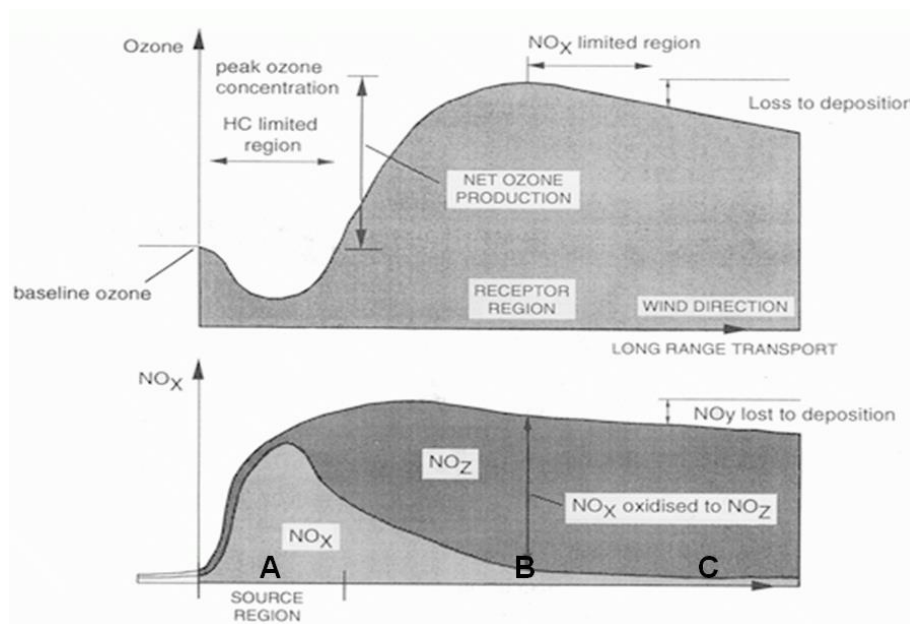


Figura AII.6: Relación entre producción neta de ozono y NO_z (productos de oxidación del NO_x = NO₃ + partículas de nitratos), a sotavento de las emisiones (extraído de Derwent & Davies, 1994).

- **Rutas de transporte habitual. Cuencas aéreas.**

En España, y en general en la cuenca mediterránea occidental, durante los meses de primavera y verano predominan condiciones anticiclónicas con escaso gradiente sinóptico. Bajo estas condiciones entran en juego circulaciones como las brisas costeras y vientos orográficos, que con frecuencia se acoplan y se refuerzan. A menudo estas circulaciones son potenciadas por el desarrollo de la Baja Térmica en el centro peninsular (Millán M. 1997). El resultado es un conjunto de circulaciones de **mesoescala**, que se auto-organizan y consolidan cada día, con líneas de convergencia ligadas a la orografía que delimitan cuencas aéreas diferenciadas con rutas de transporte habitual de la masa aérea desde las áreas de emisión (figura AII.7). Estas cuencas aéreas corresponderían por tanto a áreas geográficas en las cuales los niveles de contaminantes están influidos en gran medida por las mismas fuentes de emisión y las mismas circulaciones de viento.

La figura AII.8 muestra un ejemplo del transporte de contaminantes en la cuenca del Turia, donde las emisiones urbanas de Valencia son advectadas hacia el interior en dirección NO por el viento de componente SE que predomina de Abril a Septiembre

(circulación resultante del acoplamiento de la brisa de mar con la brisa de valle y que se canaliza hacia el interior en la dirección del eje del valle). Los perfiles promedio diario, correspondientes al mes de Julio en tres puntos situados a sotavento de las emisiones urbanas, muestran valores máximos que siguen una secuencia relacionada con su distancia a la ciudad. Esta secuencia se explica en base al modelo de la figura AII.9 donde los puntos A, B, y C corresponderían respectivamente a La Eliana, Villar y Torrebaja.

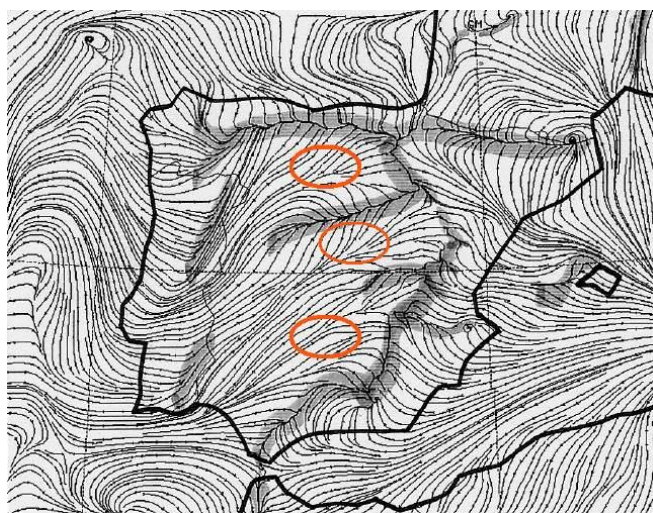


Figura AII.7: Resultado de la modelización a las 16:00 UTC del día 20 de julio de 1989 en presencia de la Baja Térmica Ibérica (BTI). La estructura de la BTI consiste en unas líneas de convergencia resultantes de la auto-organización de las brisas de mar y los vientos de ladera a escala peninsular. Las líneas de convergencia tienden a anclarse sobre las cadenas montañosas y dan lugar a la formación de importantes áreas de subsidencia entre ellas. (Millán, M 1997)

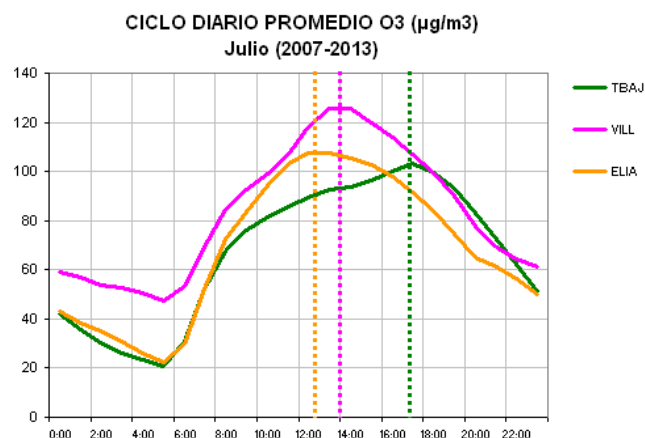
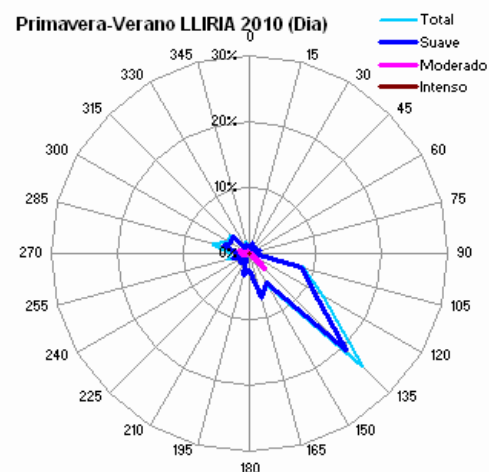
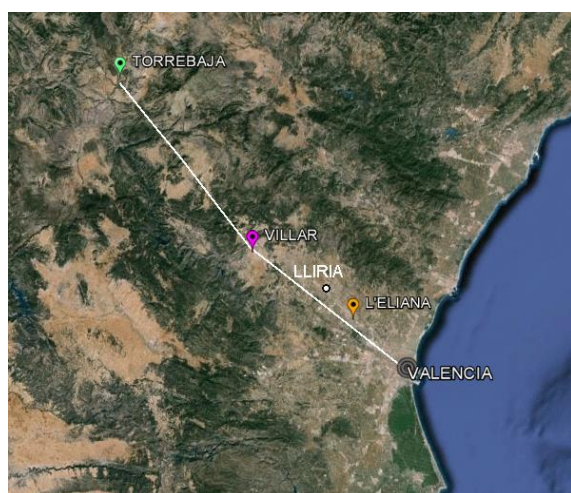


Figura AII.8: (Arriba) Posición de tres estaciones de calidad del aire (L'Elia, Villar y Torrebaja) a lo largo del eje del valle del Turia. Rosa de vientos de Liria entre las 7 y las 19 h de Abril a Septiembre. (Izquierda) Perfiles promedio diario de ozono en las tres estaciones. La secuencia en que se registran los máximos revela el transporte de la pluma urbana hacia el interior según el esquema que muestra la figura 10.

- **Recirculación de contaminantes.**

Las circulaciones de mesoescala mostradas en la figura AII.7 tienen continuidad en la dimensión vertical, con ascensiones en las líneas de convergencia de vientos, y descensos sobre áreas intermedias (líneas de divergencia) y sobre el mar, propiciados por la subsidencia compensatoria a su vez reforzada por la subsidencia anticiclónica. El resultado es la formación de **celdas recirculatorias**, en las que los contaminantes son transportados a la vez que la química va transformando las emisiones originales en otros productos secundarios (figura AII.9). En las zonas costeras, la brisa se refuerza progresivamente al acoplarse con los vientos de ladera, y al alcanzar las cadenas montañosas paralelas a la costa el ascenso sobre sus laderas se ve reforzado hacia arriba, dando lugar a ascensos verticales de la masa aérea (inyección orográfica), y a la formación de estratos de contaminantes a mayor altura. Estos procesos se han documentado en la península ibérica (Millán M. et al. 1997, 2000; Gangoiti et al. 2001) y en otras partes del mundo (McKendry I.G. et al. 2000).

