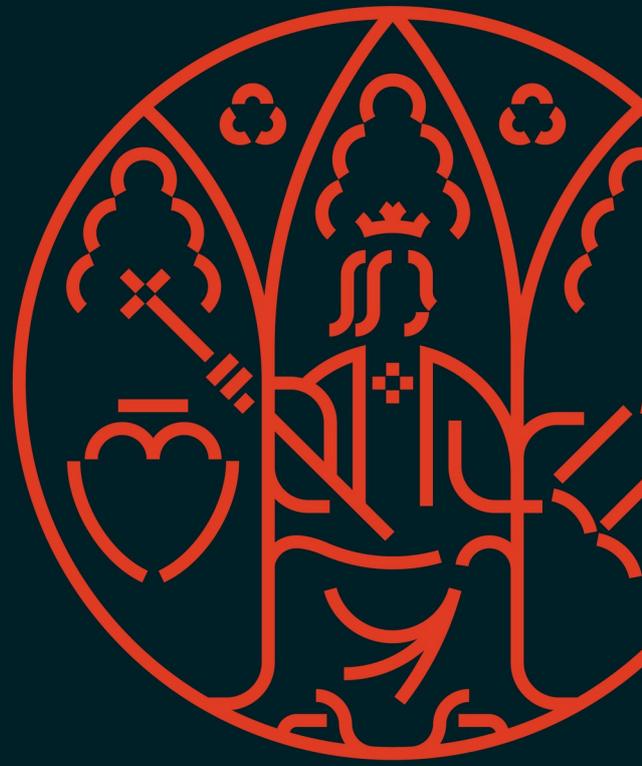


UMU

ZONIFICACIÓN DEL TERRITORIO SEGUN CONTAMINANTES EN LA REGIÓN DE MURCIA (SINQLAIR V)



-Juan Pedro Montávez Gómez
-Salvador Gil Guirado
-Pedro Jiménez Guerrero

Grupo de Modelización Atmosférica Regional
Universidad de Murcia

COMUNIDAD AUTONOMA DE LA REGION DE MURCIA
DIRECCION GENERAL DE MEDIO AMBIENTE



Región de Murcia



Índice general

1	Introducción	1
1.1	Motivación	2
1.2	Estructura del informe	3
2	Datos	5
2.1	Información geográfica	5
2.1.1	Zonas de especial interés	13
2.2	Datos observados	16
2.3	Datos modelados	16
3	Metodología	19
3.1	Metodología de Zonificación	19
3.2	Pretratamiento de datos	20
3.3	Agrupamiento	25
3.4	Reorganización y regiones robustas	28
4	Resultados NOx	31
4.1	Introducción	31
4.2	Climatologías y valores umbrales	32
4.3	Zonificación para los óxidos de nitrógeno	36
5	Resultados Ozono	43
5.1	Introducción	43
5.2	Climatologías y valores umbrales	44
5.3	Zonificación	50
6	Resultados Material Particulado	57
6.1	Introducción	57
6.2	Climatologías y valores umbrales	57
6.3	Zonificación	61

7	CO y SO₂	75
7.1	Introducción	75
7.2	Climatologías y valores umbrales	76
7.3	Zonificación del CO y el SO ₂	78
8	Zonificación multi-contaminante	81
8.1	Zonificación con todas las variables	81
8.2	Configuraciones similares	85
8.3	Zonificaciones Transitorias	88
8.4	Inclusión de regiones especiales	92
9	Conclusiones y recomendaciones	95
9.1	Conclusiones	95
9.2	Zonificación final	96
	Bibliografía	101
	Informes y libros	101
	Artículos	101
	Documentos Webs	102
	Otros documentos	102

Capítulo 1 — Introducción

Grupo G-MAR/UMU

Preliminares

Este trabajo se realiza bajo el paraguas de SERVICIO DE SISTEMA DE PRONÓSTICO Y DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA REGIÓN DE MURCIA. SINQLAIR. FASE V para la Dirección General de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Este trabajo ha sido realizado por el Grupo de Modelización Atmosférica Regional de la Universidad de Murcia bajo la responsabilidad de Juan Pedro Montávez Gómez y Salvador Gil Guirado y la participación de Pedro Jiménez Guerrero.

Los trabajos realizados para alcanzar el objetivo principal han sido;

- Actualización de las bases de datos de análisis de contaminantes en la Región de Murcia, así como del control de calidad de las estaciones de medida para su comparación con los datos modelados.
- Análisis de la climatología de contaminantes, en relación con los límites de peligrosidad.
- Obtención de regiones por contaminante y para todos los contaminantes (Zonificación) tomando como base divisoria la organización territorial (municipios).

1.1 Motivación

El Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, tiene como objetivo establecer medidas para proteger y mejorar la calidad del aire en España, reduciendo la contaminación atmosférica y minimizando los efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente (BOE y España 2011). Este decreto es una parte importante de la regulación ambiental en España y contribuye a la protección del medio ambiente y la salud pública al abordar la contaminación atmosférica.

El Real Decreto 102/2011 de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire (RD 102/2011), establece en el artículo 3.3b y en el anexo III apartado IV que las comunidades autónomas, en el ámbito de sus respectivas competencias, realizarán en su ámbito territorial la delimitación y clasificación de las zonas y aglomeraciones en relación con la evaluación y la gestión de la calidad del aire ambiente, debiendo documentar detalladamente, para cada una de las zonas y aglomeraciones, los procedimientos para la selección de los emplazamientos, así como registrar la información que justifique el diseño de la red y la elección de la ubicación de todos los puntos de medición. La zonificación actualmente en vigor responde a los resultados de trabajos anteriores (MAR 2017). El establecimiento de una buena zonificación es fundamental, ya que determina del número mínimo de puntos para la medición fija de las concentraciones de distintos contaminantes. Dicho número dependerá del número de habitantes, el contaminante, si ha superaciones en los umbrales, etc. A modo de ejemplo en zonas con más de 250 000 habitantes y menos de 500 000 el número de estaciones de medida de contaminantes excepto partículas será de dos, mientras que será solo de una para zonas con un número de habitantes menor a 250.000 habitantes si las concentraciones superan el umbral superior de evaluación. Más detalles se pueden encontrar en los Anexos IV y X del RD 102/2011.

Una de la problemática de la zonificación actual es que su forma no atiende a criterios geográficos, es decir no tiene en cuenta los límites municipales, o cuales son las zonas más pobladas. Esto podría acarrear ciertos desajustes a la hora de establecer situaciones de alertas por mala calidad del aire. Es por ello que es conveniente que las zonas de calidad de aire se ajusten, siempre que sea posible, a los límites municipales.

Las técnicas de *machine learning* han evolucionado de manera exponencial en los últimos años así como su aplicación en ciencias ambientales (Zhou 2022). Su empleo en regionalización de distintas variables climáticas es muy amplio (véase por ejemplo

García-Valero et al. 2012), Jiménez et al. 2010 así como su empleo en el estudio de la variabilidad de calidad del aire (Govender y Sivakumar 2020). Por otro lado, la monitorización de la calidad del aire presenta el problema de la escasez de estaciones de control de la contaminación. Sin embargo, este déficit en la cobertura espacial de datos puede ser afrontado mediante el empleo de datos modelizados, especialmente si estos son de alta resolución. Por tanto, el empleo de técnicas de agrupación actuales aplicadas a datos de modelos nos permiten establecer de forma más robusta áreas con variabilidad o características coherentes y continuas (Lorente-Plazas et al. 2015).

1.2 Estructura del informe

El objetivo principal del trabajo es obtener una zonificación por contaminante y global a partir de unidades territoriales basadas en municipios. La zonificación realizada se basa en la similitud de la variabilidad temporal de alta frecuencia de los datos modelados de alta resolución en la región de Murcia. Para ello se trabaja con las series municipales tanto construidas sobre toda el área como pesadas con la distribución de población, infraestructuras y teniendo en consideración aspectos socio-económicos (demografía, usos del suelo, actividades económicas, etc.), aspectos ambientales (ecosistemas, vegetación, etc.) y fuentes de emisiones de contaminación de la zona, entre otros.

Los datos empleados se presentan en el Capítulo 3. En primer lugar se presentan las bases de datos geográficas utilizadas para la construcción de las series así como la separación de los grandes municipios en sub-municipios con características geofísicas similares. Dichas bases de datos incluyen los límites municipales, los polígonos de infraestructuras, industrias y poblaciones así como la distribución poblacional en dichos polígonos. Dichas bases de datos serán empleadas para construir los pesos de las series municipales como para el cálculo final de las propiedades (área y población) de las zonas obtenidas. Seguidamente se presentan las bases de datos tanto modeladas como observacionales utilizadas en el trabajo.

En el mismo capítulo (Cap. 3) se presenta de manera general la metodología seguida; desde el pretratamiento de las series de contaminación, la construcción de las series municipales, tanto las totales como las poblacionales, el método de reducción de la dimensionalidad y las técnicas de clusterización utilizadas. Finalmente se presentan los algoritmos de reordenación y medida de robustez de los agrupamientos presentados. La metodología, especialmente diseñado para este trabajo, consiste en eliminar lo máximo posible la subjetividad inherente a las técnicas de agrupamiento. Básicamente, el método ha consistido en obtener un conjunto de regionalizaciones y a partir de ellos construir la zonificación final con la ventaja de dar información sobre la pérdida de robustez de las zonas si algún municipio cambia de zona.

En los capítulos 4, 5, 6, y 7 se presentan los resultados para los óxidos de nitrógeno, el ozono, el material particulado (PM10 y PM2.5) y óxidos de Azufre y Monóxido de Carbono (CO y SO₂) respectivamente. La estructura de estos capítulos es similar. Se presentan los parámetros fundamentales para el estudio de las climatologías de contaminantes datos por los valores límite y umbrales dados en el RD 102/2011. Seguidamente se presentan las regionalizaciones obtenidas por grupos de algoritmos (jerárquicos y no-jerárquicos) y tipo de series empleadas (totales o poblacionales). Y finalmente se presentan los resultados de zonificación finales junto a la robustez de las zonas. En el capítulo 8 se presenta la zonificación obtenida usando todos los contaminantes siguiendo la misma estructura que las zonificaciones individuales.

Finalmente, en el capítulo 9 se presenta un resumen de las principales conclusiones del trabajo, las características principales de las zonas obtenidas (población y área), y una serie de recomendaciones y ejemplos de los beneficios que la metodología puede presentar para la toma de decisiones finales de los gestores ambientales.

