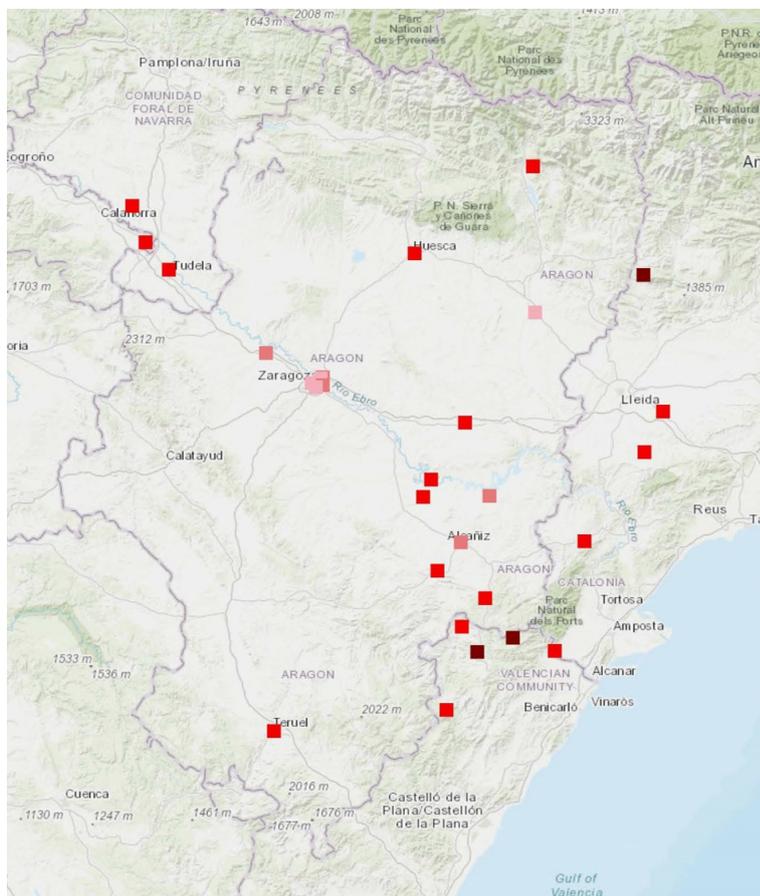


ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS (NO, NO₂ Y O₃ EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE ARAGÓN. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE CALIDAD DE DATOS



Informe para la Dirección General de Cambio Climático y Educación
Ambiental de Gobierno de Aragón



Diciembre 2020

Autores

Miguel Escudero Tellechea (Centro Universitario de la Defensa) *mescu@unizar.es*

Jordi Massagué Obradors (IDAEA-CSIC) *jordi.massague@idaea.csic.es*

Xavier Querol Carceller (IDAEA-CSIC) *xavier.querol@idaea.csic.es*

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
2. METODOLOGÍA Y SELECCIÓN DE ESTACIONES	5
2.1. Área de estudio	5
2.2. Bases de datos utilizadas	6
2.2.1. Estaciones de calidad del aire	6
2.2.2. Estaciones meteorológicas	10
2.3. Análisis de variabilidad espacial de vientos, NO, NO ₂ y O ₃	10
2.4. Convenios	11
2.4.1. Abreviaciones	11
2.4.2. Convenios horarios	12
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
3.1. Vientos dominantes	13
3.2. Niveles de contaminantes	13
ANEXOS	19

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El ozono (O_3) en la troposfera es un contaminante secundario y un importante gas de efecto invernadero originado a partir de reacciones químicas entre sus precursores. Su producción, asociada a procesos de fotooxidación de compuestos orgánicos volátiles (COVs) en presencia de óxidos de nitrógeno ($NO + NO_2 = NO_x$), se ve reforzada en condiciones de fuerte radiación solar y altas temperaturas (Figura 1.1). Además de los COVs, el monóxido de carbono (CO) y el metano (CH_4) son también importantes precursores de O_3 , sobre todo a escala de transporte a larga distancia.

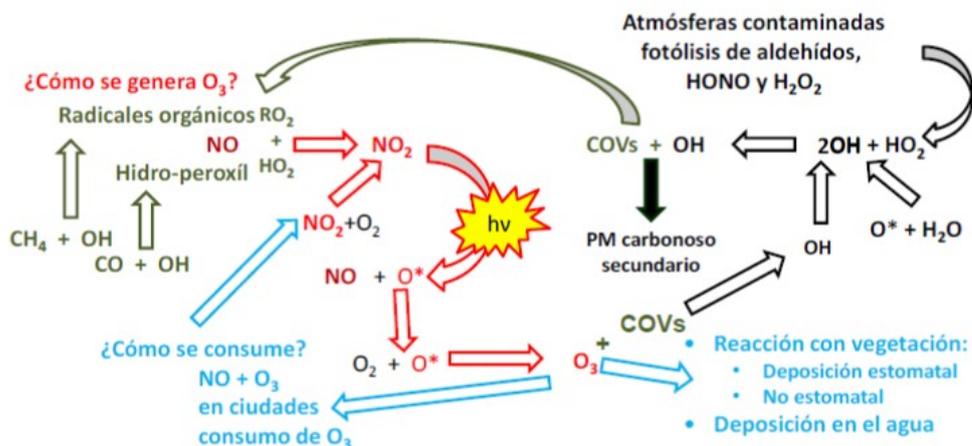


Figura 1.1: Procesos de generación y consumo de O_3 .

A escala global, aproximadamente el 90 % del O_3 troposférico se produce foto-químicamente en la troposfera. El sumidero de O_3 más importante a escala local y regional la titración de O_3 por NO ($NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$) y la ozonólisis de COVs pueden reducir marcada y temporalmente los niveles de O_3 .

Los niveles de O_3 varían significativamente dependiendo de los diferentes ambientes químicos atmosféricos y de los escenarios de transporte atmosférico y de transferencia vertical troposférica. En áreas contaminadas con NO_x , el NO favorece la destrucción de O_3 y su producción está gobernada por los niveles de COVs presentes. Estas condiciones son comúnmente referidas como COV-limitadas. En áreas rurales, la formación de O_3 está normalmente gobernada por los niveles

de hidrocarburos presentes, especialmente COVs biogénicos (BCOVs) emitidos por la vegetación, por lo que ésta aumenta con el incremento de los niveles de NO_x (condiciones NO_x-limitadas).

Los niveles de O₃ tienden a ser bajos o moderados en áreas urbanas o industrializadas y más elevados en áreas rurales, hacia donde las masas de aire contaminadas son transportadas, y en donde las posibilidades de reacción con otros compuestos se reducen y el tiempo de residencia en la atmósfera aumenta. Las variaciones horarias, diarias y anuales de niveles de O₃ en un lugar determinado están determinadas pues por múltiples factores, incluyendo las características geográficas, las condiciones meteorológicas predominantes y la proximidad a grandes fuentes de precursores.

Debido a su naturaleza altamente oxidante, el O₃ produce efectos negativos sobre la salud humana, la vegetación y el medio construido. Los estudios epidemiológicos demuestran un impacto sobre la morbilidad y la mortalidad humanas con afectaciones en los aparatos respiratorio y cardiovascular. El O₃ provoca afectaciones tanto en exposiciones episódicas (altas concentraciones en periodos cortos de tiempo) como crónicas (niveles moderados a lo largo de periodos de tiempo prolongados). Por el momento, no se ha establecido un umbral de niveles de O₃ por debajo del cual no exista impacto negativo sobre la salud en la exposición a largo plazo.

Debido a los citados efectos sobre la salud, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció en 2005 valores guía equivalentes a niveles máximos recomendados de O₃ (100 µg m⁻³ como media móvil 8h). 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 O₃ en particular (Tabla 1.1). Esta directiva ha sido transpuesta a la legislación española en el Real Decreto 102/2011, relativo a la mejora de la calidad del aire.

Tabla 1.1: Resumen de valores objetivo y umbrales definidos en la legislación para la protección a la salud humana.

Objetivos para la protección de la salud humana	Periodo promediado	Concentración O ₃ (µg m ⁻³)
valor objetivo (VO)	Máximo diario de las medias octohorarias (8h) del día	120
valor objetivo a largo plazo (VO)		120
umbral de información (UI)	1 h	180
umbral de alerta (UA)	1 h	240

Las regiones del sur de Europa, especialmente la cuenca del Mediterráneo, son las más expuestas a la contaminación por O₃ en Europa, donde las condiciones meteorológicas predominantes en épocas cálidas del año, las características de su orografía y su vegetación, junto a una mayor incidencia solar, son favorables para la producción y acumulación de O₃. Generalizadamente en España, se supera el objetivo a largo plazo para la protección de la salud. Una de las zonas donde esto sucede es en el valle del Ebro.

1.2. Objetivos

Los objetivos del presente estudio son:

- 1) Recopilación y análisis de calidad de datos de medidas en superficie de NO, NO₂ y O₃ de estaciones automáticas de calidad del aire en Aragón para un periodo de 13 años (2008-2019).

1.2 Objetivos

- ii) Recopilación y análisis de calidad de datos de datos meteorológicos en la misma zona y periodo.
- iii) Análisis de vientos dominantes en la zona de estudio.
- iv) Análisis de la variabilidad espacial de NO, NO₂ y O₃ en Aragón.