Dentro de la circulación de retorno estos estratos retornan en dirección hacia el mar, donde descienden forzados por la subsidencia compensatoria. El resultado es una colección de estratos de reserva "apilados" y disponibles para entrar con la brisa a la mañana siguiente, sumándose a las emisiones recientes y repitiendo de nuevo el ciclo anterior. Durante la noche, el aire en contacto con la superficie se enfría dando lugar a un flujo de drenaje que desciende por las laderas hacia las zonas más bajas siguiendo los canales naturales, y se une en la costa con las brisas nocturnas o de tierra, que circulan ahora en dirección hacia el mar. En estas horas en que cesa la producción fotoquímica la altitud marca diferencias en los niveles de ozono, con concentraciones progresivamente más reducidas a lo largo del recorrido a causa del contacto con el terreno y con emisiones residuales que consumen el ozono, mientras que en puntos elevados, fuera de esa influencia y en muchos casos en contacto con los estratos en altura, los niveles se mantienen similares o ligeramente inferiores a los registrados durante el día.

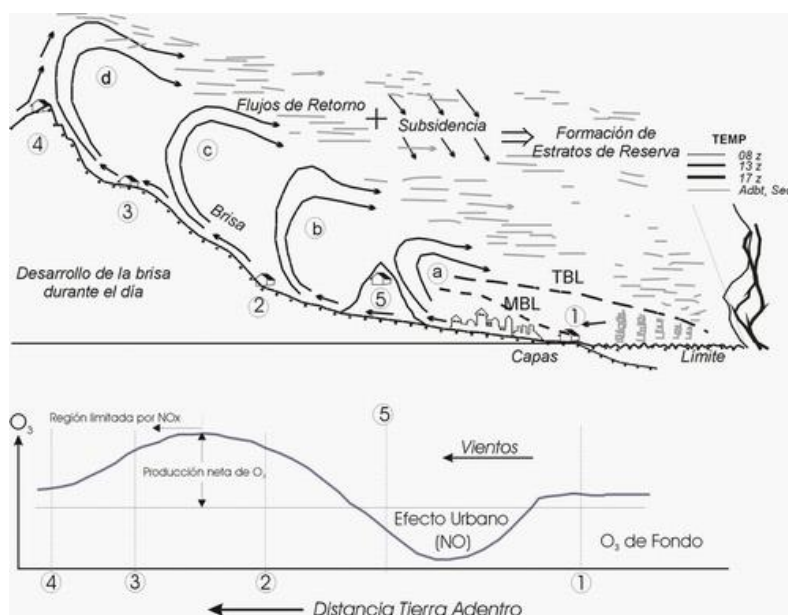


Figura AII.9: Escenario típico de transporte de las emisiones costeras en la vertiente mediterránea. La numeración 1-5 corresponde a cinco posiciones dentro de la cuenca aérea para las cuales se han caracterizado 5 ciclos de ozono (Millán et al., 2000).

Cuando las condiciones anticiclónicas perduran durante varios días es habitual que bajo esta dinámica la masa aérea se recargue gradualmente de ozono, y se registren niveles progresivamente más elevados (la masa aérea “guarda memoria” de un día para el siguiente). En la Comunidad Valenciana las superaciones del Umbral de Información ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) suelen ocurrir al final de ciclos de recarga de 3 - 9 días de duración asociados a **recirculación** de la masa aérea bajo condiciones anticiclónicas y circulaciones de mesoescala. Estas situaciones finalizan generalmente con el paso de un sistema frontal que limpia la atmósfera, o la entrada de una masa aérea con diferentes propiedades físico-químicas (figura AII.10).

Esta dinámica, que afecta a la cuenca mediterránea occidental, con zonas densamente pobladas e industrializadas de Italia, sur de Francia y España, contribuye a la acumulación de ozono sobre el mediterráneo en los meses de primavera y verano. Eventualmente los estratos de contaminantes formados por inyección orográfica en sistemas montañosos paralelos a la costa en toda la cuenca pueden situar concentraciones de ozono en la troposfera libre, desacopladas de la capa límite y bajo la influencia de las circulaciones de mayor escala (Millán M., et al. 1997, 2000; Gangoiti et al., 2002; Cristofanelli et al., 2009)

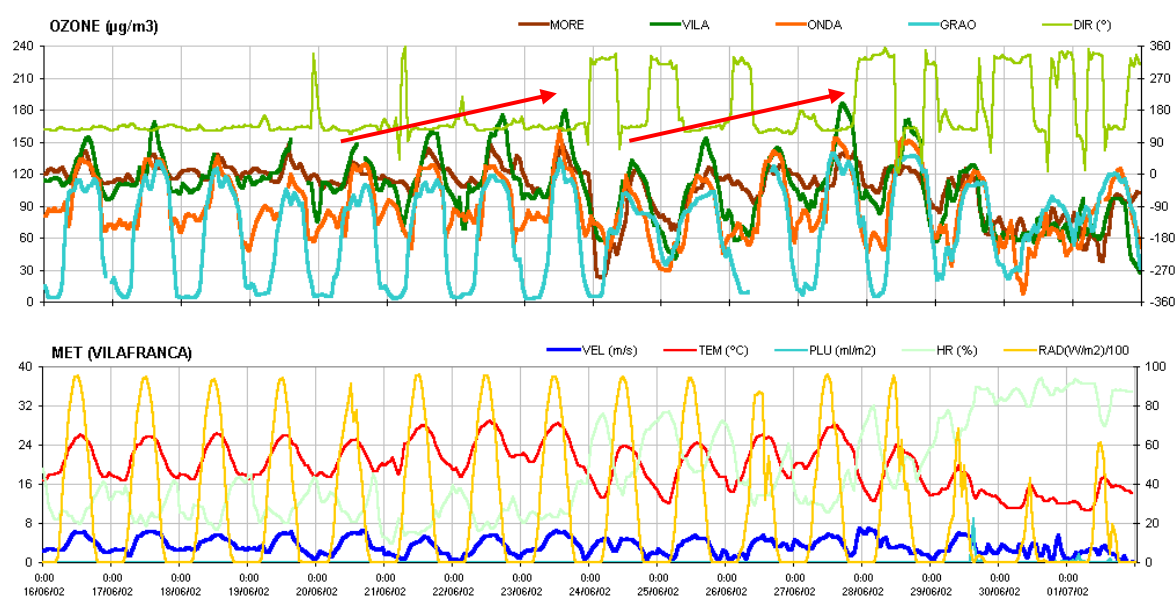


Figura AII.10: Evolución conjunta de las concentraciones de contaminantes y las variables meteorológicas en un periodo de 16 días de verano en la estación de Villafranca (Castellón). La entrada viento del NO la madrugada del día 24 interrumpe un periodo de 4 días de aumento progresivo en las concentraciones bajo predominio de las brisas. La bajada brusca de la temperatura y el aumento de la humedad relativa revela una masa de aire con diferentes propiedades físico-químicas. A partir de ahí se inicia otro periodo de recarga de otros 4 días que se interrumpe de la misma manera la madrugada del día 28. (*Promedios horarios UTC. DIR y RAD escala en el eje derecho.*)

Las principales características de estos periodos de recarga, documentados con datos de la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la calidad del aire, RVVCCA (Diéguez J.J. et al. 2004), son las siguientes: i) los episodios ocurren en primavera y verano bajo condiciones anticiclónicas con estabilidad atmosférica y predominio de los procesos de mesoescala, y hay un aumento gradual en las concentraciones a lo largo de varios días consecutivos en los que estas condiciones atmosféricas se mantienen, ii) los periodos de recarga equivalen

a un 30% de los días entre Abril y Septiembre, duran entre 3 y 8 días (entre 4 y 5 como promedio), y se registran tanto en las cabinas costeras como en las del interior, iii) cuando se supera el Umbral de Información a la Población ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) raramente se sobrepasa en más de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y esto no dura más de 2 o 3 horas. En los emplazamientos costeros los máximos ocurren a partir de las 14 h y en los del interior 1 o 2 horas después, debido al retraso asociado al transporte por la brisa para cubrir esa distancia. iv) La distribución semanal de los días en que se alcanzan las máximas concentraciones muestra que el número de estos tiende a aumentar a lo largo de los días laborables y decae el fin de semana.

Esta última característica del comportamiento del ozono es un indicio de la acumulación de ozono en los días laborables, en los cuales se suman nuevas emisiones de precursores a una atmosfera que ya acumula ozono de días anteriores, y también del efecto atenuador del fin de semana, que si bien no interrumpe necesariamente el ciclo, sí contribuye a evitar que en muchos casos este continúe aunque las condiciones meteorológicas sean favorables.

Los gráficos de la figura AII.11 muestran los resultados del análisis de estos ciclos actualizados al periodo 1997-2010.