Datos

Los datos utilizados en este trabajo se dividen en tres grandes grupos.

- Información geográfica.
- Datos de contaminación observados.
- Datos de contaminación simulados (análisis).

A continuación se describen con detalle los datos utilizados así como el tratamiento que se ha hecho.

2.1 Información geográfica

El objetivo del trabajo es una zonificación basada en municipios. Como se mostrará más adelante, se necesita tanto tener los límites exactos de los municipios como la distribución poblacional y de infraestructuras para poder tratar las series de contaminación atmosférica. En primer lugar se ha llevado a cabo una división de los municipios muy extensos con características físicas muy diferentes. En segundo lugar se han obtenido una sub-clasificación de los distintos municipios en función de su densidad de población.

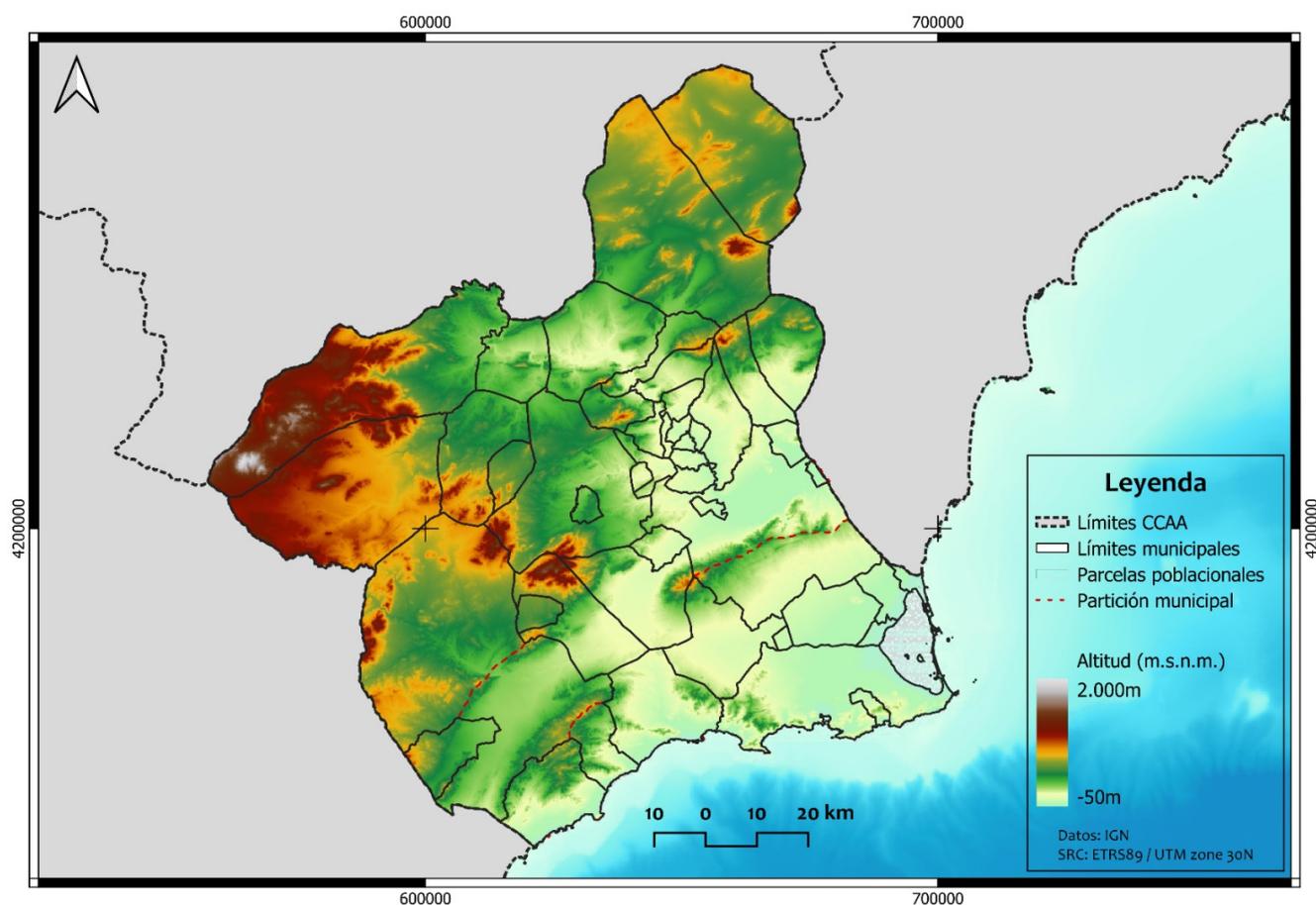


Figura 2.1: División de municipios y sub-municipios utilizado en el estudio. Las líneas divisorias en rojo son las creadas para este estudio.

División de Municipios

La CARM cuenta con 45 municipios. Algunos de ellos tienen una gran extensión con separaciones naturales dentro del propio término municipal. Para el estudio que se presenta se ha estimado conveniente dividir los municipios de gran tamaño en sub-municipios. Los municipios divididos han sido Lorca y Murcia. En la figura 2.1 se muestra la distribución creada para este estudio.

El municipio de Lorca se ha dividido en tres áreas; sur (costera), central (valle del Guadalentín) y norte (interior). Las divisiones se han elaborado siguiendo las líneas de cadena dadas por las sierras de la Torrecilla y de la Tercia al norte de la ciudad del Lorca y la sierra de la Almenara al sur de la ciudad.

El municipio de Murcia se ha dividido en dos partes; situadas al sur y al norte de la sierra de Carrascos. Al igual que en el caso anterior, la división se ha hecho siguiendo la línea de cadena o de cumbre.

Así pues en el trabajo se utilizarán una división municipal con las excepciones marcadas consistente en 48 polígonos. En la tabla 2.1 se presentan las características generales, de dichos municipios.

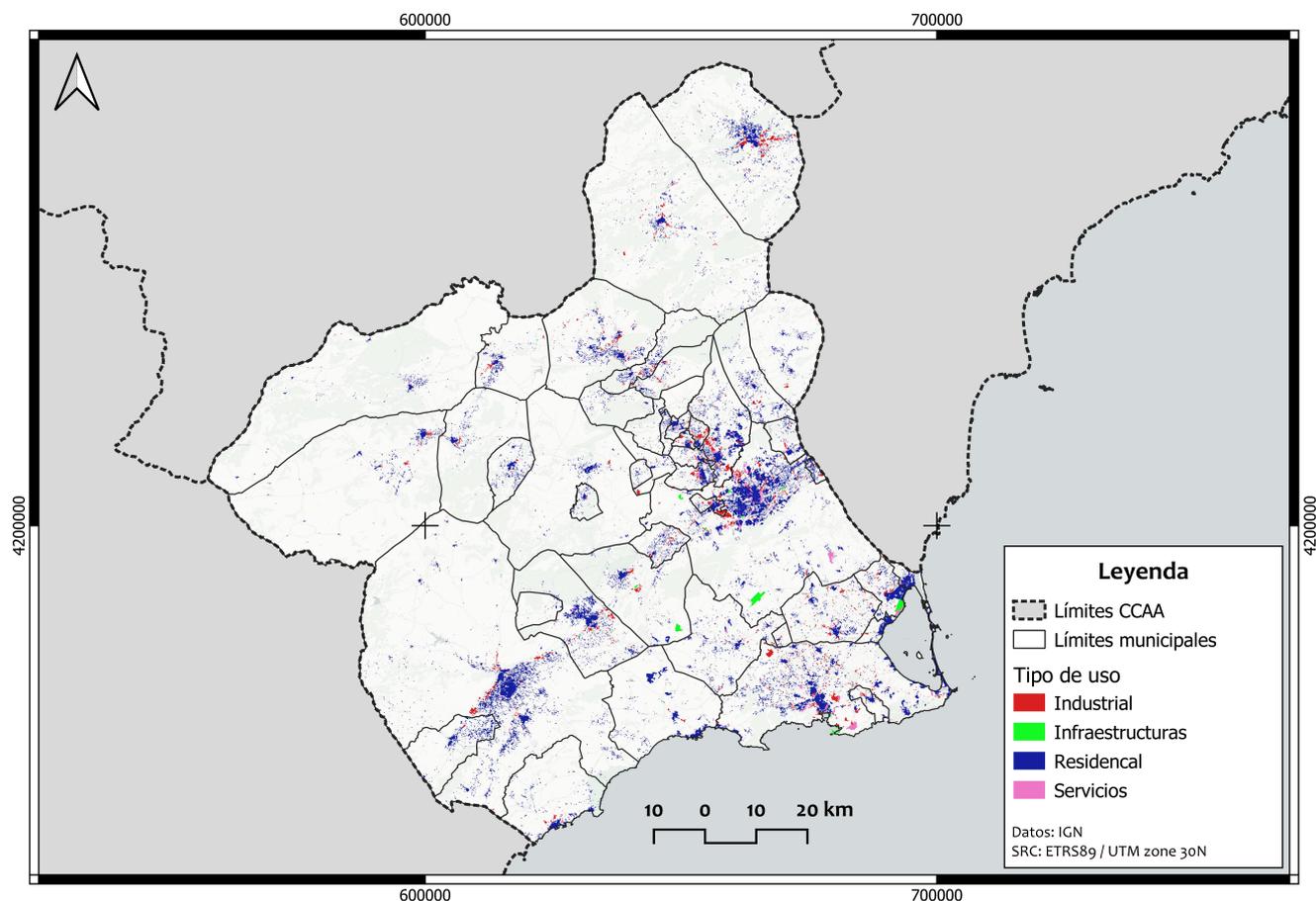


Figura 2.2: Distribución de los usos del suelo con ocupación continuada de la población en los municipios de la Región de Murcia (año 2020)

Caracterización de los usos del terreno

Las fuentes de emisión de partículas contaminantes, así como la población que se puede ver afectada por episodios de contaminación, no se encuentran homogéneamente distribuidos por la superficie de cada municipio. Para solventar este posible sesgo espacial, se ha realizado un análisis de superposición geoestadístico con Sistemas de Información Geográfica QGIS Development Team 2023. Resultado de este proceso, se ha obtenido una capa de información, donde cada municipio tiene cuatro tipos de multipolígonos: (a) multipolígono de uso residencial; (b) multipolígono de uso industrial; (c) multipolígono de uso servicios; (d) multipolígono de uso infraestructuras.