Los principales hitos que se quieren conseguir con este trabajo son:

- i) Compilar una base datos adecuada de datos meteorológicos y de contaminantes atmosféricos para implementar un análisis profundo de la fenomenología de episodios de O₃ en Aragón y, en particular, en valle del Ebro.
- ii) Identificar las zonas con niveles de O₃ más elevados y de los patrones atmosféricos de circulación principales en las citadas zonas.

Capítulo 2

METODOLOGÍA Y SELECCIÓN DE ESTACIONES

Para la selección de las estaciones para la evaluación se centra en el periodo de 12 años (2008-2019). Se pretende hacer una selección de estaciones automáticas de calidad del aire (CA) con datos en superficie de NO, NO₂ y O₃, completada con otra selección de estaciones meteorológicas en el mismo periodo. Las estaciones de CA se seleccionan de las redes autonómicas de Gobierno de Aragón, Navarra, Catalunya y de la Comunidad Valenciana, de la red del Ayuntamiento de Zaragoza, de la red EMEP y de las redes privadas de las centrales térmicas de Teruel-Andorra, Escatrón, Castelnou y Global3. Para complementar el estudio se pretende hacer una selección de estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de AEMET en Aragón.

2.1. Área de estudio

la Comunidad Autónoma (CA) de Aragón se encuentra situada en el Noreste de la Península Ibérica (PIB) ocupando una extensión de más de 47700 km² y una población que no alcanza el 1330000 de habitantes lo que le confiere una baja densidad demográfica (<28 hab/km²). La población, además, está desigualmente distribuida con una conurbación principal, Zaragoza, que se encuentra en el centro geográfico de la CA y cuenta con más de 750000 habitantes y extensas zonas rurales/naturales con pocos habitantes.

Aragón cuenta con una gran variabilidad orográfica y, en consecuencia, climática. Se distinguen tres zonas principales de norte a sur: Pirineos, Depresión del Ebro y Sistema Ibérico. En la parte norte se encuentra el macizo pirenaico, en la zona central e en el que existen diversos picos que superan los 3000 msnm. En esta zona se registra un clima típico de alpino húmedo y suave.

Descendiendo hacia el sur nos encontramos con la depresión del Ebro cuyo curso recorre de oeste a este la parte central de Aragón. Se trata de un valle amplio y eminentemente llano que corresponde con el curso central de río. El clima del valle del Ebro (VdE) es de tipo Mediterráneo con características continentales semiáridas por las escasas precipitaciones que se registran a nivel anual (en el entorno de 320 mm/año). Las temperaturas son extremas con fríos inviernos en los que se producen frecuentemente inversiones térmicas y veranos muy calurosos con temperaturas superando los 35° C muchos días. Las escasas y desiguales lluvias se centran en otoño y primavera.

En el sur se encuentra el Sistema Ibérico, una zona que marca el comienzo de la meseta central

de la PIB. Por ello, la altimetría promedio de esta zona es elevada (superando los 1000 msnm) y aparecen sierras sin unidad estructural clara en las que hay picos que superan los 2000 msnm. El clima en esta zona es continental con inviernos considerablemente fríos y veranos calurosos aunque, por efecto de la latitud, no tan extremos como en el VdE.

Las fuentes principales de contaminantes atmosféricos son:

- i) Las emisiones residenciales y, especialmente, de tráfico de la conurbación de Zaragoza y de las vías de comunicación que cruzan longitudinalmente Aragón y que son densamente empleadas (Autovías y autopistas A-2, AP-2 A-68, AP-68 y AP-15). También hay una autovía que cruza de norte a sur Aragón algo menos masificada en términos de tráfico (A-23). El transporte por carretera es, en parte, tan elevado por el hecho de que Zaragoza es una destacada conexión logística internacional.
- ii) La fuerte actividad agrícola y ganadera en toda la CA, que convierten Aragón, por ejemplo, en un punto caliente de emisiones de amoníaco (NH_3).
- iii) Una zona de aglomeración de centrales de ciclo combinado en la zona del bajo Ebro: Escatrón, Castelnou y Global3.
- iv) Núcleos de industria química en ubicaciones como Monzón o Sabinánigo.
- v) Emisiones biogénicas por las grandes extensiones de zonas naturales.

También es necesario tener en consideración que Aragón tiene regiones limítrofes con altas densidades de población y en las que se ubican zonas industriales como Catalunya, la Comunidad Valenciana, Navarra e incluso Madrid. Las emisiones de estas zonas deben tenerse en cuenta especialmente de cara a la formación y acumulación de contaminantes como el O_3 que, por sus características físico-químicas, puede verse transportado largas distancias desde las zonas fuente.

2.2. Bases de datos utilizadas

2.2.1. Estaciones de calidad del aire

La evaluación de la CA se realiza, como herramienta principal, con los datos proporcionados por estaciones automáticas de medición distribuidas en el territorio. Las redes de estaciones son gestionadas generalmente por Comunidades Autónomas y determinadas Entidades Locales aunque también hay algunas de ámbito estatal (la más destacada es la red EMEP), de orientación científica o de ámbito privado. En España hay en la actualidad más de 600 estaciones de medición fija, distribuidas por toda la geografía del país.

Las estaciones de vigilancia de la contaminación del aire pueden clasificarse, según el tipo de área en la que se localizan, como urbanas, suburbanas y rurales; y según la tipología de la principal fuente de emisión que las influye (que determina unos contaminantes predominantes), como de tráfico, industriales o de fondo. Estas tipologías se pueden definir:

- i) Según el tipo de área en la que se localizan:
 - Urbanas: las ubicadas en zonas edificadas de forma continua.

- Suburbanas: las que se encuentran en zonas con presencia continuada de edificios, separadas por zonas no urbanizadas (pequeños lagos, bosques, tierras agrícolas...).
- Rurales: entendidas como las situadas en aquellas zonas que no satisfacen los criterios de las dos categorías anteriores.

ii) Según la tipología de la principal fuente de emisión influyente:

- De tráfico: las situadas de tal manera que su nivel de contaminación está determinado principalmente por las emisiones procedentes de los vehículos de una calle o carretera próximas.
- Industriales: las ubicadas de tal manera que su nivel de contaminación se debe fundamentalmente a la contribución de fuentes industriales.
- De fondo: aquellas en las que no se manifiesta ninguna fuente de emisión como predominante.

Aunque hay sistemas de medición manuales para determinados contaminantes (principalmente para material particulado atmosférico), las estaciones de CA suelen contar con equipos automáticos que registran a tiempo real las concentraciones de contaminantes recogidos en la legislación como ozono (O₃), óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), entre otros. El Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO) es el responsable de unificar la información relativa a la evaluación de la calidad del aire en España para cada año y comunicarla a la Comisión Europea (Decisión 2011/850/UE).

Este estudio pretende seleccionar las estaciones de CA de las distintas redes existentes en Aragón así como de otras regiones limítrofes diseñar con la que poder afrontar un estudio posterior de análisis de series temporales de óxidos de nitrógeno y ozono. Se ha establecido un periodo de estudio de 12 años (2008–2019) que se considera suficientemente amplio para tener una buena representatividad temporal de un número considerable de estaciones. Este periodo podría verse ampliado incorporando el año 2020 cuando los datos de este año estén disponibles. Los criterios de selección de estaciones establecidos son los siguientes:

- i) Que midan concentración de O₃.
- ii) Disponibilidad de un 75 % de datos válidos de O₃ entre abril y septiembre durante un mínimo de 6 años dentro del periodo 2008-2019.
- iii) Operatividad de la estación al menos un año entre 2017 y 2019.

Las estaciones elegidas se presentan en la Figura 2.1 y en las Tablas 2.1 (estaciones de Aragón) y 2.2 (estaciones de fuera de Aragón). Se han incorporado excepcionalmente dos estaciones que no disponen de datos suficientes de O₃ pero que sí disponen de datos de NO y NO₂ en el periodo de estudio. Estas dos estaciones son Hajar y Puigmoreno y se han seleccionado para la evaluación de óxidos de nitrógeno por encontrarse en una zona (bajo Ebro) en la que se han registrado puntualmente niveles elevados de O₃.