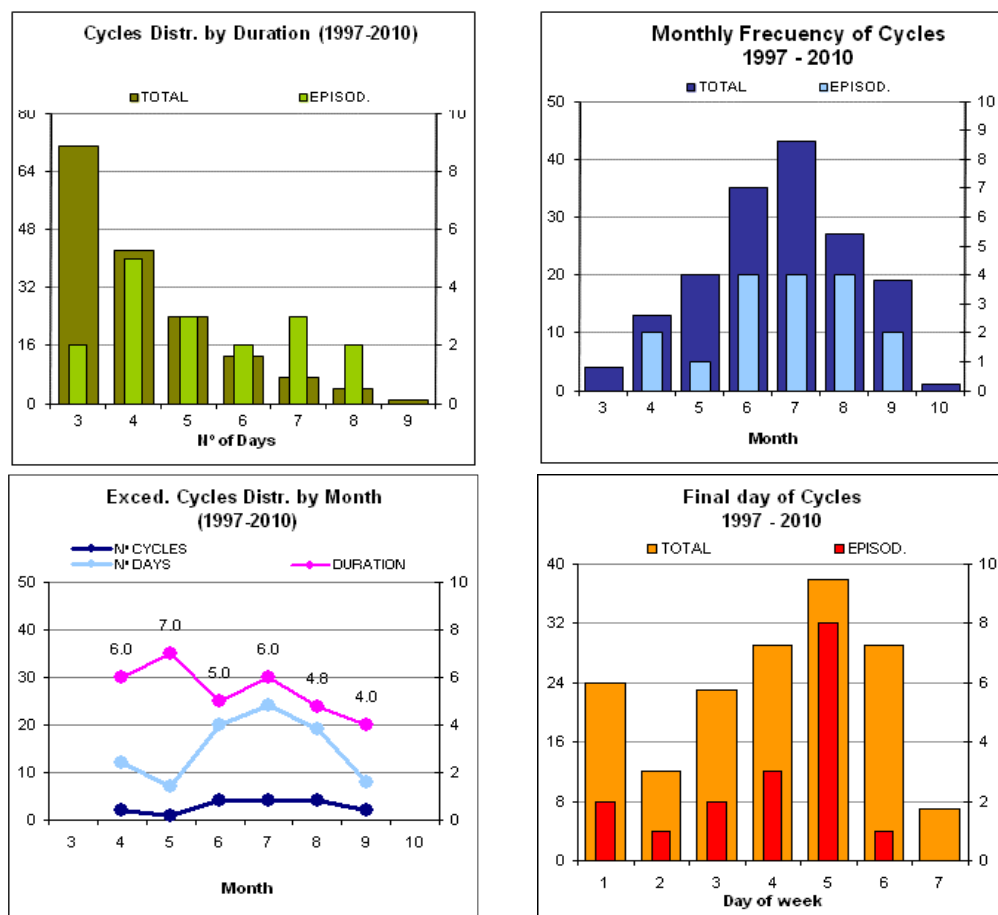


Figura AII.11: (arriba) Duración de los ciclos de recarga y distribución estacional (para el nº total de ciclos y para aquellos que dan lugar a la superación del U.I). (Abajo) Duración promedio en días de los ciclos que producen la superación del U.I, y distribución semanal de los máximos alcanzados al final de un ciclo de recarga (para el nº total de ciclos y para aquellos que dan lugar a la superación del U.I). Estadísticas elaboradas a partir de los datos de la RVVCCA.

Existen también otras áreas de la geografía española en los que se dan condiciones especialmente adversas para la dispersión de contaminantes, como ciertas áreas de interior donde las condiciones geográficas y orográficas favorecen el estancamiento y los fenómenos de inversión térmica, y donde la presencia de focos importantes de emisión puede dar lugar a concentraciones elevadas sin necesidad de un periodo largo de acumulación previo. Un ejemplo paradigmático es el área de Puertollano (Ciudad Real), donde se localiza un importante complejo industrial con una planta petroquímica y dos centrales térmicas. En esta zona son habituales las superaciones de SO_2 y ozono, en ocasiones incluso durante el invierno, a primera hora de la mañana cuando el calentamiento del terreno comienza a formar la capa de mezcla y acaba por bajar a la superficie los estratos de contaminantes que durante la noche quedan almacenados en la capa residual nocturna (figura AII.12). Esta situación se da también, aunque con menos frecuencia e intensidad, en el entorno del complejo petroquímico de Reus en la provincia de Tarragona, y es registrada por las estaciones de la zona (Mestral, Vila-seca)

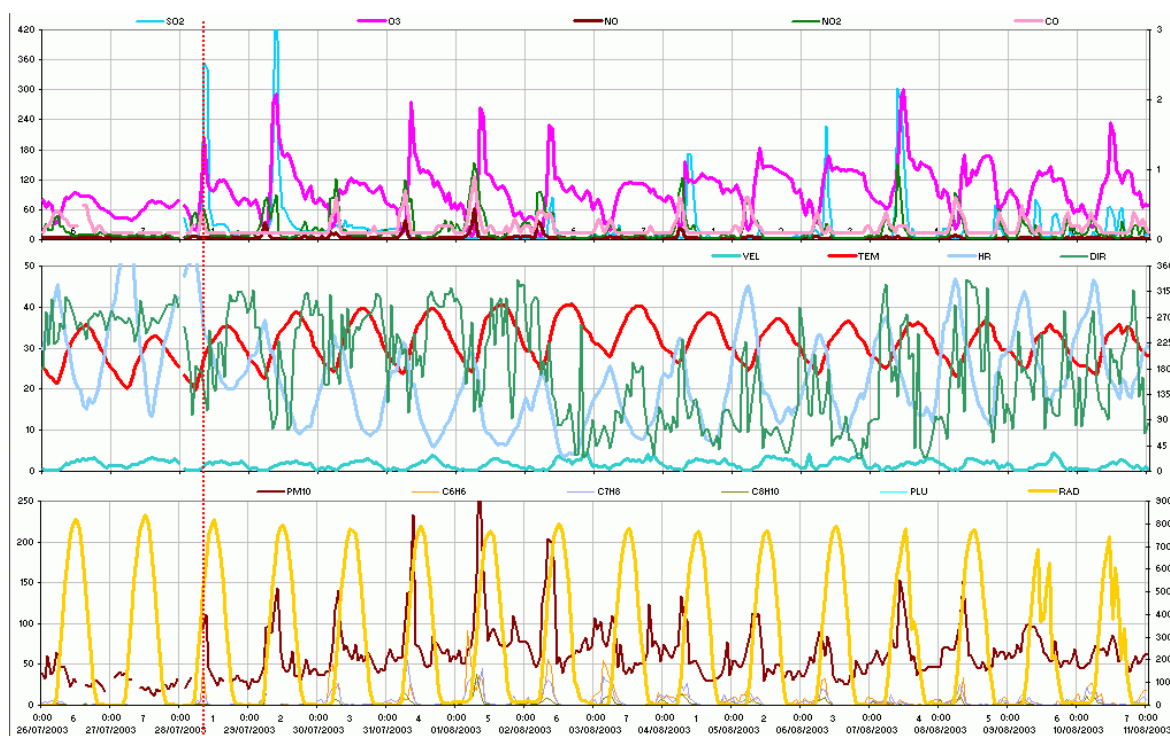


Figura AII.12: Ejemplo típico de episodios de SO_2 y Ozono en el área de Puertollano. La figura muestra series de promedios horarios del 1 al 16 de agosto de 2003 en la estación Campo de Fútbol. Los episodios son de corta duración, tienen lugar durante la mañana y están asociados a la fumigación de estratos de contaminantes que tiene lugar durante la formación de la capa de mezcla. Estos estratos se forman durante la noche bajo determinadas condiciones meteorológicas poco favorables a la dispersión, y tienen su origen en las emisiones industriales de la zona.

- **Transporte a larga distancia**

Como se ha comentado con anterioridad el tiempo de residencia del ozono en la atmósfera, del orden de horas a días, en la capa límite, y de días a semanas en la troposfera libre, es suficientemente alto como para que su distribución se vea afectada

por las circulaciones de mayor escala. Esto significa que el ozono está sujeto al transporte a larga distancia por las circulaciones sinópticas, pudiendo impactar sobre zonas muy alejadas del origen de las emisiones de precursores. En España este fenómeno se detecta por ejemplo sobre la cornisa cantábrica bajo las circulaciones inducidas por el anticiclón de las Azores cuando este se extiende en forma de cuña hacia Centroeuropa. La figura AII.13 muestra un ejemplo de ello, con niveles especialmente elevados el 13 de julio de 2005 que se registran simultáneamente en estaciones automáticas localizadas desde el País Vasco hasta Galicia. Un estudio de los episodios de ozono en el País Vasco durante el periodo 1995–1998, muestra que los episodios más importantes y persistentes coinciden con el establecimiento de circulaciones del Este y noreste forzadas por las altas presiones sobre Centroeuropa (Gangoiti et al., 2002, 2006; Environment and Systems, 1999)