Un multipolígono a un tipo de entidad espacial que representa una

Cuadro 2.1: Distribución de municipios empleada

Pos	Código	Nombre	Área (km ²)
1	30001	Abanilla	236
2	30002	Abarán	115
3	30003	Águilas	252
4	30004	Albudeite	17
5	30005	Alcantarilla	16
6	30006	Aledo	50
7	30007	Alguazas	24
8	30008	Alhama de Murcia	312
9	30009	Archena	16
10	30010	Beniel	10
11	30011	Blanca	87
12	30012	Bullas	82
13	30013	Calasparra	185
14	30014	Campos del Río	48
15	30015	Caravaca de la Cruz	858
16	30016	Cartagena	558
17	30017	Cehegín	300
18	30018	Ceutí	10
19	30019	Cieza	367
20	30020	Fortuna	149
21	30021	Fuente Álamo de Murcia	274
22	30022	Jumilla	969
23	30023	Librilla	56
24	30024C	Lorca3	118
25	30025	Lorquí	16
26	30026	Mazarrón	319
27	30027	Molina de Segura	170
28	30028	Moratalla	954
29	30029	Mula	634
30	30030B	Murcia2	375
31	30031	Ojós	45
32	30032	Pliego	30
33	30033	Puerto Lumbreras	145
34	30034	Ricote	87
35	30035	San Javier	69
36	30036	San Pedro del Pinatar	22
37	30037	Torre-Pacheco	189
38	30038	Torres de Cotillas (Las)	39
39	30039	Totana	289
40	30040	Ulea	40
41	30041	Unión (La)	25
42	30042	Villanueva del Río Segura	13
43	30043	Yecla	605
44	30901	Santomera	44
45	30902	Alcázares (Los)	20
46	30024A	Lorca1	1010
47	30024B	Lorca2	548
48	30030A	Murcia1	511

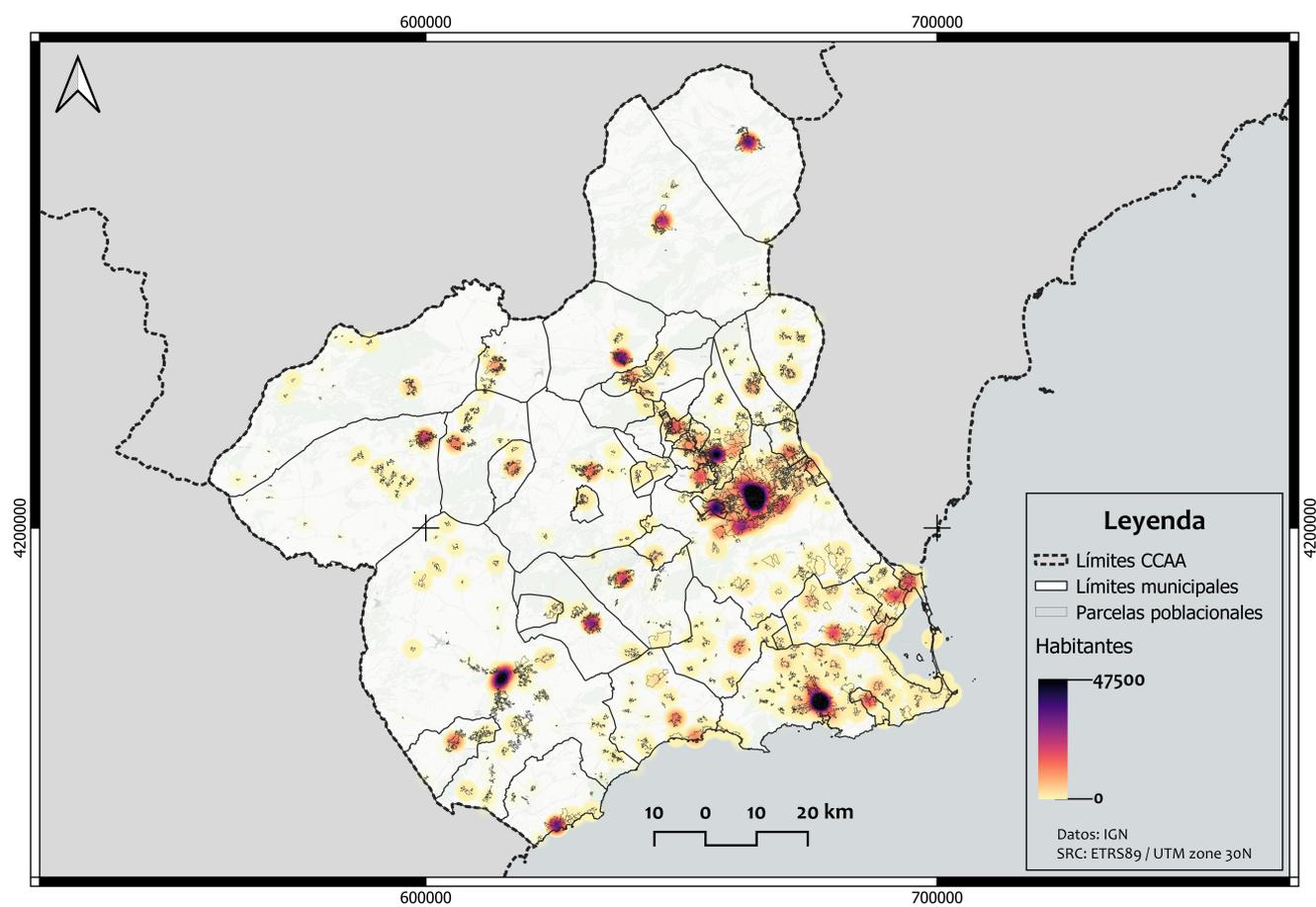


Figura 2.3: Mapa de calor con la distribución de la población en la Región de Murcia en la capa población (año 2020)

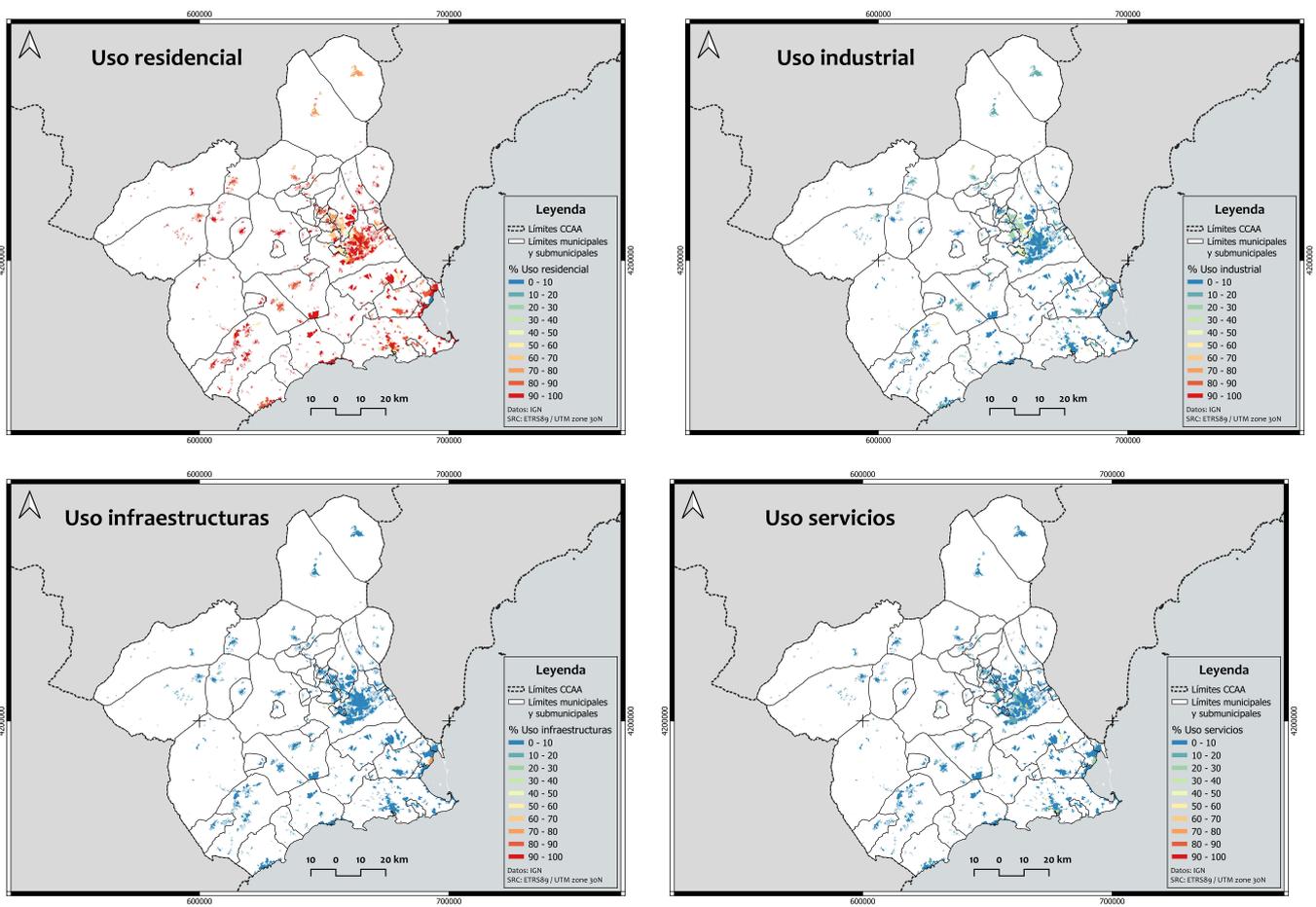


Figura 2.4: Porcentaje de ocupación de los diferentes usos del suelo en las parcelas poblacionales de la Región de Murcia (año 2020).

geometría compuesta por múltiples polígonos. Es decir, es una figura formada por dos o más polígonos individuales que se combinan para representar una entidad más grande y compleja. Por lo tanto, en cada municipio tenemos la superficie y ubicación exactas de todos los polígonos, por tipo de uso y -en caso de haber- número de habitantes.