El número total de estaciones de CA seleccionadas es de 32. De ellas, 20 están dentro del territorio aragonés y pertenecen a las distintas redes existentes en la CA: red de calidad del Gobierno de Aragón (RCGA), Red Automática de Calidad del Aire del Ayuntamiento de Zaragoza y

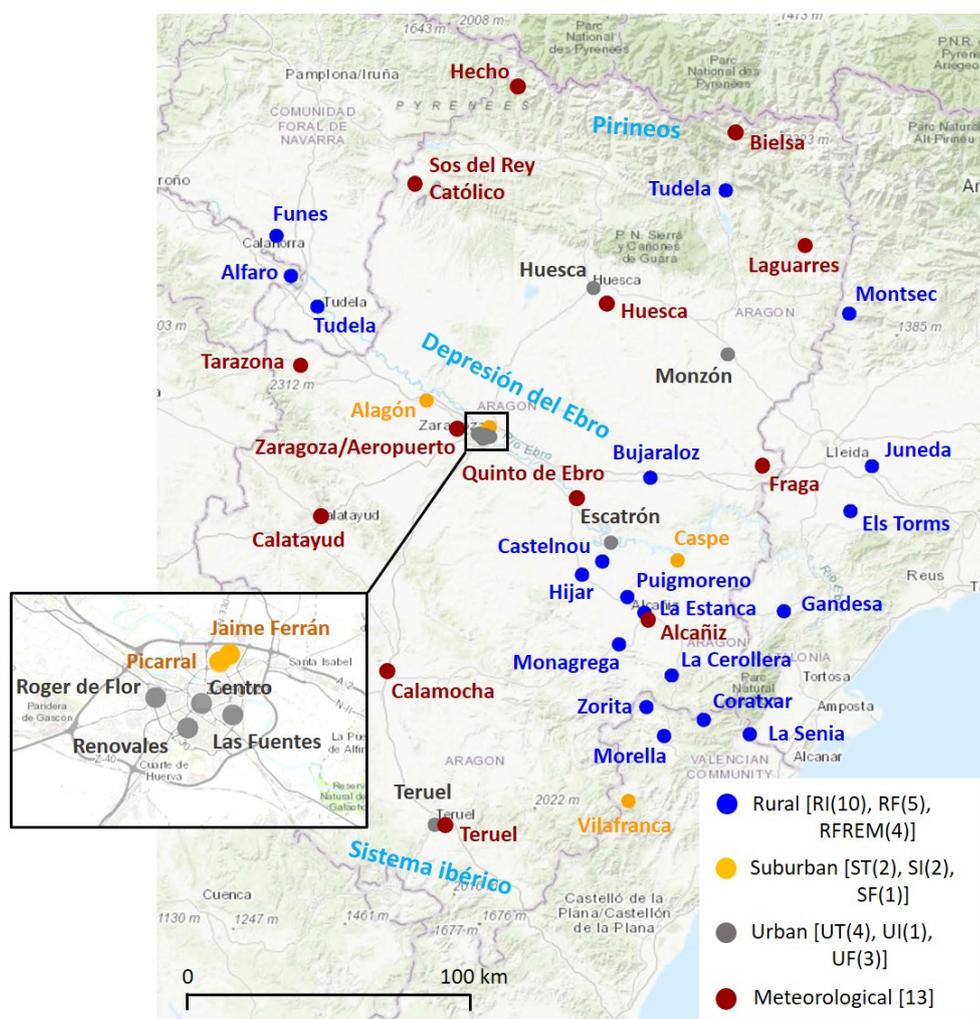


Figura 2.1: Estaciones de CA (32) y meteorológicas de la AEMET (13) seleccionadas (59) en el área de estudio distinguiendo su tipología. Tipología CA urbana (de fondo: UB, industrial: UIN y de tráfico: UT), suburbana (de fondo: SB industrial: SI y de tráfico: ST) y rural (de fondo: RF, industrial: RI y de fondo regional: RFREM).

redes privadas de centrales térmicas (CT) o de ciclo combinado (CTCC) (CT Teruel, CTCC Escatrón, CTCC Castelnou y CTCC Global3). El resto de emplazamientos están ubicados en regiones limítrofes a Aragón y se han considerado de interés para realizar una descripción adecuada de los niveles de O_3 en la zona. Se han seleccionado estaciones de las siguientes redes: 4 de la Red de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica (XVPCA) de Catalunya, 4 de la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica (RVVCCA), 2 de la Red de Estaciones de Control de Calidad del Aire de Navarra y sendas estaciones de red de vigilancia de calidad del aire de La Rioja y de la red EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme). Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran las características principales de las estaciones de CA, así como los porcentajes de disponibilidad de datos de O_3 , NO y NO_2 en los meses de primavera y verano durante el periodo 2008–2019.

Tal y como sucede en la selección de estaciones disponibles en la actualidad para la evaluación de los niveles de O_3 en Aragón, en el estudio de Diéguez et al., de 2009¹ ya se destacaba que la

¹Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por ozono troposférico en España, INF. FIN/O3/2009

2.2 Bases de datos utilizadas

Tabla 2.1: Características de las estaciones de CA de Aragón usadas en el estudio: provincia, nombre, código, tipo: urbanas (tráfico, industrial o fondo: UT, UIN, UB), suburbanas (tráfico, industrial o fondo: ST, SI, SB), rurales (industrial, de fondo o de fondo regional: RI, RB, RFREM), coordenadas en grados decimales, altitud en m s.n.m. y disponibilidad anual de datos en % de O₃, NO y NO₂ durante el periodo abril a septiembre en 2008-2019.

PROVINCIA	NOMBRE	CÓDIGO	TIPO	LONG.	LAT.	ALT.	CONT.	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	#Years>75			
HUESCA	HUESCA	ES1417A	UT	-0.40	42.14	488	O ₃	99.3	94.9	93.3	92.0	99.6	99.4	98.8	96.2	96.9	99.3	99.8	96.2	12			
							NO	99.1	93.1	68.6	92.6	99.3	75.8	98.8	95.3	96.1	92.9	99.6	96.0	11			
							NO ₂	99.2	93.1	68.6	92.6	99.3	75.8	98.8	95.3	96.1	92.9	99.6	96.0	11			
	MONZON	ES2041A	UF	0.19	41.92	308	O ₃								99.6	87.7	99.6	98.3	99.8	99.7	6		
							NO								99.7	89.1	98.3	99.6	99.6	99.6	6		
							NO ₂								99.7	89.1	98.3	99.6	99.6	99.6	6		
	TORRELISA	ES1883A	RFREM	0.18	42.46	1005	O ₃	98.9	93.6	97.1	99.7	96.4	99.2	97.8	89.0	99.7	99.5	99.7	99.6	12			
							NO	98.6	88.0	93.9	99.0	93.3	98.5	83.0	68.2	96.2	99.5	99.5	99.6	11			
							NO ₂	98.9	92.6	93.9	99.0	93.3	98.5	83.0	68.2	96.2	99.5	99.5	99.6	11			
TERUEL	LA ESTANCA	ES0324A	RI	-0.18	41.05	395	O ₃	85.7	100.0	98.9	99.9	96.6	98.8	92.9	99.3	96.2	98.9	94.7	97.4	12			
							NO	99.2	100.0	98.9	99.8	98.6	98.8	92.9	99.3	97.2	98.9	95.1	99.0	12			
							NO ₂	100.0	100.0	98.9	99.8	98.6	98.8	92.9	99.3	97.2	98.9	95.1	99.0	12			
	PUIGMORENO	ES1881A	RI	-0.25	41.11	320	O ₃	14.6	95.0	96.2	94.6	98.7	98.6	92.3						6			
							NO	97.0	97.3	97.0	96.4	96.2	98.1	93.7	93.1	99.3	97.7	93.3	91.4	12			
							NO ₂	93.5	97.2	96.7	96.8	99.1	98.0	93.7	93.1	99.3	97.7	93.3	91.4	12			
	MONAGREGA	ES0316A	RFREM	-0.29	40.95	570	O ₃	100.0	99.5	98.0	96.2	88.8	100.0	99.7	93.4	96.6	98.8	97.0	99.8	12			
							NO	99.4	99.4	97.3	96.2	96.3	100.0	99.7	93.4	96.5	98.8	97.8	96.8	12			
							NO ₂	99.4	99.5	97.9	96.2	96.4	100.0	99.7	93.4	96.5	98.8	97.8	96.8	12			
	CASTELNOU	ES1879A	RI	-0.36	41.23	201	O ₃	96.6	98.2	98.9	91.0					96.7	99.2	98.9	99.0	97.2	9		
							NO	98.7	98.8	99.3	98.6										4		
							NO ₂	98.7	95.4	99.3	98.6										4		
	LA CEROLLERA	ES0813A	RI	-0.06	40.84	830	O ₃	98.0	99.2	99.9	99.9	100.0	97.5	98.4	99.1	97.0	98.9	96.7	98.5	12			
							NO	97.7	98.2	99.9	96.9	95.0	99.9	98.4						7			
							NO ₂	97.7	98.2	99.9	96.9	95.0	99.9	98.4						7			
	HIJAR	ES1880A	RI	-0.45	41.18	291	O ₃	85.6	92.6	96.3	91.8	97.4	100.0	87.3						7			
							NO	84.2	92.3	94.6	91.6	92.3	45.2	79.8	98.2	99.3	96.4	95.8	90.8	11			
							NO ₂	79.9	91.3	94.7	91.7	95.6	45.2	85.2	98.2	99.3	96.5	95.8	90.8	11			
	TERUEL	ES1421A	UF	-1.11	40.34	915	O ₃	91.0	93.6	91.6	98.2	97.4	94.6	97.8	86.9	98.8	91.5	99.2	99.5	12			
							NO	93.8	24.9	87.8	91.1	97.3	90.2	90.6	86.8	99.3	96.5	99.1	99.6	11			
							NO ₂	95.7	25.2	87.8	91.1	97.3	90.2	90.6	86.8	99.3	96.5	99.1	99.6	11			
	ZARAGOZA	ALAGON	ES1418A	ST	-1.14	41.76	235	O ₃	98.1	99.4	99.7	99.6	97.9	98.3	95.1	97.8	98.4	93.5	99.0	99.4	12		
								NO	92.0	97.1	98.7	99.4	98.7	98.4	95.2	96.5	98.4	91.1	98.8	97.1	12		
								NO ₂	99.5	98.8	98.7	99.4	98.7	98.4	95.2	96.5	98.4	91.1	98.8	97.1	12		
BUJARALAZ		ES1400A	RF	-0.15	41.51	327	O ₃	88.5	93.5	87.2	94.3	99.0	99.2	96.4	97.4	99.6	86.2	99.8	97.8	12			
							NO	89.2	90.0	91.2	95.9	82.5	80.8	95.3	97.4	99.6	98.0	99.7	97.8	12			
							NO ₂	90.7	96.3	91.2	95.9	82.5	80.8	95.3	97.4	99.6	98.0	99.7	97.8	12			
CASPE		ES1848A	SI	-0.03	41.23	152	O ₃	90.6	84.3	86.3	94.1	98.4	95.2	94.6	65.8	96.3	96.2	88.3	95.9	11			
							NO	88.8	80.0	87.7	92.4	86.5	44.6	93.3	80.2	85.4	80.3	88.2	98.0	11			
							NO ₂	86.7	84.2	87.8	92.4	86.5	44.6	93.3	80.2	85.4	80.3	88.2	98.0	11			
ESCATRON		ES1130A	UI	-0.33	41.29	175	O ₃	74.4	75.4	93.0	91.6	96.4	90.0	95.5	98.6	87.6	96.0	99.5	97.3	11			
							NO	89.9	78.0	85.8	89.0	88.4	21.7	73.2					5				
							NO ₂	89.9	84.4	85.5	89.0	88.4	21.7	73.2					5				
EL PICARRAL		ES1044A	ST	-0.87	41.67	195	O ₃	96.7	99.2	97.6	98.5	87.0	98.4	98.6	89.6	98.1	99.1	98.7	96.7	12			
							NO		99.1		98.3	93.6	86.1	98.7	89.2	94.8	98.4	100.0	97.2	10			
							NO ₂	96.7	99.2	97.5	97.6	93.6	95.2	98.8	88.7	97.7	98.6	100.0	97.2	12			
ROGER DE FLOR		ES1047A	UT	-0.92	41.65	212	O ₃	59.3	99.9	99.1	98.4	98.7	99.7	93.4	97.3	94.4	99.0	93.6	100.0	11			
							NO				99.1	98.8	96.1	98.2	97.8	99.3	99.4	94.3	99.9	9			
							NO ₂	99.4	99.9	99.0	99.0	98.8	96.4	98.9	99.9	99.3	99.1	94.3	99.8	12			
JAIME FERRAN		ES1090A	SI	-0.86	41.67	196	O ₃	98.4	96.8	92.0								93.0	99.4	89.2	6		
							NO													94.4	99.8	74.6	2
							NO ₂													94.4	99.8	79.9	3
RENOVALES		ES1641A	UF	-0.89	41.64	220	O ₃	61.9	99.0	98.3	98.1	98.0	95.7	96.2	98.4	99.1	99.7	96.9	94.7	11			
							NO				98.1	98.9	99.8	95.7	97.7	99.8	97.4	98.4	90.1	9			
							NO ₂	61.9	99.1	98.2	98.1	98.7	99.7	96.2	99.0	99.8	97.4	98.1	97.5	11			
LAS FUENTES	ES1836A	UT	-0.86	41.64	198	O ₃	95.9	93.9	99.5									98.0	99.9	95.8	6		
						NO													96.3	99.9	88.9	3	
						NO ₂													96.3	99.9	91.4	3	
CENTRO	ES1837A	UT	-0.88	41.65	210	O ₃	99.8	97.6	98.5									98.2	93.7	94.6	6		
						NO													96.2	87.8	81.7	3	
						NO ₂													96.3	91.3	88.6	3	