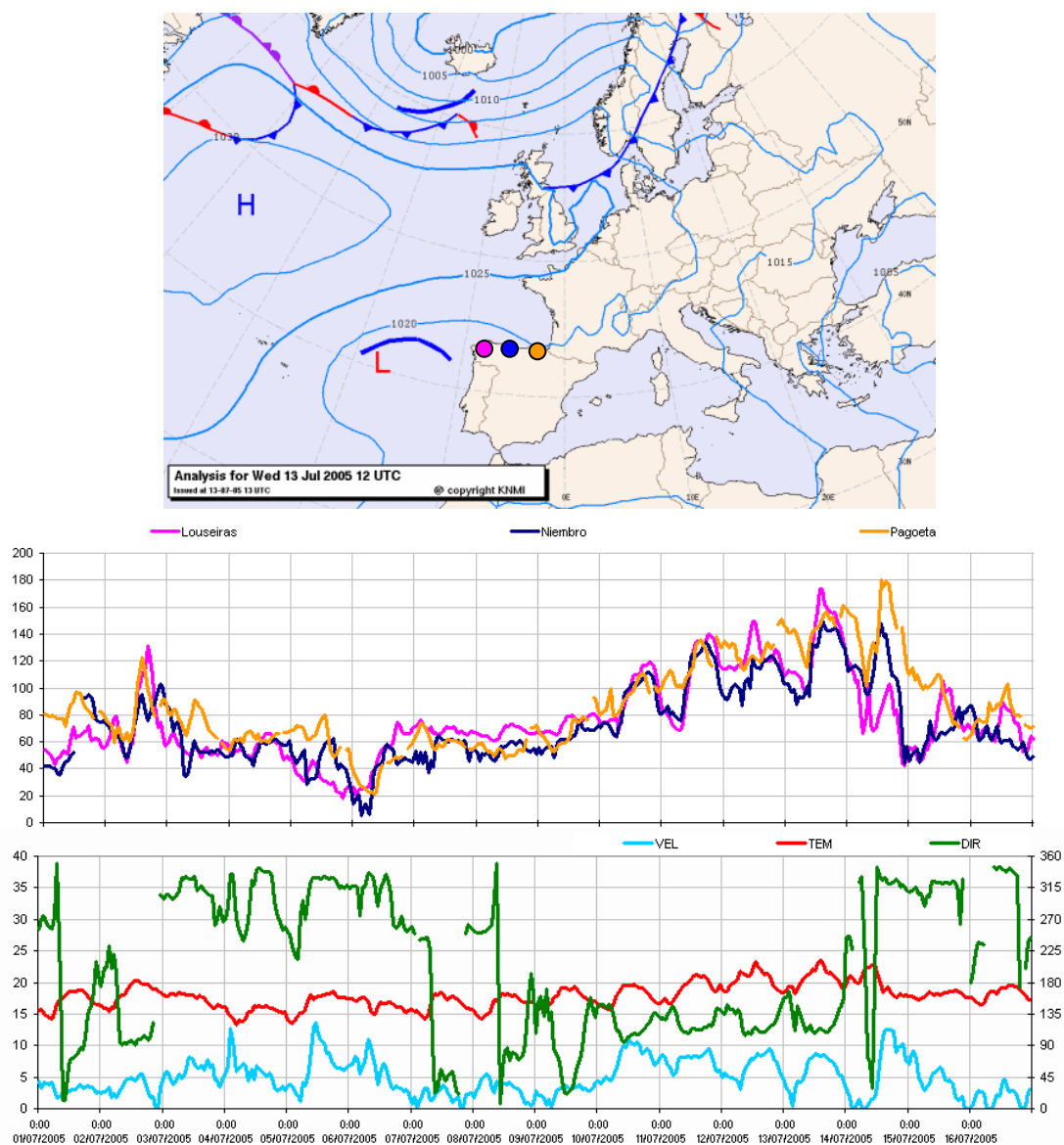


Figura AII.13: Transporte de ozono a larga distancia sobre la cornisa cantábrica con origen en Centroeuropa. Los gráficos muestran series de promedios horarios del 1 al 16 de Julio de 2005 en las estaciones de Pagoeta (País Vasco), Niembro (Asturias) y Louseiras (Galicia). El día 13 se alcanzan simultáneamente niveles elevados en las tres estaciones bajo una circulación persistente de componente E.

Otra vía de transporte de contaminantes a larga distancia desde Centroeuropa introduce ozono en la cuenca mediterránea occidental entre los Pirineos y los Alpes al Golfo de León. La estación de Cabo de Creus en Gerona registra con frecuencia la entrada de esta masa de aire con concentraciones significativas de ozono.



Figura All.14: Rosa de ozono en la estación de Cabo de Creus. Calculada con los datos entre Abril y septiembre de 2008. Un porcentaje en torno al 30% de los niveles por encima de 80 µg/m³ proviene del norte (entre 0 y 30 grados)

3.2. Componentes que contribuyen a los niveles de ozono.

De todo lo visto se concluye que las concentraciones de ozono que se registran en cualquier punto del territorio son la suma de diversas componentes que se pueden agrupar en dos: las contribuciones de origen identificable, básicamente ozono generado localmente o advechado desde zonas vecinas, y las de origen no identificable, niveles de fondo debidos a transporte a larga distancia desde zonas más o menos remotas y el “fondo común” recirculado que en Europa afecta fundamentalmente a los países de la cuenca mediterránea. La cantidad relativa de cada componente varía en el espacio y en el tiempo, dependiendo de factores como la latitud, posición relativa a las fuentes de emisión, tipo de entorno, altitud, etc., y debido a los cambios meteorológicos y a la evolución diaria y estacional que siguen las emisiones y la fotoquímica (dirigida por los ciclos solares).

Por su propia naturaleza y origen la primera componente de las concentraciones puede ser gestionada en base a medidas a escala local y nacional, siempre que se identifique el origen/es de las emisiones de precursores que afectan a una zona concreta. Por el contrario, no hay margen de actuación para los gestores de la calidad del aire para las concentraciones de fondo que se suman a las anteriores y que pueden llegar a ser importantes.

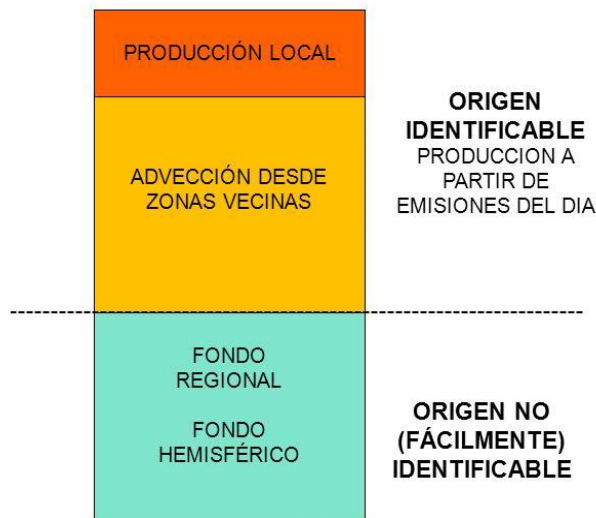
[O₃]

Figura AII.15: Componentes que contribuyen a los niveles de ozono en un punto.

A nivel europeo se han realizado estudios basados en herramientas de modelización para la cuantificación de estas contribuciones externas debidas al transporte a larga distancia desde diferentes áreas fuente. En el Reino Unido se han estimado las aportaciones desagregadas desde Norteamérica, Asia, y la Europa continental, así como la aportación debida a intrusiones estratosféricas, a lo largo del año (Derwent R.G., 2008; Fiore et al. 2009; UNECE, 2010).

En España, también se ha aplicado la modelización para el análisis de episodios en puntos y en días concretos (Gangoiti, et al., 2002; Jiménez et al., 2002), pero se carece de estudios más extensivos para la cuantificación de los niveles de fondo y transporte a larga distancia. En nuestro caso, nuestra situación más meridional condiciona y varía la naturaleza de estas aportaciones externas. Las intrusiones estratosféricas están asociadas plegamientos de la tropopausa que generalmente tienen lugar en latitudes más altas a final del invierno y comienzo de la primavera y que en todo caso tienen efecto fundamentalmente en la alta troposfera (Lelieveld & Dentener, 2000). Y el transporte hemisférico asociado al paso de los sistemas frontales queda limitado sobre la península debido al bloqueo ejercido por la permanencia del anticiclón de las Azores en primavera y verano, cuando se alcanzan los mayores niveles de concentración. En cambio, es más significativa la contribución de las recirculaciones costeras que afecta a la cuenca mediterránea occidental y el transporte transfronterizo desde Centroeuropa sobre la cornisa cantábrica y sobre el mediterráneo a través del Golfo de León (Millán M. et al. 1997; Gangoiti, et al., 2002; Lelieveld, et al., 2002; Velchev K., 2011)

En definitiva el conocimiento de la dinámica del ozono que afecta a cada territorio es fundamental para diseñar medidas de control adecuadas en las zonas en que el cumplimiento de los valores objetivo y objetivo a largo plazo así lo requieren. En primer lugar será importante conocer el margen real de maniobra que puede dar el control de las emisiones locales, teniendo en cuenta las contribuciones de fondo que quedan fuera del alcance de dichas medidas.



ANEXO III:

Datos anulados del periodo 2008-2018 (solo ozono)

Como se explica en el apartado 3 la depuración de la base de datos realizada para este estudio se basa en el procedimiento utilizado por el CEAM para la validación de los datos de la Red de Calidad del Aire de la Comunidad Valenciana, desarrollado y optimizado a lo largo de más de 20 años de experiencia. Básicamente el procedimiento consiste en examinar las series temporales por medio de herramientas gráficas que permiten analizar su coherencia espacial y temporal, e identificar las inconsistencias en su comportamiento y su evolución (CEAM, 2010). Cuando la anomalía se puede atribuir sin duda a un mal funcionamiento del monitor los datos afectados son directamente invalidados, y en caso contrario se alerta de la incidencia y se decide posteriormente la validez de los datos, una vez revisado el sistema de medida por parte de los técnicos de mantenimiento¹⁴. Esta labor requiere personal experto con conocimientos de la dinámica de contaminantes y capacidad de interpretación de los datos.