Para llegar a la capa final, ha sido necesario realizar superposiciones, intersecciones, uniones, cortes y disoluciones con un conjunto de capas de información provenientes de fuentes oficiales. Concretamente, todas las capas de información se han obtenido del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional Instituto Geográfico Nacional (IGN) 2023. Todas las datos utilizados tienen información a fecha de 2020 y 2021. La información de base ha sido el GeoPackage de poblaciones de la Región de Murcia. Esta base de datos ofrece la localización geográfica y forma geométrica de las poblaciones, sobre la base geométrica procedente de la cartografía catastral de 2020 y con el sistema de referencia geodésico es ETRS89. Este GeoPackage tiene dos capas vectoriales de interés:

1. Capa vectorial de polígonos por tipo de uso (Denominada capa de usos)
2. Capa de polígonos con el número de habitantes (Denominada capa de población).

Con la capa de usos, se realiza un filtrado para considerar únicamente los polígonos de tipo industrial, residencial, infraestructuras y servicios. Se eligen estos usos por representar los principales usos donde se produce una ocupación continuada de la población, bien por residencia, o bien por motivos de trabajo o uso y disfrute de servicios públicos. En todas las categorías se excluyen los polígonos que tienen valores nulos en las variables área edificada y número de edificios (Figura 2.2).

Con la capa población, se usa el geoproceto unir atributos por localización, para añadir a cada polígono el código INE y nombre del municipio. Tanto el código INE como el nombre del municipio, proceden de la capa vectorial de recintos municipales, también del IGN. Adicionalmente, se eliminan los polígonos de tipo ENSI, por ser duplicados de las poblaciones de Lorca y Murcia.

En este punto, tenemos una capa de usos, que contiene polígonos de

tipo industrial (IND), infraestructuras (INF) y servicios (SEI); y otra capa de polígonos de población, que contiene los recintos de entidades de población a nivel sub-municipal, con el número de habitantes. Posteriormente, con la capa población, se realiza el geoproceso *dissolve* para unir polígonos con un mismo código INE. Así, de los 8.729 polígonos originales, se pasa a 708 polígonos. En este paso, se realiza un *análisis de superposición*, para ver qué porcentaje y área de cada polígono de población está superpuesto con algún polígono de la capa usos. Eso añade 6 variables a la capa de población: IND_area, IND_pc (donde IND es uso industrial, INF es infraestructuras, SEA es servicios y área es el área de ese uso y pc es el porcentaje de ese uso). Adicionalmente se crean dos variables: RES_area y RES_pc donde se calcula el porcentaje restante, como el que corresponde exclusivamente con los polígonos poblados de uso residencial.

Para obtener una única capa de datos, se usa el algoritmo *Union*, para crear una capa nueva con tantos polígonos como solapes haya entre la capa población y usos. Esta nueva capa, tiene los atributos de ambas capas, por lo que se puede saber, en los polígonos con habitantes asignados, que porcentaje y área corresponde a cada uso. Así como, que polígonos hay sin habitantes asignados y el uso que tienen. Finalmente se realiza una *unión por atributos*, creando multipolígonos por tipo de uso y municipio. De esta manera, de la capa unida original de 51.815 polígonos, se pasa a una capa final con 918 multipolígonos. Esta capa final presentan la distribución de usos que se puede ver en la Figura 2.4 y tiene la siguiente estructura (Tabla 2.2):

Cuadro 2.2: Estructura de la capa de información población y usos.

Nombre	Descripción
INE_COD	Código del INE al que corresponde el municipio
habitantes	Habitantes que viven dentro de ese polígono
IND_area	Área de uso industrial en ese polígono (m ²)
IND_pc	Porcentaje de uso industrial en ese polígono
INF_area	Área de uso infraestructuras en ese polígono (m ²)
INF_pc	Porcentaje de uso infraestructuras en ese polígono
SEI_area	Área de uso servicios en ese polígono (m ²)
SEI_pc	Porcentaje de uso servicios en ese polígono
RES_area	Área de uso residencial en ese polígono (m ²)
RES_pc	Porcentaje de uso residencial en ese polígono

El secreto estadístico, determina que en polígonos poblacionales con menos de 10 viviendas, no se añade el atributo habitantes en la capa original de población. Esto produce un desfase entre el número de

habitantes de la capa población y los datos de población municipal de Padrón Municipal de Habitantes. Si en la capa población, el total de habitantes es de 1.381.837, el total de población de la Región de Murcia en el año 2020 era 1.511.251 habitantes Instituto Nacional de Estadística (INE) 2023. Un desfase de 129.414 habitantes. Para corregir este sesgo, hemos calculado la diferencia en número de habitantes entre unos datos y otros, para cada municipio. Esta diferencia, ponderada como un desfase porcentual, ha sido añadida como una columna a la capa *población_usos*, donde este valor supone un coeficiente corrector para la población de cada parcela. De tal modo y a modo de ejemplo que, en los municipios donde la diferencia sea un desfase poblacional del 5% entre la capa *población_usos* y los datos oficiales del Padrón, se multiplica el valor de habitantes de cada parcela de ese municipio por 1,05. De esa manera, se añade la diferencia de manera homogénea en todas las parcelas de los municipios, pero teniendo en consideración que hay diferentes desfases porcentuales en cada municipio. La distribución final de los habitantes se presenta en la Figura 2.3

2.1.1 Zonas de especial interés

La contaminación atmosférica tiene una serie de efectos negativos significativos en los ecosistemas, ya que puede afectar a los organismos vivos, los suelos, el agua y los procesos naturales. Estos efectos pueden variar según el tipo y la cantidad de contaminantes presentes. Puede dañar las plantas directa o indirectamente. Los contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el ozono troposférico (O₃) pueden dañar las hojas, reducir la fotosíntesis y afectar negativamente el crecimiento de las plantas. Esto puede llevar a la disminución de la biodiversidad vegetal y la pérdida de hábitats. Por otro lado, puede contribuir a la lluvia ácida, acidificar los cuerpos de agua, dañar los ecosistemas acuáticos y afectar a los organismos acuáticos, como peces, anfibios y otros invertebrados. Otra forma de afectación al medio es a través de la deposición seca o húmeda, lo que puede dañar la calidad del suelo, disminuyendo la capacidad del suelo para mantener la vida vegetal y microbiana, así como alterar la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas. Por tanto, la contaminación atmosférica puede resultar en la extinción de especies, cambios en la composición de las comunidades biológicas y la pérdida de ecosistemas.

En este apartado se presentan las zonas de especial interés y protegi-

das de la CARM, para poder incluir en la sección de conclusiones los posibles efectos que la contaminación actual puede tener sobre dichas zonas.

En primer lugar presentamos la red natura (Figura 2.5 arriba). Se presentan las zonas LIC (Localización de Interés Comunitario), ZEC (Zona de especial conservación) y ZEPA (Zonas de Especial Protección para las Aves) junto a los límites municipales (construidos para este trabajo) y las parcelas poblacionales.

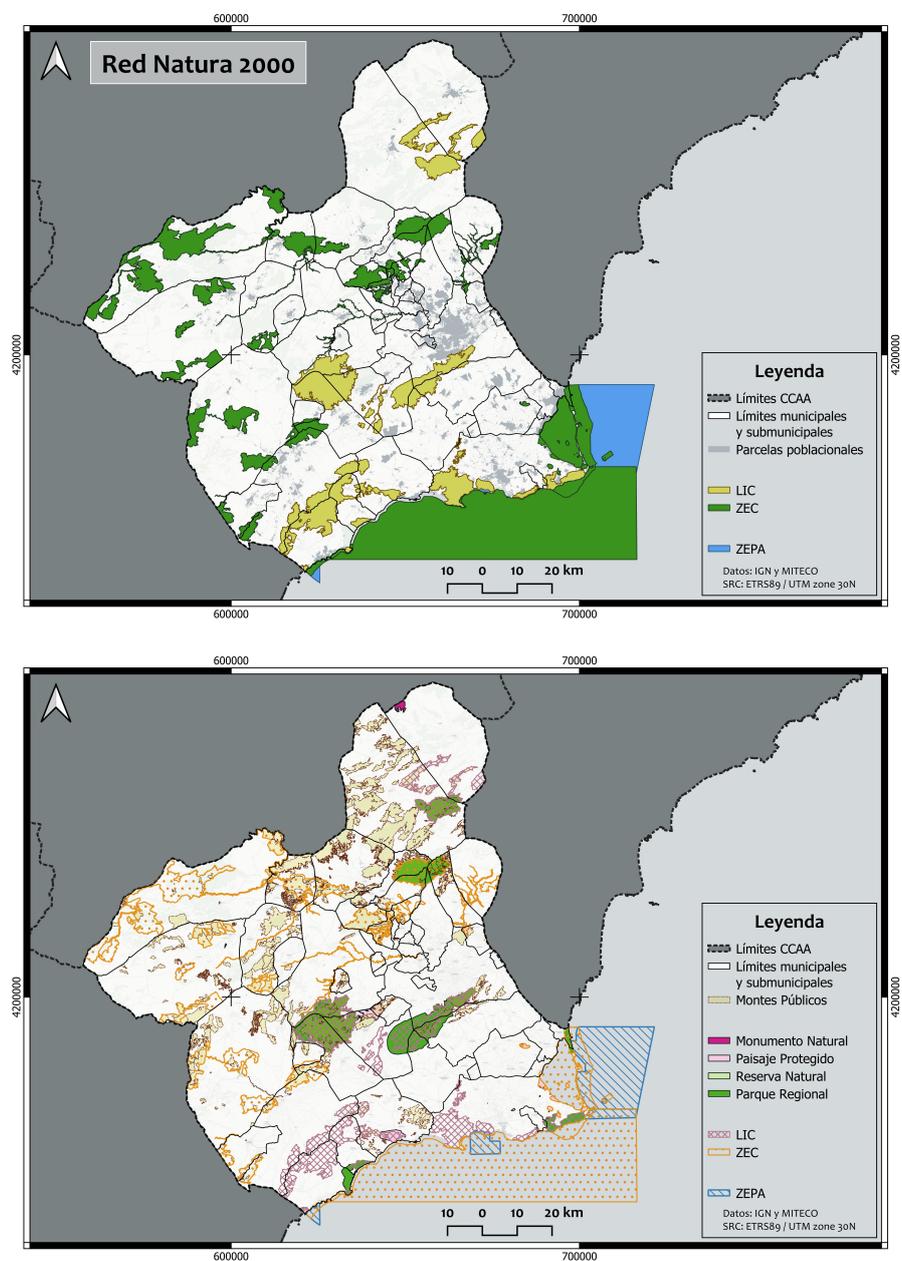


Figura 2.5: Red Natura y espacios protegidos

En segundo lugar (figura 2.6) se presentan los parques regionales así como otros lugares de interés como los montes públicos.