distribución de estaciones era extensa en el territorio pero desigualmente distribuidas. En la zona del bajo Aragón y, en general en el flanco este de Aragón este hay muchas estaciones pero hay zonas mal cubiertas como el este de la CA (sólo Alagón se encuentra en esta zona). Además la mayoría de las estaciones son de tipo rural y puede haber cierto déficit de estaciones suburbanas donde, en muchas ocasiones, se registran episodios intensos de O₃.

Tabla 2.2: Características de las estaciones de CA de fuera de Aragón usadas en el estudio: provincia, nombre, código, tipo: urbanas (tráfico, industrial o fondo: UT, UIN, UB), suburbanas (tráfico, industrial o fondo: ST, SI, SB), rurales (industrial, de fondo o de fondo regional: RI, RB, RFREM), coordenadas en grados decimales, altitud en m s.n.m. y disponibilidad anual de datos en % de O₃, NO y NO₂ durante el periodo abril a septiembre en 2008-2019.

PROVINCIA	NOMBRE	CÓDIGO	TIPO	LONG.	LAT.	ALT.	CONT.	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	#>75
CASTELLÓN	MORELLA	ES1441A	RI	-0.09	40.64	1150	O ₃	99.6	95.9	94.9	97.7	98.0	87.9	95.7	88.4	99.5	99.7	99.1	99.5	12
							NO	86.0	90.1	92.9	75.2	17.1	87.8	58.2	71.2	99.5	99.7	99.3	99.0	9
							NO ₂	86.0	90.1	92.9	75.2	17.1	87.8	58.2	71.2	99.5	99.7	99.3	99.0	9
	CORATXAR	ES1437A	RI	0.08	40.69	1200	O ₃	78.8	87.2	79.8	89.0	95.8	38.6	92.0	98.0	97.1	99.4	93.9	95.9	11
							NO	82.0	96.1	75.5	94.8	98.4	79.7	67.7	97.8	98.9	99.5	94.5	96.0	11
							NO ₂	82.0	96.1	75.5	94.8	98.4	79.7	67.7	97.8	98.9	99.5	94.5	96.0	11
	VILAFRANCA	ES1435A	SF	-0.25	40.42	1125	O ₃	89.6	83.8	92.3	85.2	88.2	95.9	93.7	99.3	94.6	93.6	97.4	87.0	12
							NO	89.7	82.1	82.9	80.3	57.7	45.4	70.2	99.3	95.2	94.4	93.0	98.4	9
							NO ₂	89.7	82.1	82.9	80.3	57.7	44.7	70.2	99.3	95.2	94.4	93.0	98.4	9
	ZORITA	ES1543A	RF	-0.17	40.74	619	O ₃	96.0	99.6	99.7	97.2	96.0	99.8	99.8	94.5	99.8	97.6	91.3	80.5	12
							NO	92.6	86.4	87.8	94.5	96.8	96.2	94.9	94.3	98.6	98.5	93.6	96.0	12
							NO ₂	92.6	86.4	87.8	94.5	96.8	96.2	94.9	94.3	98.6	98.5	93.6	96.0	12
LLEIDA	JUNEDA	ES2034A	RF	0.83	41.54	255	O ₃							99.7	99.0	99.7	99.2	98.4	99.7	6
							NO							98.4	89.3	78.5	98.8	99.4	99.6	6
							NO ₂							98.4	89.3	78.5	98.8	99.4	99.6	6
	MONTSEC	ES1982A	RFREM	0.73	42.05	1570	O ₃				96.2	94.4	94.6	94.4	98.3	97.2	94.7	97.7	97.0	9
							NO				95.4	95.1	96.0	93.6	96.8	97.5	95.2	97.6	97.1	9
							NO ₂				95.4	95.1	95.6	93.6	96.8	97.5	95.2	97.6	97.1	9
	ELS TORMS	ES0014R	RFREM	0.73	41.39	470	O ₃	99.0	99.2	98.6	99.6	99.3	97.4	98.0	97.7	98.5	99.1	99.1	98.3	12
							NO	97.2	99.0	98.5	99.3	98.3	94.4	98.3	97.2	98.3	99.0	98.9	98.2	12
							NO ₂	97.2	99.0	98.8	99.3	98.3	94.4	98.3	97.2	98.3	99.0	98.9	98.2	12
LA RIOJA	ALFARO	ES1649A	RI	-1.74	42.18	350	O ₃	98.5	99.7	99.6	99.7	98.8	99.7	99.6	99.5	96.4	98.1	99.2	98.5	12
							NO	95.1	96.3	98.9	99.6	99.4	99.6	99.6	99.4	97.6	97.6	99.1	98.4	12
							NO ₂	95.8	99.0	99.5	99.6	99.5	99.6	99.6	99.4	97.6	97.6	99.1	98.6	12
NAVARRA	FUNES	ES1662A	RI	-1.81	42.31	460	O ₃	99.4	99.5	97.0	99.4	99.7	98.5	99.0	98.8	98.5	93.2	99.0	98.5	12
							NO	99.7	99.5	94.6	96.6	99.8	99.5	97.1	98.8	98.5	94.7	99.0	98.5	12
							NO ₂	99.7	99.5	95.7	96.6	99.8	99.5	97.1	98.8	98.5	94.7	99.0	98.5	12
	TUDELA	ES1661A	RI	-1.63	42.07	383	O ₃	99.3	99.7	99.2	99.8	99.6	98.5	99.1	99.3	97.5	99.1	86.5	95.2	12
							NO	99.6	99.2	98.6	96.3	99.5	98.4	96.4	98.6	99.2	96.4	92.2	96.8	12
							NO ₂	99.6	99.4	98.7	96.3	99.5	98.4	96.4	98.6	99.2	96.4	92.2	96.8	12
TARRAGONA	LA SENIA	ES1754A	RF	0.29	40.64	428	O ₃	99.6	99.5	99.3	99.3	99.0	99.7	99.7	96.8	99.6	99.4	99.0	96.2	12
							NO													0
	GANDESA	ES1379A	RF	0.44	41.06	368	O ₃	95.6	98.9	98.2	98.5	98.4	99.9	99.1	98.0	99.1	97.1	94.8	99.0	12
							NO													0
							NO ₂												0	

2.2.2. Estaciones meteorológicas

La Agencia Española de METeorología (AEMET) dispone de una red de observación en superficie de casi 800 estaciones que incluye tanto observatorios convencionales como sistemas de teledetección que genera información a tiempo real sobre distintas variables meteorológicas en todo el territorio.