En la depuración previa de las series de datos **se ha anulado un 3.5% de datos de ozono de la RVCARM en el periodo 2008-2018**, y un 2% de la RMUREX (la que incluye las estaciones de las provincias colindantes). La tabla AIII.1 muestra los periodos de datos anulados de la RVCARM con un breve comentario justificativo en cada caso. Las variables distintas del ozono no se han examinado exhaustivamente (la cantidad de tiempo que esto consumiría lo ha hecho incompatible con el cumplimiento de las tareas comprometidas), aunque sí se han detectado datos anómalos, posiblemente erróneos, de contaminantes como el NO₂ en varias estaciones de la red, y de variables meteorológicas, en particular bajas velocidades de viento en La Aljorra y Caravaca, y valores fuera de rango para la misma variable en los datos de la Unidad Móvil (al menos en las campañas de Sierra Espuña, Cifea Lorca y San Pedro del Pinatar C.I.).

A continuación del listado se muestran, mediante diferentes tipos de representaciones gráficas de las series temporales, algunos ejemplos de estos periodos invalidados. Con estos ejemplos se pretende ilustrar los criterios de validación.

Y al final del anexo se justifica la **corrección de los registros de Lorca entre 2010 y 2013** por estar afectados de un offset o desplazamiento de la señal. La corrección de las medidas no es una práctica habitual ni recomendable en la gestión de la calidad del aire, los valores medidos se consideran correctos o se anulan por causa justificada cuando no lo son. Sin embargo, en este caso, y de forma extraordinaria, se han corregido datos de Lorca por tratarse de un periodo muy extenso de datos valiosos para los objetivos de este

¹⁴ La depuración aquí realizada no permite estas comprobaciones, y aunque el criterio de filtrado es muy conservador (no se filtran datos si no hay evidencias mas allá de la pura anomalía), no se puede descartar que alguno de los periodos filtrados pudiera estar relacionado con circunstancias temporales que alteran el comportamiento habitual de los niveles de concentración en un punto de la red (ej. obras en el entorno de la estación). No estaríamos hablando entonces de medidas erróneas, pero igualmente interesa dejarlas fuera de este tipo de análisis, puesto que no responden a la dinámica habitual de contaminantes en el emplazamiento. En todo caso, estos serían un porcentaje ínfimo de los datos invalidados.

estudio, y de los que se puede demostrar que están afectados por un desplazamiento que afecta a toda la serie de ozono en un periodo bien delimitado.

- **Listado de datos de ozono de la RVCARM invalidados para este estudio:**

CODIGO	NOMBRE EST.	MUNICIPIO	AREA	INI	FIN	DURACIÓN (DIAS)	COMENTARIOS
E30005002	Alcantarilla	Alcantarilla	SUBURBAN	11-mar-10	15-abr-10	36	Niveles anormalmente bajos
E30016001	Alumbres	Cartagena	SUBURBAN	01-feb-09	04-may-09	93	Niveles anormalmente bajos
E30016004	San Gines	Cartagena	URBANA	22-ene-08	16-feb-08	26	Niveles anormalmente bajos
E30016004	San Gines	Cartagena	URBANA	16-abr-09	04-may-09	19	Niveles anormalmente elevados
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	01-mar-09	11-may-09	72	Niveles anormalmente bajos
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	16-may-09	03-jun-09	19	Niveles anormalmente bajos
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	13-jun-09	23-jun-09	11	Niveles anormalmente bajos
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	01-feb-10	31-mar-10	59	Niveles anormalmente bajos
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	08-abr-10	23-may-10	46	Niveles anormalmente bajos
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	13-mar-15	09-jul-15	119	Niveles anormalmente bajos
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	12-mar-17	25-may-17	75	Niveles anormalmente bajos
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	05-jun-17	19-jun-17	15	Niveles anormalmente bajos
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	02-abr-18	07-abr-18	6	Niveles anormalmente bajos
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	15-abr-18	28-abr-18	14	Niveles anormalmente bajos
E30016018	La Aljorra	Cartagena	SUBURBAN	04-may-18	02-jun-18	30	Niveles anormalmente bajos
E30016020	Mompean	Cartagena	URBANA	16-feb-11	24-nov-11	282	Niveles anormalmente bajos
E30024002	Lorca	Lorca	SUBURBAN	03-may-18	11-may-18	9	Niveles anormalmente bajos
E30024002	Lorca	Lorca	SUBURBAN	08-jul-18	08-jul-18	1	Niveles anormalmente bajos
E30024002	Lorca	Lorca	SUBURBAN	29-jul-18	29-jul-18	1	Niveles anormalmente bajos
E30028001	Benizar	Benizar	RURAL	08-mar-08	31-mar-08	24	Niveles anormalmente altos
E30030007	San Basilio	Murcia	URBANA	01-mar-08	02-mar-08	2	Niveles anormalmente bajos
E30030007	San Basilio	Murcia	URBANA	28-sep-09	28-sep-09	1	Niveles anormalmente bajos
E30030007	San Basilio	Murcia	URBANA	29-ene-14	13-feb-14	16	Niveles anormalmente bajos
E30030007	San Basilio	Murcia	URBANA	01-ene-17	10-ene-17	10	Niveles anormalmente bajos
E30030007	San Basilio	Murcia	URBANA	03-feb-17	09-feb-17	7	Niveles anormalmente bajos
E30036002	S.P. Pinatar	Murcia	URBANA	11-ago-15	02-sep-15	23	Niveles anormalmente bajos

Tabla AIII.1: Periodos de datos de ozono anulados de la RVCARM en 2008-2018

El gráfico de la figura AIII.1, con las series de máximos diarios de las medias móviles de 8 horas para el ozono de la RMUREX, permite apreciar algunos casos de periodos de datos anómalos, entre ellos el más llamativo por su duración que incluye la tabla anterior (los 282 días en Mompean en 2011).

Como se ha comentado el criterio de filtrado es siempre conservador. Para decidir si estos periodos corresponden o no a datos erróneos, se precisan exámenes adicionales, con otras ventanas temporales y otros promedios que posibiliten el análisis de la evolución conjunta del ozono con el resto de contaminantes y de variables meteorológicas.

Las figuras que se muestran a continuación de la AIII.1 muestran diferentes ejemplos de casos en los que se ha decidido la anulación de los datos.

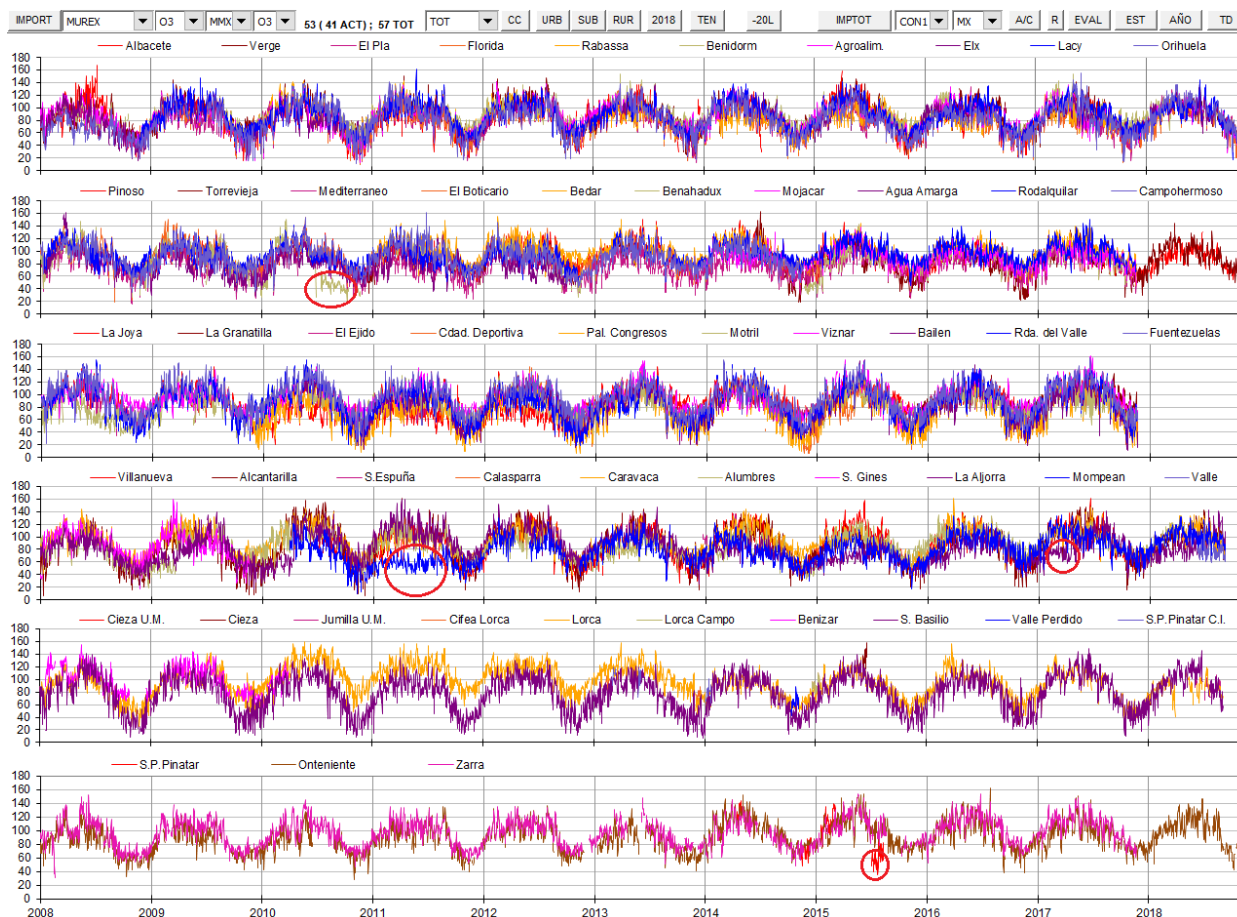


Figura AIII.1: Series temporales del periodo 2008-2018 de los máximos diarios de los promedios de 8 horas de ozono de los 53 emplazamientos de la RMUREX. Se resaltan algunos periodos que muestran niveles anómalamente bajos. En los 4 casos los datos han sido invalidados para el análisis posterior.