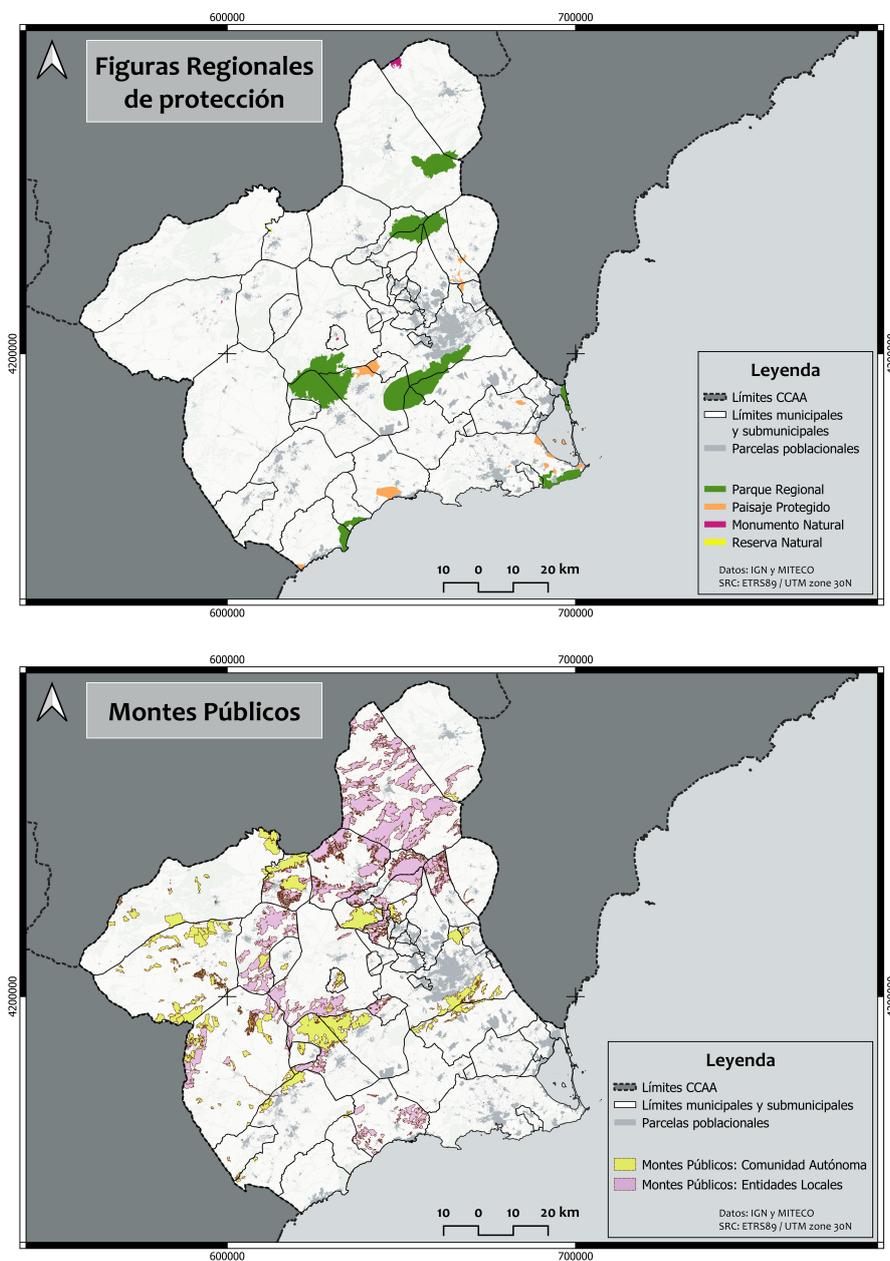


Figura 2.6: Parques regionales, y montes públicos.

2.2 Datos observados

Cuadro 2.3: Lista de puntos de observación en la CARM

Nombre	acrónimo	Contaminante
Alcantarilla	ALC	O3, PM10, NO2 ,SO2
Aljorra	ALJ	O3, PM10, NO2 ,CO;SO2
Alumbres	ALU	O3, PM10, NO2 ,CO,SO2
Caravaca	CAR	O3, PM10, NO2
Escombreras	ESC	PM10, NO2 ,CO,SO2
Lorca	LOR	O3, PM10, NO2 ,CO,SO2
Mompeán	MOM	O3, PM10, NO2 ,CO,SO2
San Basilio	SBA	O3, PM10, NO2,CO

Se han utilizado los datos de las estaciones de seguimiento de la contaminación atmosférica de la CARM. En la tabla 2.3 se presenta la lista de estaciones utilizadas y los contaminantes analizados en este trabajo. Los datos tienen una resolución temporal de 10 minutos y cubren completamente el periodo de estudio. Los datos han sido sometidos a un control de calidad equivalente al utilizado en trabajos anteriores, consistente en la eliminación de datos imposibles, corrección de sesgos temporales e incoherencias temporales. Todos los datos sospechosos han sido tomados como perdidos.

En este trabajo los datos observados se han utilizado para verificar la coherencia espacio-temporal de las series simuladas. Esta coherencia espacial se suele representar por la correlación espacial de los datos observados y los datos simulados en las áreas que rodean a las estaciones. Por otro lado se han analizado las correlaciones entre las distintas estaciones (matriz de correlación), y se ha comprobado que los datos simulados cumplen el mismo tipo de relaciones.

2.3 Datos modelados

Las bases de datos utilizadas en este estudio provienen del sistema de modelado SInQIAir. El sistema de modelado se encuentra descrito con detalle en el report de Modelización atmosférica (2010)

A modo de resumen, el sistema de modelización SInQIAir consta de dos partes fundamentales, el modelo WRF (Weather Research Model (Grell

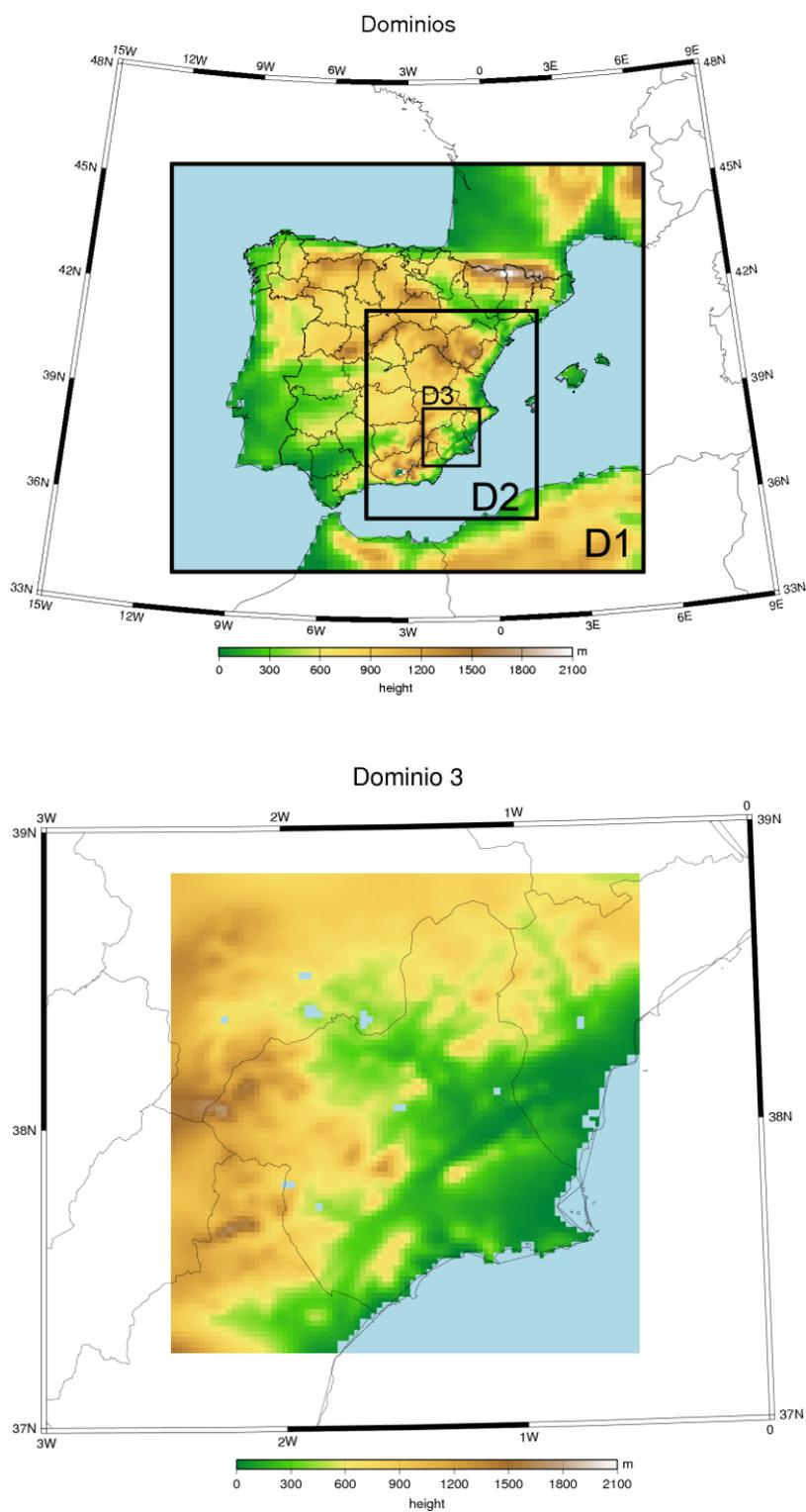


Figura 2.7: Configuración de dominios del sistema SinQlair (arriba). Detalle del dominio 3 de resolución espacial de 2km.

et al. 2005; Powers et al. 2017), y el modelo de transporte químico CHIMERE (Menut et al. 2013).

El sistema meteorológico consiste de tres dominios anidados bi-direccionalmente donde el más pequeño tiene una resolución espacial de 2km (ver figura 2.7). En este trabajo, al igual que en los informes anteriores, nos centraremos tan solo en el análisis de los resultados el dominio con mayor resolución espacial. Las simulaciones fueron realizadas en periodos de un día utilizando los datos de análisis del sistema de modelización del GFS.