En combinación con la selección de estaciones de CA realizada, se ha realizado una selección de estaciones meteorológicas automáticas distribuidas por el territorio de la CA de Aragón y que permitirán estudiar la dinámica de transporte de contaminantes en la región. Esto se hará usando principalmente datos de intensidad y dirección del viento que, eventualmente pueden verse completados con datos de otras variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, radiación solar...). La Figura 2.1 muestra la ubicación de las 13 estaciones meteorológicas seleccionadas y que, en todos los casos, muestran una buena cobertura temporal a lo largo del periodo 2008-2019 (Tabla 2.3).

2.3. Análisis de variabilidad espacial de vientos, NO, NO₂ y O₃

Se ha llevado a cabo un estudio preliminar de la variabilidad espacial de la dirección e intensidad de viento en diferentes regiones de la zona de estudio para valorar la influencia de dichos

Tabla 2.3: Estaciones meteorológicas usadas en el estudio: provincia, nombre, coordenadas en grados decimales, altitud en m s.n.m. y disponibilidad anual de datos en % durante el periodo abril a septiembre en 2008-2019.

	LONG.	LAT.	ALT.	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	#Years>80
ALCAÑIZ	-0.14	41.03	334	98.9	94.4	91.6	94.2	77.0	68.9	55.7	100.0	97.8	99.5	98.4	100.0	9
BIELSA	0.22	42.37	992	78.1	87.8	96.3	92.2	78.4	96.7	88.0	80.3	100.0	98.9	100.0	100.0	10
CALAMOCHA	-1.29	40.55	890		97.0	94.9	33.2	99.8	99.8	99.9	99.7	100.0	100.0	100.0	100.0	10
CALATAYUD	-1.65	41.20	582	92.3			92.4	84.3	90.6	94.9	99.5	98.9	92.9	99.4	99.8	10
FRAGA	0.36	41.31	170			100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	94.5	100.0	100.0	100.0	100.0	10
HECHO	-0.75	42.44	860		47.0	96.1	68.2	89.4	98.4	98.0	86.3	100.0	100.0	98.9	100.0	9
HUESCA	-0.33	42.05	546	100.0	100.0	99.8	99.8	99.7	96.0	99.6	99.4	99.7	100.0	100.0	100.0	12
LAGUARRES	0.47	42.12	600		99.4	98.3	100.0	100.0	96.1	98.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	11
QUINTO	-0.50	41.25	205		49.1	98.9	99.9	99.8	98.8	99.9	92.9	100.0	100.0	100.0	100.0	10
SOS DEL REY CATOLICO	-1.21	42.29	626	88.2	88.2	96.7	81.9		97.7	77.0	100.0	92.3	100.0	79.7	94.5	9
TARAZONA	-1.72	41.55	475		49.6	98.9	67.2	100.0	100.0	99.9	100.0	98.2	100.0	100.0	98.9	9
TERUEL	-1.12	40.21	900	100.0	27.7	27.7	13.9	99.9	99.6	98.6	99.9	99.8	100.0	100.0	100.0	9
ZARAGOZA/AEROPUERTO	-1.00	41.39	249	100.0	99.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	12

patrones en la variabilidad espacial de contaminantes atmosféricos. Este estudio se trata de una evaluación preliminar para concluir qué zonas de Aragón y su entorno muestran mayores niveles de contaminación de O₃. Este estudio deberá ser completado en el futuro con uno más detallado en el que se evalúen patrones de variabilidad diaria, semanal, etc y tendencias, entre otras cuestiones.

2.4. Convenios

2.4.1. Abreviaciones

En este informe, las abreviaciones utilizadas para clasificar las estaciones de CA son, según tipología y área: Tipología urbana (U; de fondo: UB, industrial: UIN y de tráfico: UT), suburbana (S; de tráfico: ST, de fondo: SB, industrial: SI) y rural (R; de fondo: RB, industrial: RI y de fondo regional: RFREM).

La abreviación 8h, se refiere a las medias octohorarias de los niveles de O₃; VO, a valor objetivo; UI, umbral de información, VdE, a Valle del Ebro; CA, a calidad del aire.

Las abreviaciones utilizadas para referirse a direcciones son de acuerdo a los ocho rumbos colaterales:

- Norte : N
- Norte-noreste : NNE
- Noreste : NE
- Este-noreste : ENE
- Este : E
- Este-sureste : ESE
- Sureste : SE
- Sur-suroeste : SSE
- Sur : S

- Sur-suroeste : SSO
- Suroeste : SO
- Oeste-suroeste : OSO
- Oeste : O
- Oeste-noroeste : ONO
- Noroeste : NO
- Norte-noroeste : NNO

2.4.2. Convenios horarios

En este informe la hora de referencia de los datos es UTC. En España, la hora local en horario de invierno es UTC +1h y UTC +2h en horario de verano.

Capítulo 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Vientos dominantes

La variabilidad espacial y temporal del O_3 viene condicionada por los patrones de circulación dominantes en la zona de estudio. Por ello es importante caracterizar los vientos conocer el transporte atmosférico de los contaminantes tanto primarios como secundarios (caso del O_3). Se han empleado datos de dirección y velocidad de viento en superficie de 13 estaciones meteorológicas de la AEMET distribuidas por Aragón (Figura 2.1).

En las Figura 3.1 se pueden observar las rosas de viento de cada estación meteorológica para el periodo 2008-2019 en el periodo abril-septiembre. En general se observan vientos dominantes en los periodos cálidos con componentes principal que oeste pero que, según la ubicación se canaliza como O o NO en la mayoría de la ubicaciones pero también puede canalizan de acuerdo a la topografía local (por ejemplo la de un valle de montaña) en dirección N o SW. Las zonas centrales como el CdE y las zonas de topografía suave al sur y al norte del mismo muestran velocidades más elevadas, especialmente en las ubicaciones anejas al curso del río. También hay una componente secundaria opuesta a la mencionada que da cuenta de los vientos más débiles de levante asociados a periodos anticiclónicos de verano.

También se han confeccionado las rosas de viento desagregadas en periodo diurno y nocturno para cada año con disponibilidad de datos superior al 75 % de datos horarios entre abril y septiembre (Figuras 3.5-3.11). Los patrones se repiten anualmente con leves variaciones. Las principales diferencias entre los periodos diurnos y nocturnos tienen que ver con una mayor frecuencia de vientos E, SE o S (según la dirección de la dirección de canalización particular en cada emplazamiento) durante el día. Esto se debe a un reforzamiento térmico de las circulaciones de levante durante el periodo diurno.

3.2. Niveles de contaminantes

En la Figura 3.2 se presentan los niveles promedio de NO y NO_2 en abril-septiembre de 2008-2019. Los niveles más altos de NO se registran en las estaciones de tráfico de Zaragoza capital (Picarral, Roger de Flor y Centro) ($7-9 \mu g m^{-3}$) y en la suburbana de tráfico de Alagón ($9 \mu g m^{-3}$) ubicada esta cercana a un tramo de autovía. Los niveles más reducidos de NO se registran en estaciones de tipo RF como Els Torms o Montsec en la zona limítrofe a Aragón ($<1 \mu g m^{-3}$)