Los gráficos de la figura AIII.2 muestran la evolución conjunta de los promedios horarios de ozono en ventanas de 16 días para todas las estaciones de la RVCARM. Estos gráficos, que incluyen también la evolución de las variables meteorológicas en la estación Valle, permiten confirmar que en La Aljorra, entre el 12 de marzo y el 25 de mayo de 2017, el equipo de medida está midiendo niveles significativamente por debajo de los reales.

Efectivamente, el gráfico superior muestra niveles de ozono en La Aljorra al menos 20-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sistemáticamente inferiores los registrados en el resto de la red entre el 15 de abril y el 1 de mayo. Incluso entre el 19 y el 22 de abril, cuando la torre meteorológica de la estación Valle (gráfico intermedio) registra viento moderado y persistente de componente NE, que provoca niveles relativamente homogéneos en toda la red, La Aljorra se mantiene muy por debajo del resto¹⁵. Por último, en el tercer gráfico, correspondiente al final del periodo de datos anulados, se aprecia un hueco el día 26 de mayo, y a continuación un salto brusco en la serie de La Aljorra, que sitúa los registros de

¹⁵ Los registros simultáneos de viento en Orihuela (Alicante), Zarra (Valencia) y Víznar (Granada), demuestran que esta circulación del E afecta a todo SE peninsular. Y en el mapa de presiones de estos días se aprecia un anticiclón sobre centroeuroa que induce viento del E en todo este área. Estas circulaciones de gran escala favorecen la dispersión y mezcla de contaminantes atmosféricos, y dan lugar a niveles homogéneos de ozono en áreas extensas.

ozono en valores cercanos al resto de estaciones. Este salto se puede atribuir con poca probabilidad de error a una intervención de mantenimiento que repara algún tipo de incidencia en el monitor. Todo ello permite decidir la invalidación de los datos de La Aljorra en el periodo 12/3-25/5 de 2017.

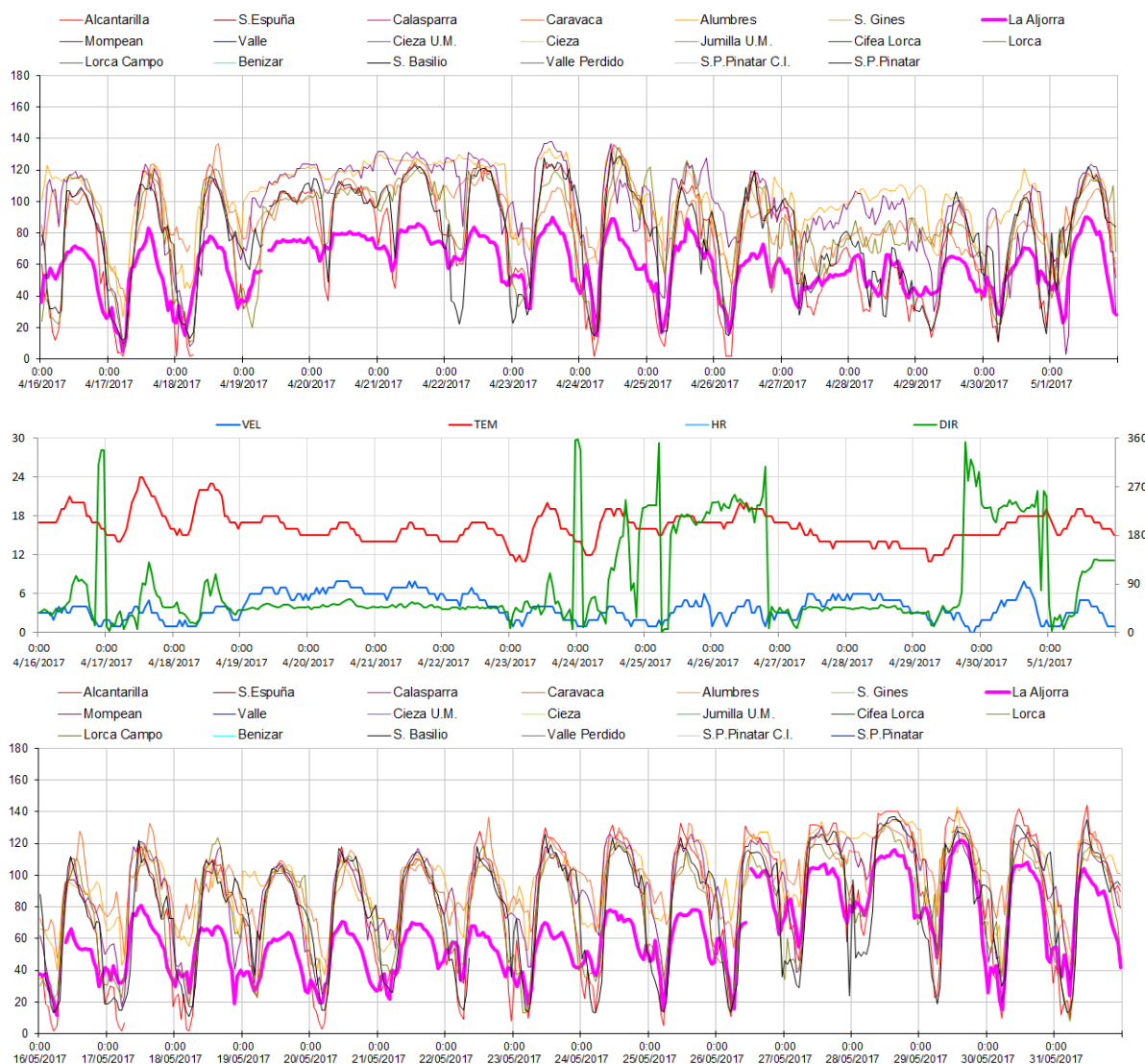


Figura AIII.2: (Arriba) Evolución conjunta de las concentraciones de ozono de la RVCARM entre el 16/4 y el 1/5. (Medio) Registros meteorológicos de la torre de la estación Valle en el mismo periodo. (Abajo) Misma representación que el gráfico superior para el periodo 16-31/5. Como se explica en el texto el examen conjunto de los tres gráficos permite determinar que hasta el 25 de mayo los datos de la Aljorra están sensiblemente por debajo de los niveles reales. Los elementos relevantes son: la diferencia sistemática de los valores de La Aljorra; su comportamiento en condiciones de viento moderado y persistente entre el 19 y 22 de abril; y el salto brusco el día 25, presumiblemente después de una intervención sobre el equipo, que devuelve los niveles a sus valores habituales (los niveles que habitualmente registra en relación con el resto de estaciones y con su propio histórico).

En la página siguiente los gráficos de la figura AIII.3 muestran otros dos ejemplos de datos anulados en San Basilio (3-9/2/2017) y San Gines (22/1-16/2/2008).