El sistema CHIMERE consta de tres dominios. Para los dominios mayores CHIMERE se nutre de las emisiones de EMEP. Para el dominio MUR01 de resolución espacial de 1km se nutre hasta el año 2019 de las emisiones de la CARM. A partir de 2019 se nutre de las emisiones construidas dentro del proyecto SinQlair fase V, y que actualmente se utilizan en el sistema de predicción de la contaminación del aire de la CARM.

3.1 Metodología de Zonificación

Para la realización de la zonificación partimos de las salidas horarias del sistema sinclair para el dominio de la CARM con una resolución espacial de 2km y temporal de una hora. Los pasos seguidos son:

1. Cálculo de **valores diarios**. Se calcula el máximo diario (NO₂) o el máximo diario octohorario (O₃) o la media diaria (PM).
2. **Filtrado temporal** de datos. Eliminamos las frecuencias superiores a 6 meses.
3. **Estandarización** de las series temporales en cada punto. Se hace que todas las series tengan media 0 y desviación estándar 1.
4. Obtención de **series municipales**. Para cada municipio y variable considerada, construimos una serie representativa de cada municipio:
 - Series municipales totales o **promedio**. Se construyen como el promedio de las series de todos los puntos que caen dentro del municipio.
 - Series municipales **poblaciones**. Las serie promedio se obtiene como el promedio pesado por la densidad de población.

5. Reducción dimensional y filtrado mediante componentes principales. Se obtiene un conjunto de **componentes principales** aplicadas a las series regionales anteriores
6. **Clustering** por similitud temporal. La agrupación de municipios se realiza mediante dos técnicas distintas a partir de los pesos de las PCs.
 - Método Jerárquico; Ward.
 - Método no Jerárquico; K-Means
7. **Reorganización** de clústers. Cada clúster se nombra en función de los municipios que contiene.
8. Obtención de **regiones robustas**. Las técnicas anteriores se aplican a un conjunto de posibilidades y se obtienen las regiones más comunes así como la incertidumbre asociada a ellas.

A continuación se presenta la metodología detallada.

3.2 Pretratamiento de datos

Cálculo de series diarias

Dependiendo de la variable a tratar, la construcción de las series diarias es distinta.

Las series medias diarias MD_j donde j representa el día, se calculan como:

$$MD_j = \frac{1}{24} \sum_{l=1}^{24} H_j^l \quad (3.1)$$

donde H_j^l denota el valor para la hora l para el día j . En el caso de las series observacionales las series diarias se han calculado a partir de las diezminutales. Las series de máximos diarios XD_j se calculan como:

$$XD_j = \max \{H_j^1 \dots H_j^{24}\} \quad (3.2)$$

Las series octohorarias OH_j^i se calculan como:

$$OH_j^i = \frac{1}{8} \sum_{l=i-3}^{i+4} H_j^l \quad (3.3)$$

Para obtener la serie diaria máxima de valores octohorarios se vuelve aplicar la ecuación anterior.

Filtrado temporal de las series y normalización

El filtrado de paso alto es una técnica de procesamiento de señales utilizada en el análisis de series temporales para resaltar o acentuar las frecuencias más altas en los datos, eliminando o atenuando las componentes de frecuencia más baja. Esta técnica es útil para eliminar tendencias de largo plazo o variaciones suaves en una serie temporal, lo que permite enfocarse en las fluctuaciones de alta frecuencia o los cambios rápidos en los datos.

El objetivo principal del filtrado de paso alto en series temporales es separar y analizar las componentes de alta frecuencia de los datos, lo que puede revelar patrones, oscilaciones o eventos rápidos que no son evidentes en la serie original. Este proceso es útil en diversas aplicaciones, como el análisis financiero, la detección de anomalías, la eliminación de ruido de baja frecuencia y la identificación de eventos abruptos.

Existen varios métodos para realizar el filtrado de paso alto en series temporales, en este trabajo se ha empleado la **Transformada de Fourier** que representa la serie temporal en el dominio de la frecuencia, donde es posible suprimir las componentes de baja frecuencia y conservar las de alta frecuencia.

La Transformada de Fourier de una señal en el dominio del tiempo $x(t)$ se define como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

donde $X(f)$ representa la representación en el dominio de la frecuencia de $x(t)$, y f es la variable de frecuencia.

La Transformada de Fourier inversa nos permite obtener la señal

original $x(t)$ a partir de su representación en el dominio de la frecuencia:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df$$

Un filtro pasa-alta se puede diseñar modificando las componentes de frecuencia de la señal $X(f)$. Atenúa o elimina las componentes de baja frecuencia, permitiendo que solo pasen las componentes de alta frecuencia. Matemáticamente, esto se puede lograr utilizando una función de filtrado $H(f)$, que se aplica en el dominio de la frecuencia:

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

donde $Y(f)$ es la representación filtrada en el dominio de la frecuencia de la señal.

Un ejemplo común de un filtro pasa-altos en el dominio de la frecuencia se define mediante la siguiente función de transferencia:

$$H(f) = \begin{cases} 1 & \text{si } f > f_c \\ 0 & \text{si } f \leq f_c \end{cases}$$

donde f_c es la frecuencia de corte que determina el punto en el que el filtro comienza a atenuar las componentes de baja frecuencia.

Para obtener la señal filtrada $y(t)$ en el dominio del tiempo, se puede aplicar la Transformada de Fourier inversa a $Y(f)$:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(f)e^{j2\pi ft} df$$

Este proceso resulta en una señal filtrada $y(t)$ que conserva las componentes de alta frecuencia mientras reduce o elimina las componentes de baja frecuencia de la señal original $x(t)$. En este trabajo se han eliminado las frecuencias superiores a 6 meses.

Finalmente se han normalizado todas las series, simplemente para garantizar que la varianza de las mismas, no intervenga en el proceso de regionalización. Las series normalizadas diarias SN_j se han obtenido restando su media y dividiendo por la varianza:

$$SN_j = \frac{SN_j - \overline{SN}}{\sigma(SN)} \quad (3.4)$$

Notemos que como veremos en apartados siguientes, normalizar las series es equivalente a trabajar con la matriz de correlación en lugar de con la matriz de covarianza.

Construcción de series municipales

Como ya hemos definido anteriormente en este trabajo pretendemos agrupar municipios en los que las concentraciones de los distintos contaminantes varíen en el tiempo de manera similar. Así pues construimos series representativas de cada municipio. En primer lugar construimos las series medias espaciales. Éstas se construyen simplemente como el promedio de todos los puntos del modelo que caen dentro de cada municipio. La serie promedio para el día j para el municipio m vendrá dada por

$$SM_j^m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_j^i \quad (3.5)$$

donde S_j^i denota el valor de la serie del modelo para el día j en el punto i . En cada municipio i recorrerá los n puntos del modelo que queden dentro de los límites del municipio.

Por otro lado, como ya se ha mencionado, los puntos que más nos pueden interesar son los puntos donde se aglomera la población. Así pues se construyen las series poblacionales simplemente pesando las series como función de la población y las infraestructuras que se tienen en cada punto del municipio.

$$SP_j^m = \sum_{i=1}^n W^i S_j^i \quad (3.6)$$

donde los pesos se obtienen como

$$SP_j^m = \sum_{i=1}^n W^i S_j^i \quad (3.7)$$

donde

$$W_i = \beta \frac{P^i}{P^m} + \alpha \frac{I^i}{I^m} \quad (3.8)$$

P^i denota la población correspondiente al punto de rejilla i , P^m la población total del municipio, I el área de infraestructuras y polígonos industriales y I^m la total del municipio. β y α denotan los coeficiente de importancia relativos. Se debe de dar que $\alpha + \beta = 1$. En este trabajo hemos tomado $\alpha = 0.8$ y $\beta = 0.2$.

Para el cálculo de los pesos se ha utilizado los datos descritos en los apartados 2.1 y 2.1 Así pues al final de este proceso obtendremos una serie poblacional y una serie media para cada municipio descrito en la sección 2.1

Análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF)

Una vez obtenidas las series municipales procedemos a una reducción de la dimensionalidad del problema mediante el empleo de las EOFs asociadas a dichas series. Notemos que además de simplificar el sistema filtramos el ruido local de las series.

El análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (Von Storch y Zwiers 2000, EOFs) es una técnica de descomposición de datos utilizada para analizar patrones de variabilidad en conjuntos de datos espaciales o temporales. También se conoce como Análisis de Componentes Principales Espaciales (PCA, por sus siglas en inglés, *Principal Component Analysis*) cuando se aplica a datos espaciales.

El objetivo principal del análisis de EOFs es encontrar las funciones ortogonales que mejor representen la variabilidad en los datos. Estas funciones se denominan EOFs y se utilizan para describir los modos dominantes de variación en los datos. Cada EOF representa un patrón espacial o temporal distinto de variabilidad. Por otro lado, la elección de las EOFs que expliquen mayor varianza del campo nos puede servir

para reducir la dimensionalidad del problema.

En nuestro caso tenemos un conjunto de N series temporales correspondientes a los 48 municipios, que notamos con el vector X , el análisis de componentes principales (PCA) se realiza de la siguiente manera. Como nuestros datos ya están normalizados

$$Z = X$$

Calculamos la matriz de covarianza Σ de Z (correlación en nuestro caso):

$$\Sigma = \frac{1}{N-1} Z^T Z$$

Obtenemos los autovectores V y autovalores λ de Σ . Estos representan las direcciones principales y la varianza explicada por cada componente principal. Las componentes principales se obtienen a partir de los autovectores. La i -ésima componente principal es:

$$PC_i = Z \cdot V_i$$

donde V_i es el i -ésimo autovector de V .

En nuestro caso el número de autovectores escogido es siempre uno que nos garantiza una varianza explicada al 90%.

3.3 Agrupamiento

El objetivo principal del trabajo es conseguir regiones, grupos de municipios, que tengan una variabilidad temporal similar. Para ello en este trabajo se emplean técnicas de *Machine Learning*, más concretamente, métodos de aprendizaje no supervisado, utilizando datos no etiquetados. Partimos de una serie de elementos (vectores), series municipales de contaminación atmosférica, y se agrupan en función de su similitud. En general la similitud vendrá dada por la distancia euclídea. Utilizamos distintas metodologías de agrupamiento, que se aplicamos a las PCs de las series municipales originales; técnicas jerárquicas y no jerárquicas.