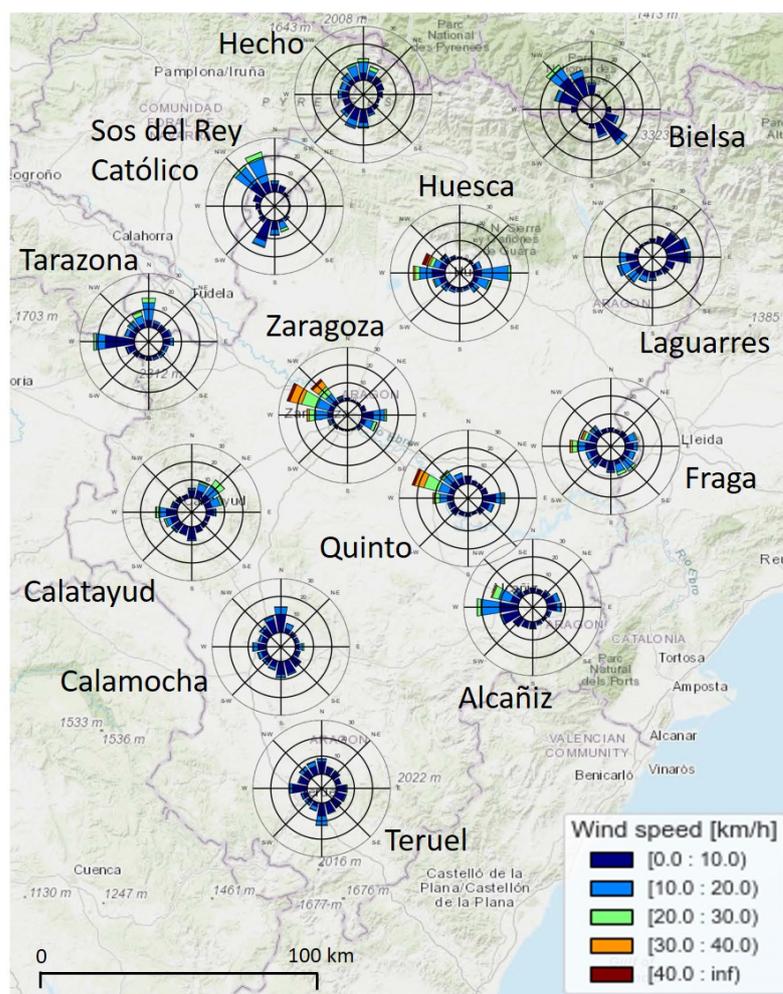


Figura 3.1: Rosas de viento de años representativos (promedios de abril a septiembre) calculadas a partir de medidas horarias de dirección y velocidad en 13 estaciones meteorológicas de la AEMET en Aragón.

o, dentro de Aragón, también en estaciones RF como Monagrega o IF como La Cerollera o La Estanca ($1-2 \mu\text{g m}^{-3}$).

Respecto a los niveles de NO_2 en el periodo cálido, destacan en la parte alta estaciones de tráfico de la ciudad de Zaragoza como El Picarral, Roger de Flor y Centro ($24-25 \mu\text{g m}^{-3}$) seguidas de otras estaciones de Zaragoza capital como Renovales (UF: $20 \mu\text{g m}^{-3}$), Las Fuentes (UT: $19 \mu\text{g m}^{-3}$) o Jaime Ferrán (ST: $18 \mu\text{g m}^{-3}$) y, fuera de la capital, Alagón (ST: $20 \mu\text{g m}^{-3}$). Los niveles más bajos vuelven a observarse en estaciones RF (Montsec, Els Torms con $2 \mu\text{g m}^{-3}$ y Monagrega con $4 \mu\text{g m}^{-3}$) o RI (La Cerollera, Funes o Morella con $4 \mu\text{g m}^{-3}$).

La Figura 3.3 muestra los percentiles 93,2 de las máximas diarias 8h de O_3 medidas en las estaciones de CA. Los valores de percentil 93,2 superiores a $120 \mu\text{g m}^{-3}$ implican superación del valor objetivo a largo plazo para la protección de la salud. Las superaciones de los $120 \mu\text{g m}^{-3}$ o valores cercanos son generalizados en el área de estudio ya que 20 de las 30 estaciones estudiadas tienen un percentil 93,2 superior a $115 \mu\text{g m}^{-3}$. Los valores más elevados se registran en estaciones rurales en zonas montañosas en el flanco este del área de estudio como Montsec, Morella y Coratxar ($124-129 \mu\text{g m}^{-3}$) o, en Aragón, La Cerollera ($122 \mu\text{g m}^{-3}$). Las estaciones de la banda oriental de la región a estudio a cotas más bajas como Zorita, Els Torms, La Senia,

3.2 Niveles de contaminantes

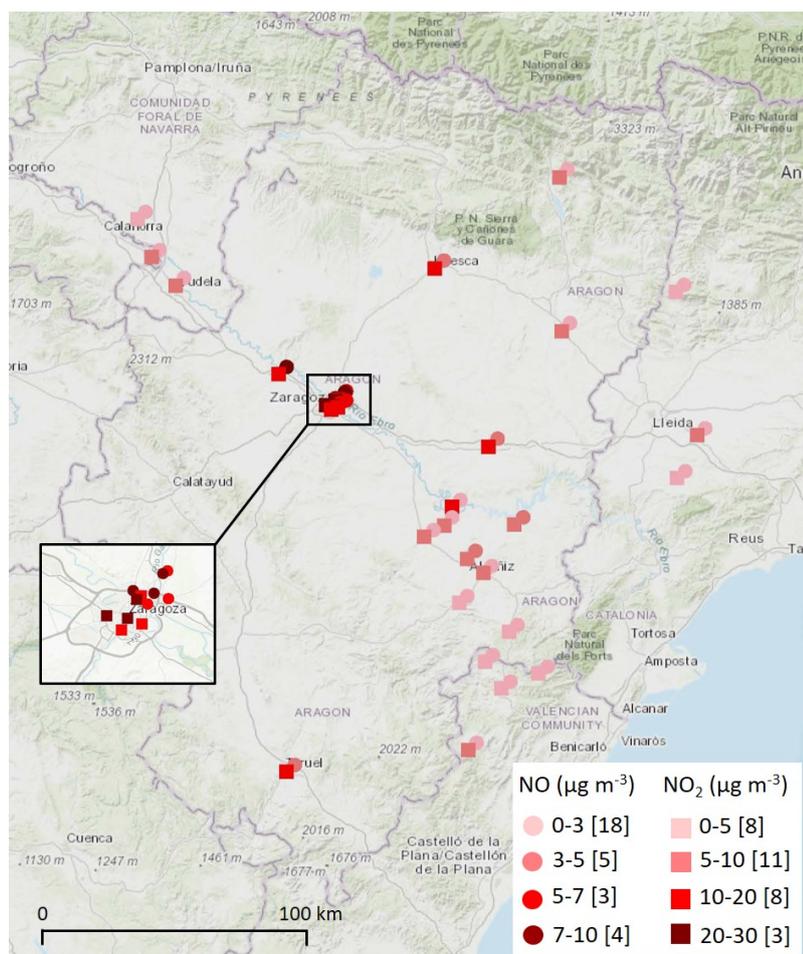


Figura 3.2: Distribución espacial de concentraciones promedio entre abril y septiembre de NO y NO₂ en las estaciones de CA seleccionadas 2008-2019 con un mínimo de 6 años con una disponibilidad del 75 % de valores válidos entre abril y septiembre.

Juneda, Gandesa, Castelnou o Escatrón también registran valores elevados ($119\text{-}123 \mu\text{g m}^{-3}$) con Bujaraloz en $117 \mu\text{g m}^{-3}$. Tudela y Funes, en el cauce del río Ebro en Navarra también muestran valores elevados (ambas $122 \mu\text{g m}^{-3}$). En las estaciones ubicadas al norte de Aragón los valores del percentil 93,2 se aproximan al valor objetivo a largo plazo para la protección de la salud aunque sin superarlo (118 y $117 \mu\text{g m}^{-3}$ en Torrelisa y Huesca, respectivamente).

Para dar una descripción más completa de los niveles máximos diarios de O₃ en la zona de estudio se ha confeccionado un diagrama de cajas (Figura 3.4). Las cajas están calculadas a partir de las concentraciones medias máximas 8h diarias ordenadas según el valor de la mediana. Las líneas discontinuas muestran el valor objetivo para la protección de la salud humana, VO ($120 \mu\text{g m}^{-3}$ para el máximo diario del promedio de 8h) y el valor guía de la OMS ($100 \mu\text{g m}^{-3}$ para cualquier promedio 8h diario). Las cifras indicadas en la línea superior del gráfico muestran el promedio del número de días al año en los cuales en cada estación se supera el VO.