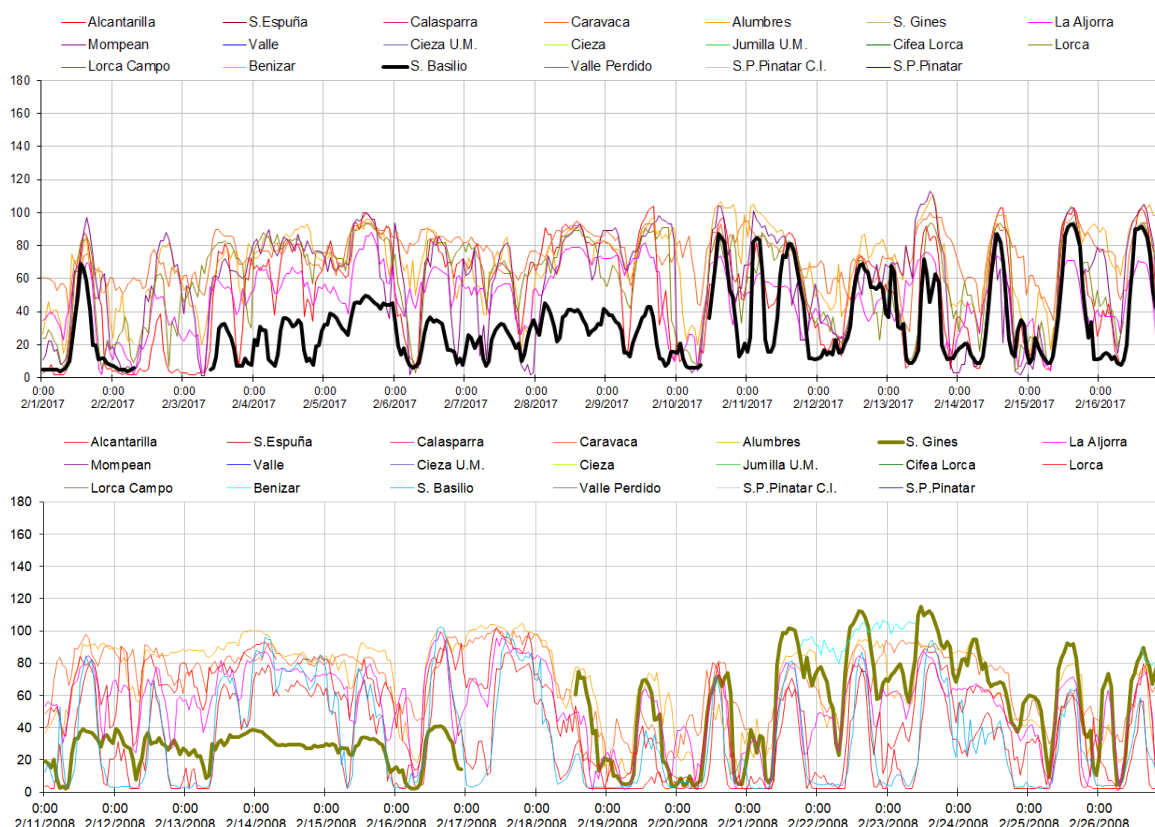


Figura AIII.3: Ejemplos de datos erróneos registrados en San Basilio y San Ginés. En el primer caso se aprecia la caída brusca de los registros y la posterior recuperación el día 10. En el segundo la ventana de 16 días solo permite apreciar la recuperación el día 18 de unos niveles que venían siendo del orden de 1/3 de los normales hasta el día 16.

• Datos corregidos en Lorca:

Entre agosto de 2009 y enero de 2014 se ha detectado un desplazamiento en los registros de ozono de la estación de Lorca¹⁶ de 15-21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (varía ligeramente en el tiempo. De agosto de 2009 a julio de 2010 son 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, posteriormente hasta finales de 2011 son 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y en el último tramo son 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

La situación se pone de manifiesto con el examen de las series de datos desde diferentes enfoques: El gráfico superior de la figura AIII.4 muestra las series de mínimos diarios de los promedios horarios de ozono en el periodo 2008-2018 para cuatro estaciones de la RVCARM. La concentración en Lorca no baja de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (aprox.) en el periodo señalado. En la misma figura el gráfico inferior, con las series de promedios mensuales de los máximos diarios, confirma que efectivamente se trata de un desplazamiento, pues también los máximos destacan sobre el resto de estaciones (y sobre el resto de la serie de Lorca) en el mismo periodo. La figura AIII.5 muestra la correlación entre las series de ozono de Caravaca y Lorca, separando el periodo desplazado del resto. Ambas rectas de regresión tienen prácticamente la misma pendiente, están separadas por una constante, poniendo también de manifiesto el desplazamiento. Por último, en la figura AIII.6, con series de promedios horarios en ventanas de 16 días, el gráfico superior muestra el inicio

¹⁶ Esta situación ya se detectó y se puso de manifiesto en el informe del proyecto CONOZE donde se analizaron los datos del periodo 1996-2012 para toda España. En dicho informe (pg. 61) se cuestionaba la validez de los datos de Lorca a partir de agosto de 2009 y se recomendaba la revisión del monitor de ozono.

este desplazamiento el día 10/08/2009, después de un hueco en la serie, y en el inferior se aprecia que también después de un hueco de dos días, a partir del 11 enero de 2014 los registros recuperan valores mínimos próximos a cero.

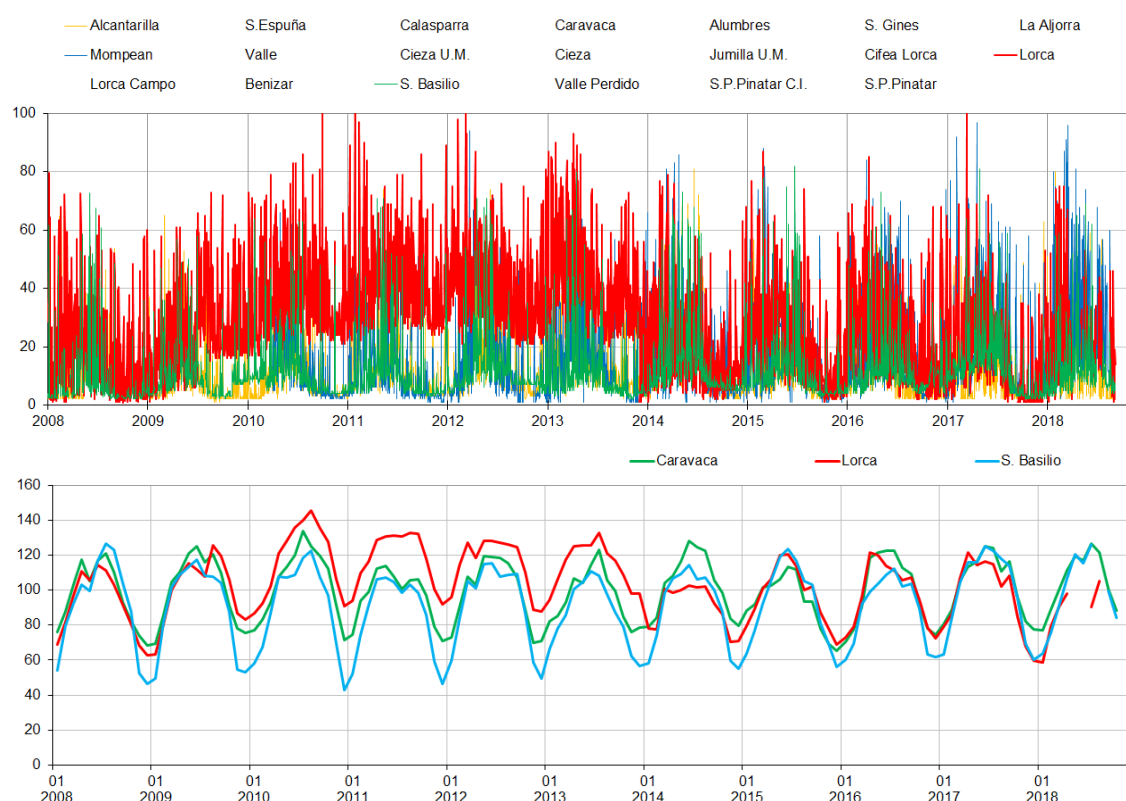


Figura AIII.4: (Arriba) Series de mínimos diarios de O₃ en cuatro estaciones de la RVCARM en 2008-2018. (Abajo) Promedios mensuales de los máximos diarios de O₃ en tres estaciones en el mismo periodo. (Unidades: µg/m³)

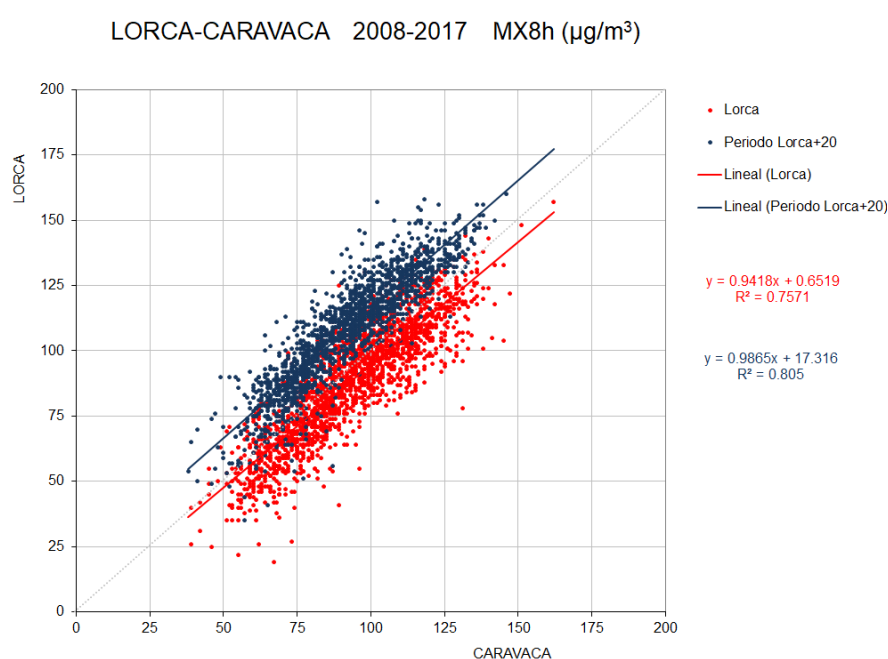


Figura AIII.5: Regresiones lineales de las series de máximos promedios octo-horarios diarios de ozono de Lorca y Caravaca separando el periodo agosto 2009-enero 2014 del resto. Ambas tienen un buen coeficiente de correlación y una pendiente muy similar. El desplazamiento entre ambas rectas delata el de los registros de Lorca en dicho periodo.