Clustering Jerárquico

El clustering jerárquico es una técnica de análisis de datos que se utiliza para agrupar objetos similares en conjuntos o clústeres de manera jerárquica. En este enfoque, los objetos se agrupan en clústeres de manera recursiva, de modo que los clústeres más pequeños se fusionan gradualmente en clústeres más grandes. El objetivo principal del clustering jerárquico es organizar los datos en una estructura jerárquica de clústeres que representen la similitud o la distancia entre los objetos. Esto permite visualizar la estructura de los datos y explorar las relaciones entre los objetos en diferentes niveles de granularidad.

El proceso de clustering jerárquico generalmente implica los siguientes pasos:

1. **Inicialización:** Cada objeto se considera un clúster individual en el nivel más bajo de la jerarquía.
2. **Cálculo de la similitud o distancia:** Se calcula la similitud o la distancia entre los objetos. Esto se puede hacer utilizando diversas métricas, como la distancia euclidiana o la correlación.
3. **Agrupación:** Se fusionan los dos clústeres más similares en un nuevo clúster en un nivel superior de la jerarquía.
4. **Repetición:** Los pasos 2 y 3 se repiten hasta que todos los objetos estén agrupados en un solo clúster en la parte superior de la jerarquía.
5. **Visualización:** La estructura jerárquica de clústeres se puede visualizar mediante un dendrograma, que muestra cómo se agrupan y dividen los objetos en diferentes niveles.

El método de enlace es una parte crucial del clustering jerárquico y determina cómo se calcula la similitud entre clústeres para decidir cuáles fusionar.

En nuestro caso utilizamos el método de Ward (Jain, Murty y Flynn 2010; Ward 1963), un método jerárquico con método de enlace por varianza.

Cluster no jerárquico; K-means

El método K-Means (Jain, Murty y Flynn 2010; MacQueen 1967) es una técnica de agrupamiento de datos ampliamente utilizada. El objetivo principal del método K-Means es encontrar una partición de los datos en K clústeres, donde K es un número predefinido. Cada clúster se representa mediante su centroide, que es el punto medio de todos los objetos en ese clúster. El objetivo es minimizar la suma de las distancias al cuadrado entre los objetos y sus centroides respectivos.

El proceso de clustering mediante el método K-Means implica los siguientes pasos:

1. **Inicialización de centroides:** Se eligen K centroides iniciales, generalmente de manera aleatoria o utilizando algún método de selección específico. Esta semilla puede generarse de manera aleatoria o puede ser dada por el usuario, por ejemplo proveniente de una clasificación anterior.
2. **Asignación de objetos a clústeres:** Cada objeto se asigna al clúster cuyo centroide esté más cerca según alguna medida de distancia. En nuestro caso utilizamos una distancia euclídea.
3. **Actualización de centroides:** Se recalculan los centroides de cada clúster utilizando los objetos asignados a ese clúster.
4. **Repetición:** Los pasos 2 y 3 se repiten hasta que no haya cambios significativos en la asignación de objetos a clústeres o se alcance un número máximo de iteraciones.

La elección del número de clústeres (K) es un paso importante en el método K-Means y puede influir en los resultados del clustering. Se utilizan diferentes métodos, como el método del codo (elbow method) o el método de la silueta (silhouette method), para determinar un valor óptimo de K . En nuestro caso se hace un estudio inicial y se determina el conjunto de posibilidades inicial más razonable. Al igual que en el caso anterior trabajamos siempre en el espacio de las EOFs.

3.4 Reorganización y regiones robustas.

Como hemos mencionado anteriormente los algoritmos de agrupamiento tienen asociada una incertidumbre que va desde el número de PCs elegido y el número de grupos a elegir. En nuestro caso, además añadimos utilizar distintos algoritmos de clasificación y distintas variables. Lo que se propone es una zonificación donde se tenga en cuenta todas estas posibles causas de incertidumbre. El resultado final ha de ser una zonificación, tanto por variable, como global en la que se analice dicha incertidumbre. Para ello se ha ideado una metodología que describimos a continuación.

Los algoritmos que se utilizan para el agrupamiento suelen dar un orden distinto de los grupos. Esto significa, que si por ejemplo aplicamos dos algoritmos a un determinado contaminante, aunque las regiones que se obtengan sean muy similares pueden ser nombradas de forma distinta. Para evitar este problema se ha ideado un algoritmo de re-nombramiento. El algoritmo consiste en establecer una lista de municipios con prioridad de grupo. De tal manera que exigimos que el grupo de un determinado municipio tienda siempre a ser el mismo. La lista de prioridad construida está basada en un análisis preliminar, criterios de distancia espacial y los resultados de trabajos anteriores (MAR 2017). El orden de nombramiento preestablecido es Murcia, Cartagena, Lorca, Jumilla, Caravaca, Aguilas, Archena, Cieza, ... Esto significa que grupo 1 será siempre el que contenga Murcia. El grupo 2 será el que contenga a Cartagena, a no ser que ya pertenezca al grupo uno, el grupo 3 contendrá siempre a Lorca, si esta no ha sido previamente incluida en algunos de los grupos anteriores. Y así sucesivamente.... Esta metodología nos permite por un lado nombrar los grupos de manera coherente y además identificar los municipios que quedan aislados en el algoritmo de clasificación, es decir forman grupos muy pequeños.

En segundo lugar, una vez obtenidas un conjunto de clasificaciones, buscamos la clasificación común. Ésta se diseña clasificando un municipio dentro de una región en el grupo en el que más veces aparezca. A modo de ejemplo, supongamos que realizamos un conjunto de clasificaciones donde variamos el número de PCs de 10 a 16, utilizamos dos algoritmos de clasificación, y dos tipos de series distintas. Tendríamos un conjunto de 24 clasificaciones. Si un municipio se incluye 20 veces en la región 1, y el resto en otras regiones, tendríamos que su cohe-

rencia regional (porcentaje de veces que se clasifica) sería del 83%. La distribución de los porcentajes nos dará una idea de la robustez de la clasificación. Notemos que esta reorganización tenderá a darnos el número óptimo de regiones sin necesidad de analizar en cada caso el número de regiones óptima. Podríamos partir por ejemplo de un número inicial de 8 regiones y obtener que el número óptimo es 6.

Indices de similaridad y robustez

Cualquier proceso de agrupamiento espacial lleva asociado una serie de incertidumbres. Esto significa que aunque las clasificaciones obtenidas son las que minimizan la correlación temporal entre regiones y maximizan la correlación intra-regiones, otras combinaciones pueden dar resultados similares. En este sentido, el gestor de la zonificación puede testear otras configuraciones, basándose en los porcentajes de asignación obtenidos.

Podemos definir un coeficiente de similaridad CS , que compare la minimización de las correlaciones entre las regiones.

$$CS = 100 \left(1 - \frac{C_{sr} - C_n}{C_x - C_n} \right) \quad (3.9)$$

donde C_{sr} representa el promedio del triángulo inferior de la matriz de correlación de las series regionales. Las series regionales se calculan como el promedio de las series municipales. C_n representa el promedio de las series regionales si las regiones se escogieran de manera aleatoria. C_x es el promedio de correlación de todas las series municipales. En el caso que nos ocupa, podemos tomarlo como el promedio de la matriz de correlación más bajo. Este coeficiente podrá variar entre 0 y 100. 100 significa que la regionalización no presenta ninguna robustez. Cuanto más se aproxime a 0, más robusta será. Así por ejemplo si los municipios que forman las regiones se escogieran al azar $CS=100$

En segundo lugar definimos un índice de robustez CR . Se basa en cuantificar la similaridad de las series que forman una región. Para cada región se calcula el promedio de las correlaciones entre los municipios que la forman. El promedio de todos los índices regionales será el índice o coeficiente de robustez. Cuanto mayor sea el índice

más coherentes serán las regiones. Podemos al igual que anteriormente normalizar el índice en porcentaje

Notemos que lo que realmente va a interesar de este índice son las variaciones que pueda sufrir cuando cambiamos un municipio de zona.

Capítulo 4 — Resultados NOx

Grupo G-MAR/UMU

4.1 Introducción

Los óxidos de nitrógeno (NOx) son contaminantes atmosféricos que se originan a partir de diversas fuentes, y su formación es una consecuencia de procesos de combustión y reacciones químicas en la atmósfera. Las principales fuentes de NOx incluyen:

Emisiones de vehículos de motor: Los automóviles, camiones y otros vehículos con motores de combustión interna emiten NOx como un subproducto de la quema de combustibles fósiles, como la gasolina y el diésel. Los motores de encendido por chispa y los motores diésel son fuentes significativas de emisiones de NOx en áreas urbanas y de tráfico congestionado.

Emisiones industriales: Las plantas industriales, incluidas las instalaciones de generación de energía, las fábricas y las refinerías, pueden liberar grandes cantidades de NOx en la atmósfera como resultado de la combustión de combustibles para producir electricidad o energía térmica.

Procesos de combustión: Además de los vehículos y las instalaciones industriales, otros procesos de combustión, como los generadores de energía y las calderas, contribuyen a las emisiones de NOx.

Agricultura: Las emisiones de NOx también pueden provenir de la

agricultura, especialmente del uso de fertilizantes nitrogenados. La lixiviación de nitratos del suelo y su escorrentía hacia cuerpos de agua pueden contribuir a las emisiones de NOx en forma de óxido nitroso (N₂O).

Reacciones atmosféricas: En la atmósfera, los compuestos orgánicos volátiles (COVs) y el amoníaco (NH₃) pueden reaccionar con los óxidos de nitrógeno para formar NOx secundarios. Esto ocurre a través de reacciones fotoquímicas, y es especialmente común en áreas urbanas.

Los NOx son precursores de la formación de ozono troposférico y partículas finas en la atmósfera, lo que los convierte en contaminantes preocupantes para la calidad del aire y la salud humana. Los esfuerzos para reducir las emisiones de NOx incluyen mejoras en la eficiencia de los motores, el uso de tecnologías de control de la contaminación y la promoción de fuentes de energía más limpias y sostenibles.

4.2 Climatologías y valores umbrales

En las tablas 4.1 y 4.2 se representan los valores límites y umbrales para los óxidos de Nitrógeno expuestos en Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

Período de Promedio	Valor Límite	Margen de Tolerancia
Valor límite horario	1 hora	200 µg/m ³ de NO ₂ que no podrán superarse en más de 18 ocasiones por año civil.
Valor límite anual	1 año civil	40 µg/m ³ de NO ₂
Nivel crítico	1 año civil	30 µg/m ³ de NOx (expresado como NO ₂)

Cuadro 4.1: Valores límite del dióxido de nitrógeno para la protección de la salud y nivel crítico para la protección de la vegetación.