Los valores más altos diarios de O₃ tienden a registrarse en las estaciones rurales que están alejadas, en general, de fuentes de compuestos que consumen O₃, por ejemplo, de NO. Las estaciones que marcan los niveles más elevados son Morella y Montsec y, dentro de Aragón, Castelnou. Por el contrario, los niveles en las estaciones urbanas son generalmente más reducidos, siendo la estación

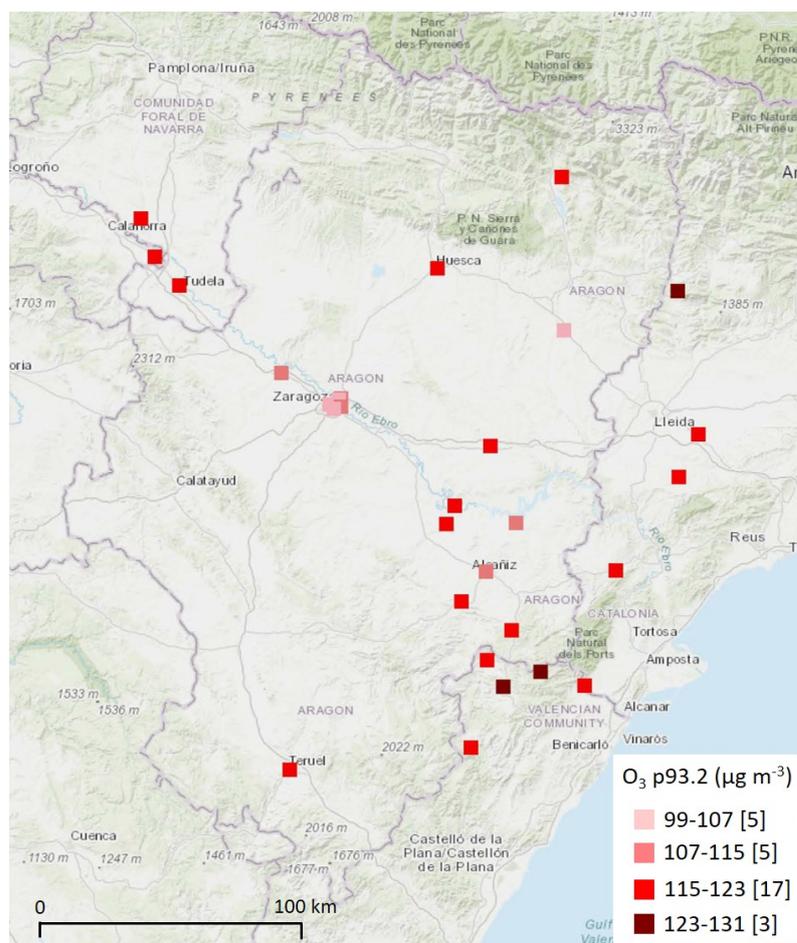


Figura 3.3: Distribución espacial del percentil 93,2 de las máximas diarias 8h de O₃ medidas en las estaciones de CA seleccionadas.

de Centro en Zaragoza capital (tipo UT) la que registra los menores niveles. Todas las estaciones registran anualmente, en promedio, superaciones diarias del VO aunque en distinta proporción. Destacan Montsec y Morella con 49 y 44 días al año, respectivamente. De las estaciones en territorio aragonés las que registran mayor número promedio anual de superaciones son La Cerollera (30) y Castelnou (25).

Si nos fijamos en los valores extremos, el percentil 99 de los máximos diarios de los promedios 8h, destacan Juneda y Montsec con 143 y 141 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivamente, seguidas por Funes, Tudela, Morella, La Cerollera, Coratxar y Caspe con entre 138 y 140 $\mu\text{g m}^{-3}$ todas ellas. Algunas de estas estaciones no están entre las que tienen niveles promedio de O₃ más elevados por la caída de concentración nocturna debido a la titración pero registran con relativa frecuencia niveles diurnos más elevados que el resto de emplazamientos.

3.2 Niveles de contaminantes

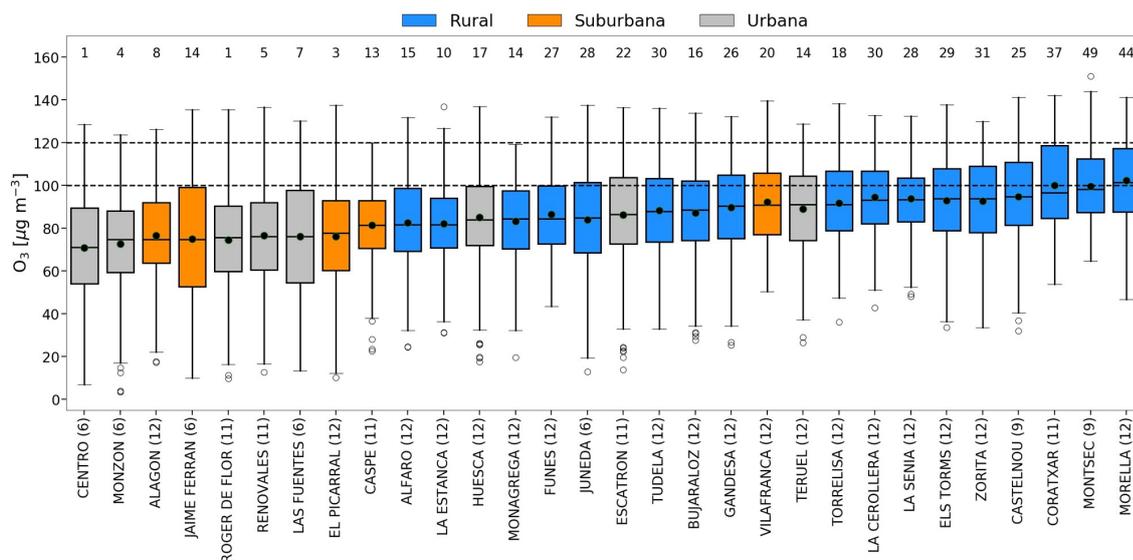


Figura 3.4: Diagrama de cajas que muestra los estadísticos representativos de los niveles máximos diarios de O₃ registrados en las estaciones de CA a partir de las medias máximas 8h diarias medidas durante todo el año. En el eje x, entre paréntesis, se muestran los años con datos disponibles (con al menos un 75 % de disponibilidad entre abril y septiembre). Se muestran los estadísticos (Percentiles 25 y 75 delimitados por cada caja, valor promedio representado mediante un punto, mediana representada con una línea horizontal dentro de la caja y valores atípicos en círculos). Las líneas discontinuas muestran el valor objetivo para la protección de la salud humana, VO (120 µg m⁻³ para el máximo diario del promedio de 8 h) y el valor guía de la OMS (100 µg m⁻³ para cualquier promedio de 8h diario). Las cifras superiores muestran el promedio del número de días al año en los cuales en cada estación se supera el VO. Los distintos colores muestran la clasificación de las estaciones por tipo (rural, suburbana o urbana).

ANEXOS

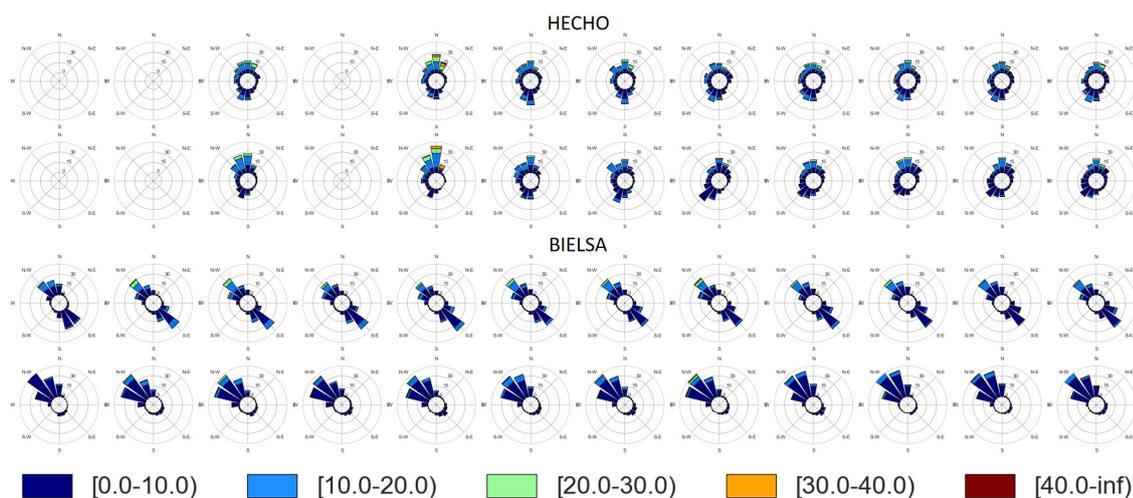


Figura 3.5: Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Hecho y Bielsa. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.

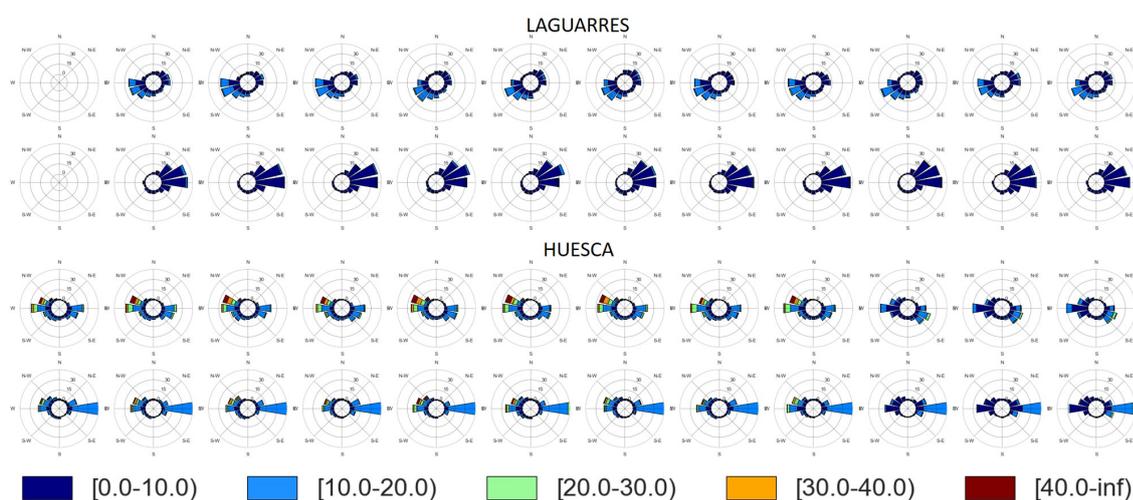


Figura 3.6: Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Laguarres y Huesca. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.