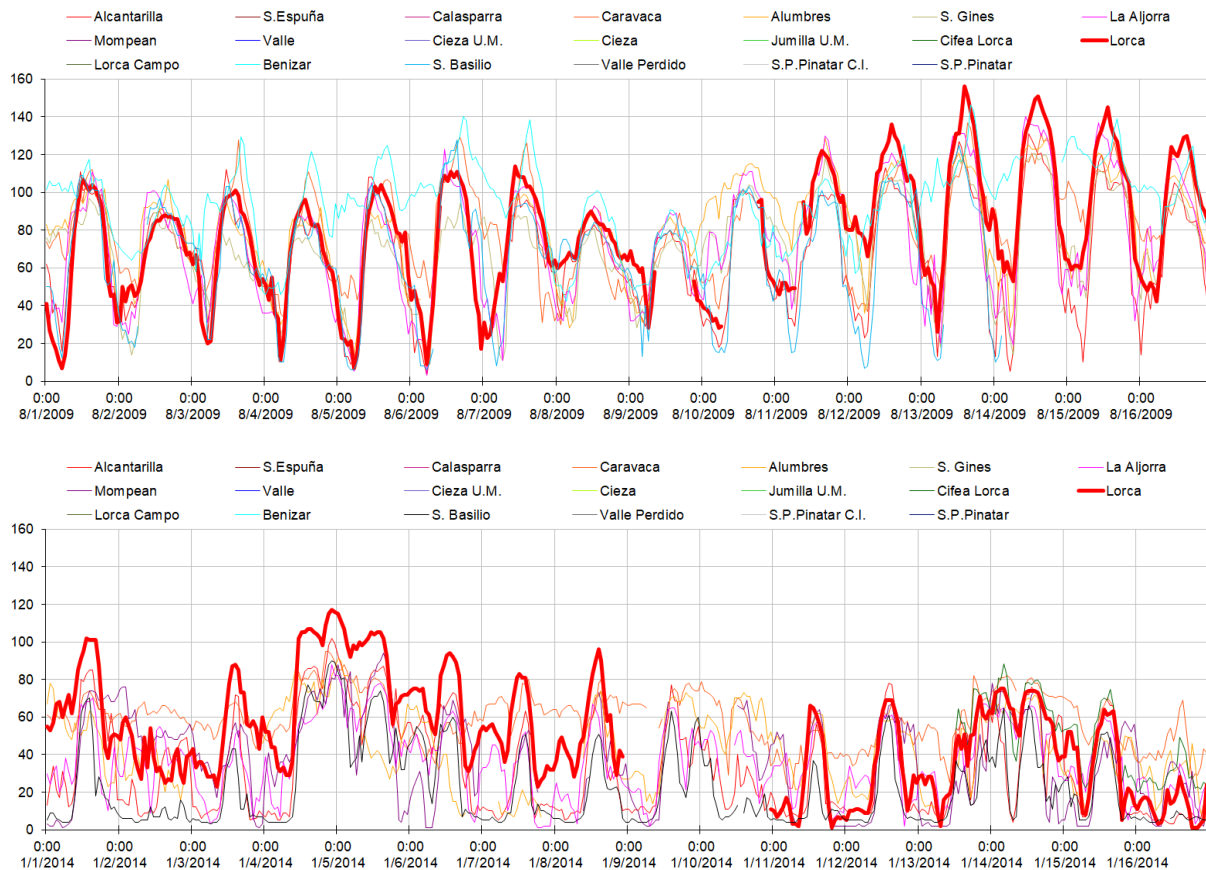


Figura AIII.6: (Arriba) Series de datos horarios de ozono entre el 1 y el 16 de agosto de 2009. (Abajo) Series de datos horarios entre el 1 y el 16 de enero de 2014. (Unidades: $\mu\text{g}/\text{m}^3$). El hueco al inicio del periodo sugiere algún tipo de problema que provoca el inicio de la incidencia. Y el hueco al final sugiere una actuación de mantenimiento (reparación o calibración del equipo) que elimina la incidencia.

Es evidente la falta de consistencia del comportamiento de las concentraciones en este periodo con el resto de la serie de Lorca desde su inicio (aunque en la figura AIII.4 solo se muestra desde el año 2008). **Para los autores del estudio no hay duda de que esta anomalía responde a un error en la medida durante el periodo citado.**

En general las concentraciones de ozono tienden a decaer durante la noche. Por una parte, en ausencia de luz no se genera ozono, y por otra la deposición sobre el terreno y el contacto con emisiones residuales nocturnas reducen su concentración a nivel de superficie. Finalmente, en puntos con alguna influencia del tráfico, como es el caso de Lorca, las emisiones de tráfico a primera hora de la mañana acaban eliminándolo por completo durante 1-2 horas. Con frecuencia la presencia de viento durante la noche y madrugada (incluso ligero, como las brisas de drenaje nocturno en primavera y verano que se canalizan valle abajo) favorecen la mezcla atmosférica. Estas situaciones inhiben la deposición y dificultan las reacciones químicas, ayudando a mantener concentraciones nocturnas significativas, pero cuando se recuperan las calmas las concentraciones vuelven a niveles bajos.

Únicamente en puntos sobreelevados y alejados de las emisiones (ej: Benizar o Caravaca), en los que la deposición y reacciones químicas con las emisiones residuales nocturnas pierden relevancia debido precisamente a esa ubicación, es habitual el mantenimiento de concentraciones significativas de ozono durante la noche (más altas cuanto más elevada

sea la cota y más alejado esté el punto de la influencia de emisiones). Pero la incidencia observada en Lorca no se puede asociar a esta causa, ya que la cabina no ha cambiado de emplazamiento.

Por otro lado, tampoco tiene explicación un incremento brusco y significativo de los niveles diurnos, en términos de máximos promedios octohorarios, durante un tiempo tan prolongado y en un área reducida. De darse tal situación (por ejemplo, a causa de la puesta en marcha de una gran instalación emisora, o un incremento sustancial de las emisiones de una instalación ya existente) un incremento de los niveles de ozono como el observado en Lorca afectaría a un área más extensa. En el caso de la RVCARM sería de esperar un incremento apreciable en otros puntos de la red como Caravaca, al menos durante primavera y verano cuando el interior de la región se encuentra a sotavento de las emisiones en el litoral y prelitoral.

En definitiva, el comportamiento observado no se puede explicar en base a cambios en ninguno de los factores que determinan la dinámica del ozono (emisiones, condiciones atmosféricas y química del ozono), puesto que no darían lugar a saltos tan bruscos en los valores mínimos, ni a niveles máximos afectando a un área reducida del territorio.

La situación descrita ha supuesto la contabilización entre 2010 y 2013 de un número anormalmente alto de superaciones del valor objetivo establecido para el ozono en Lorca. El análisis anterior permite estimar que estas cifras multiplican aproximadamente por cuatro el número de superaciones reales. Los gráficos de la figura AIII.7 muestran el número de superaciones en la RVCARM en el periodo 2008-2018 con los datos de Lorca originales y con los datos corregidos.

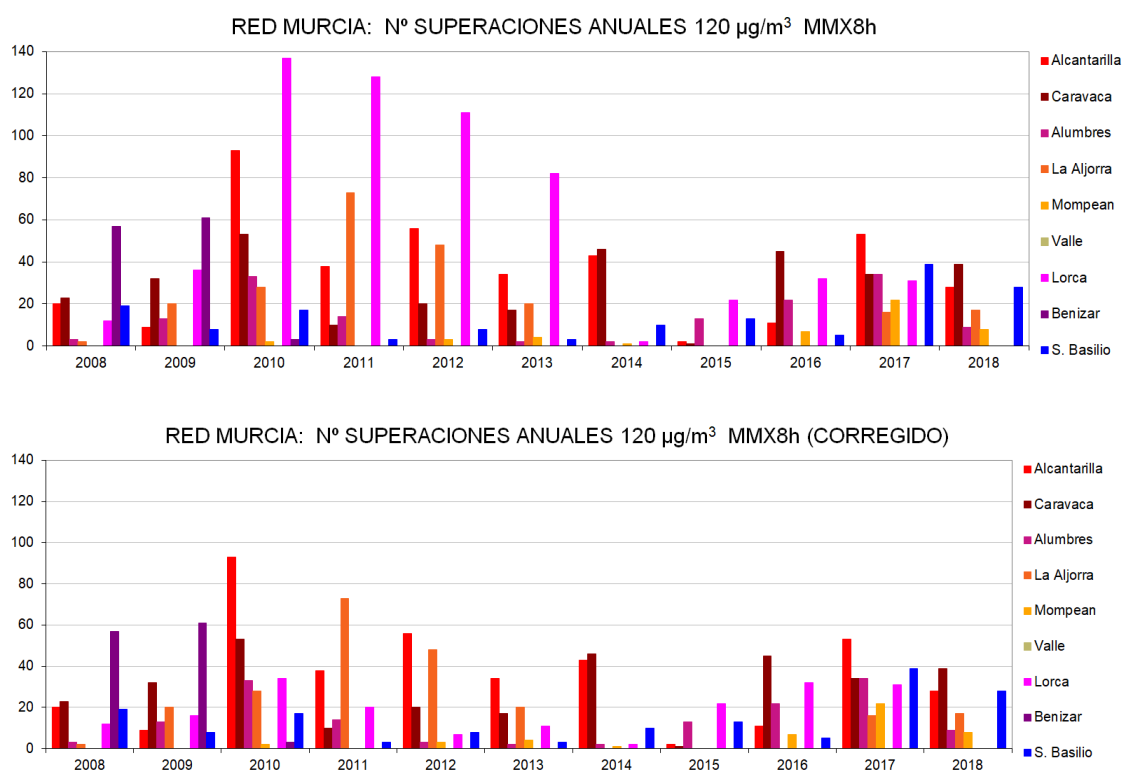


Figura AIII. 7: Superaciones anuales del Valor Objetivo de ozono con los datos de Lorca sin corregir (arriba) y corregidos (abajo)