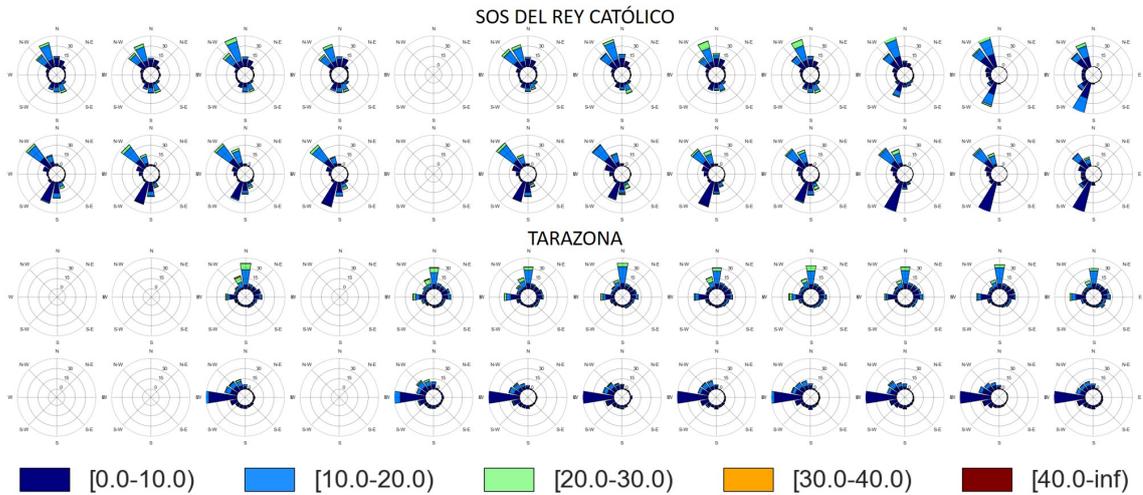


Figura 3.7: Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Sos del Rey Católico y Tarazona. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.

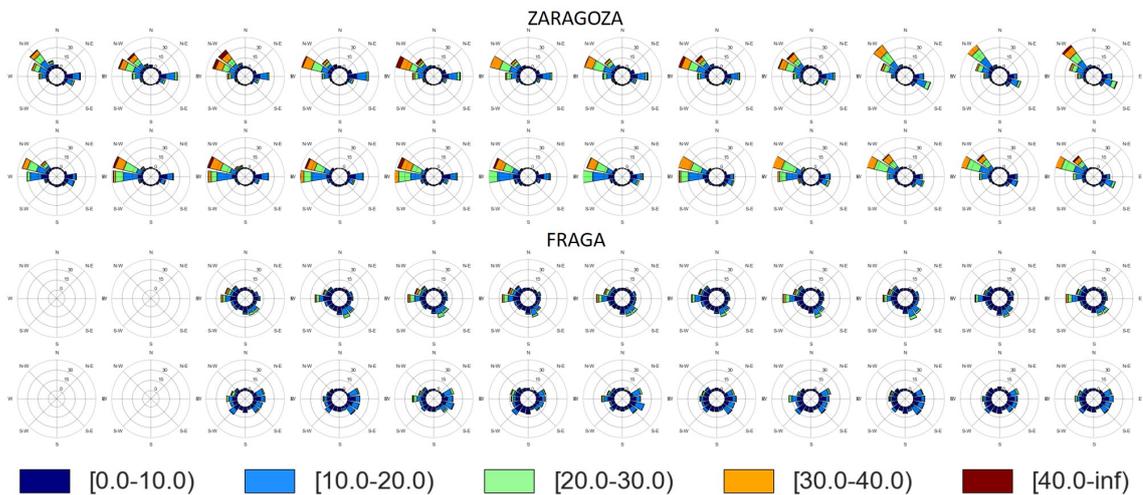


Figura 3.8: Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Zaragoza (Aeropuerto) y Fraga. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.

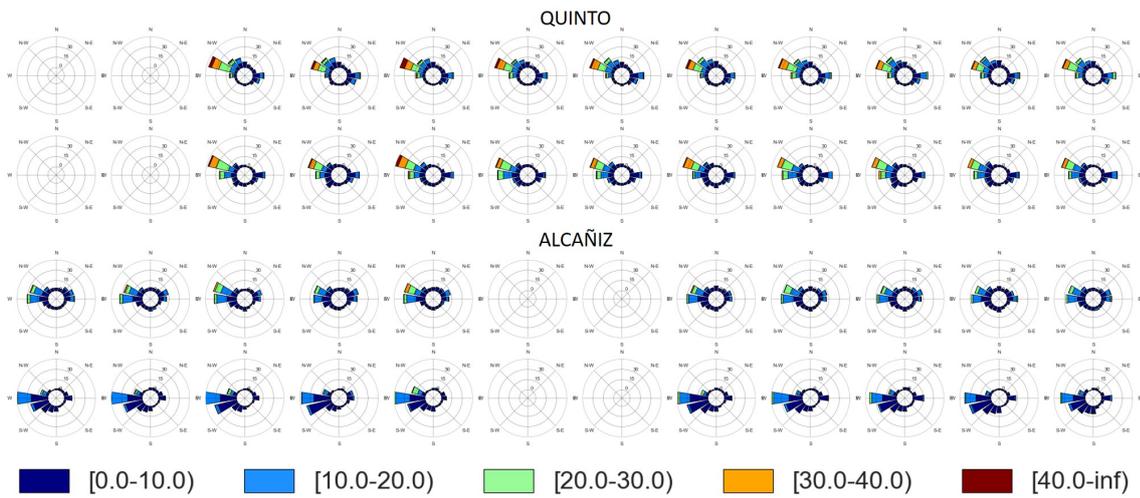


Figura 3.9: Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Quinto de Ebro y Alcañiz. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.

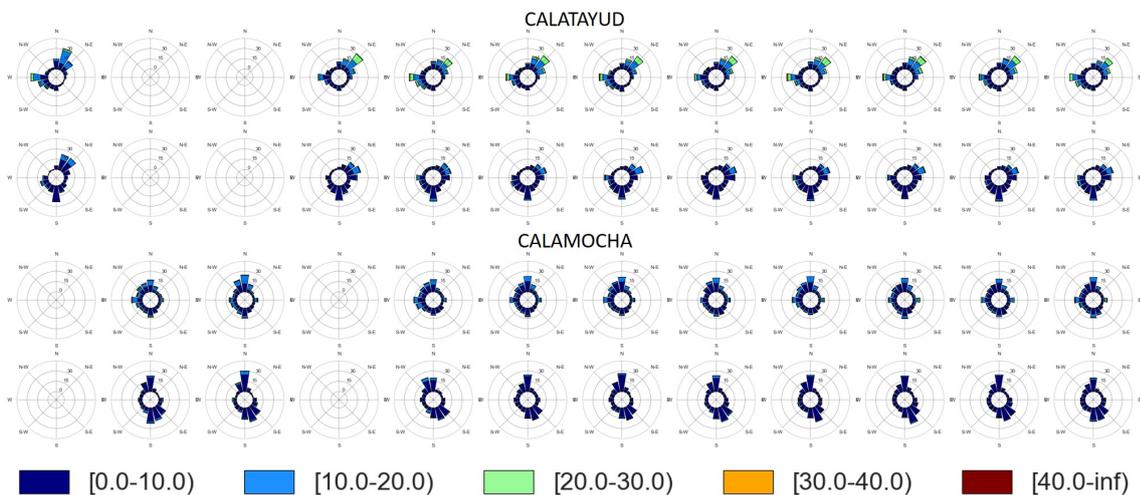


Figura 3.10: Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Calatayud y Calamocha. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.

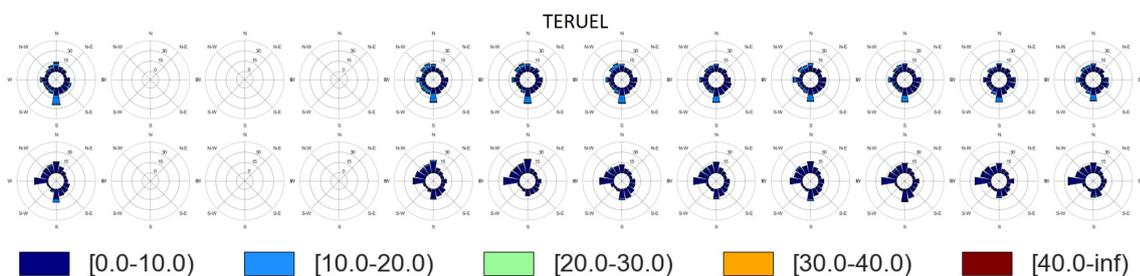


Figura 3.11: Rosas de viento anuales de abril a septiembre de la estación meteorológica de la AEMET de Teruel. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.