Parámetro	Período de Promedio	Umbral
Umbral de activación	Promedio horario (1)	180 µg/m ³
Umbral de información	Promedio horario (2)	200 µg/m ³
Umbral de alerta	Promedio horario	400 µg/m ³

Cuadro 4.2: Umbrales de activación, de información y de alerta para el dióxido de nitrógeno

En la figura 4.1 se presentan los valores medios para el NO₂ y NOx. Se observa que hay zonas que superan los valores límite. La zona con mayores valores se encuentra en la vega baja del Segura, con

valores que alcanzan concentraciones cercanas a los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en NO_2 y superiores de NO_x . Algunas áreas en el municipio de Cartagena alcanzan valores muy cercanos al límite crítico.

Si analizamos el número de superaciones de los distintos umbrales obtenemos que solo se supera el umbral de activación en puntos cercanos al puerto de Cartagena. No obstante encontramos zonas donde los valores máximos quedan cerca del umbral de activación. Para ello se representa el percentil 99 de las concentraciones horarias y máximas diarias (Ver figura). De nuevo las zona sur del área metropolitana de Murcia se muestra como una zona donde se podrían dar las superaciones de al menos el umbral de activación. El nivel de alerta es altamente improbable.

La comparación de los datos del modelo con los datos observados nos da cierta confianza. No hay superación de los umbrales en las estaciones al igual que en el modelo. Los valores medios en Alcantarilla de NO_2 están en torno a $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en San Basilio en torno a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en Mompeán en torno a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valores muy próximos a los dados por el modelo en dichas zonas. En cuanto a los extremos, los valores del percentil 99 de los máximos diarios es aproximadamente 160, 125, y $117 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para San Basilio, Alcantarilla y Momean respectivamente, que de nuevo está en un acuerdo muy aceptable con los dados por el modelo.

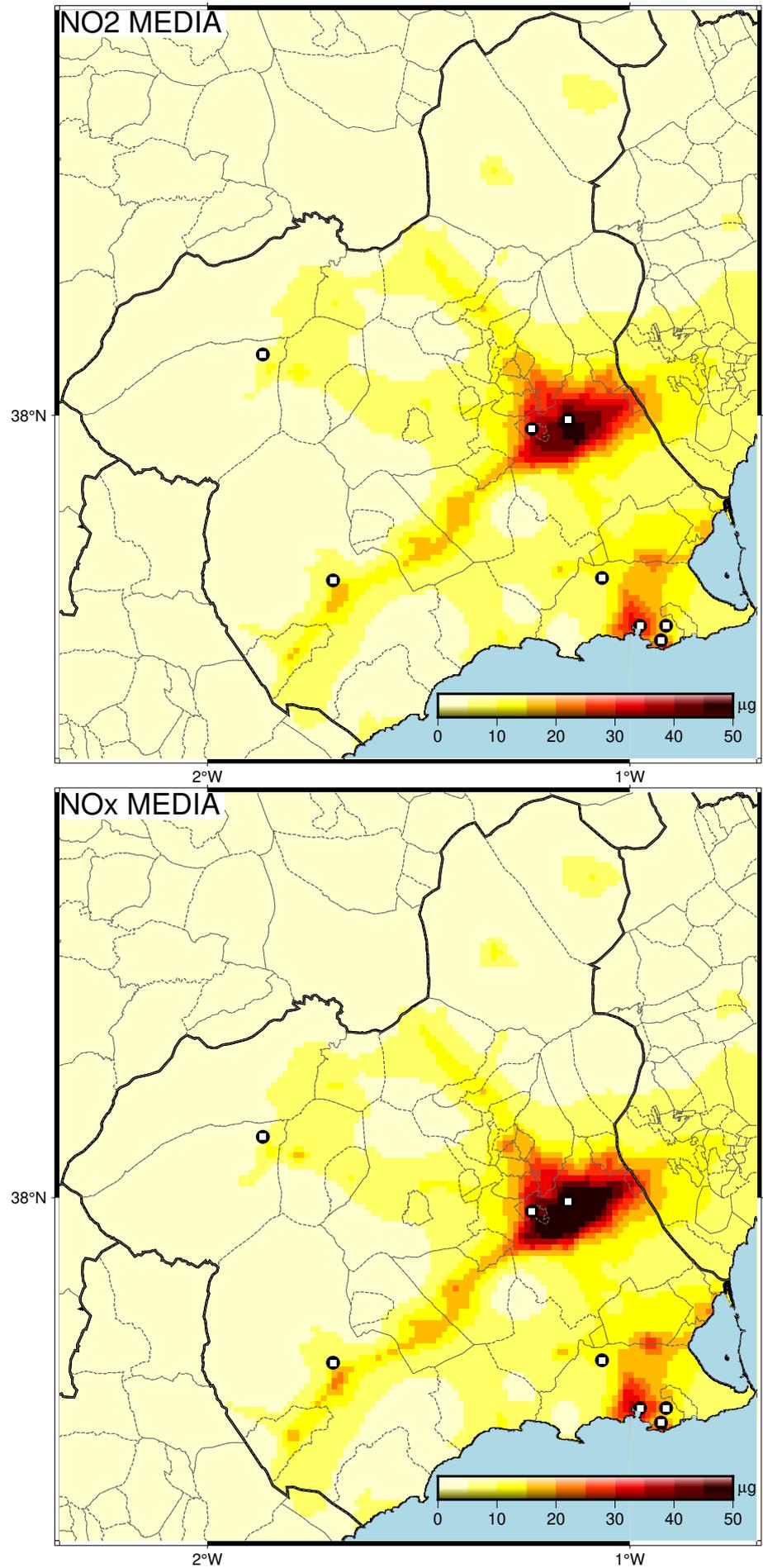


Figura 4.1: Valores medios anuales de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de NO₂ y NO_x

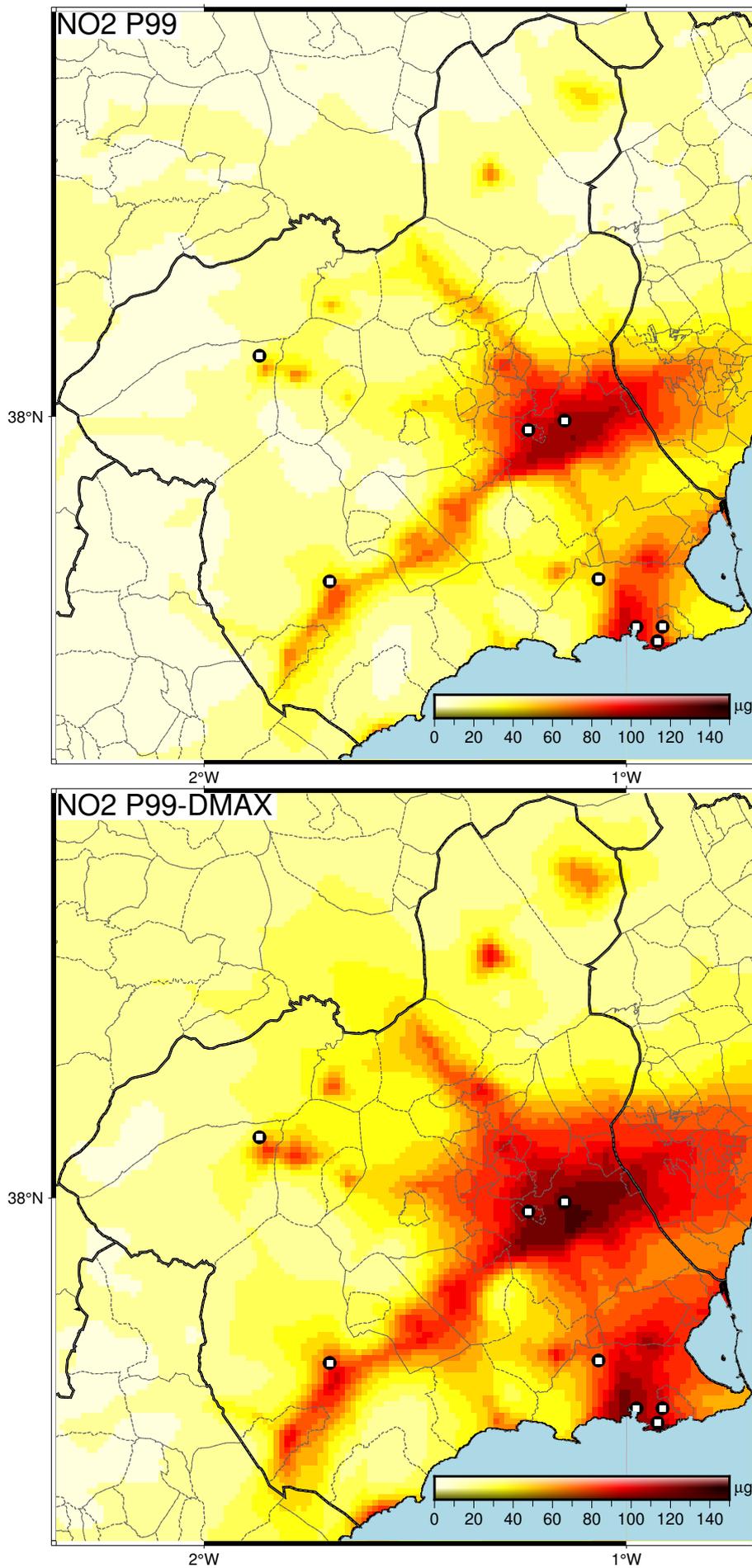


Figura 4.2: Percentil 99 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de NO₂ para los valores horarios (arriba) y para los máximos diarios (abajo).

4.3 Zonificación para los óxidos de nitrógeno.

Tal y como se ha comentado en la sección de metodología, se presentan los resultados para el conjunto de agrupaciones que barre la combinación de la utilización de 6 a 16 PCs y 8 regiones para las series totales como las series pesadas por uso territorial y densidad de población utilizando dos métodos de clasificación distintos. El conjunto total de agrupaciones distintas ha sido 64.

Los resultados de la zonificación por tipos de series y algoritmos se presenta en la Figura 4.3 donde se presentan las regiones más coherentes y la Figura 4.4 donde se representan las mas coherentes utilizando siempre los comunes. En todas las clasificaciones obtenemos que el número óptimo de regiones es 6. Las región con mayor coherencia es la zona de Cartagena (R2). El uso de las series poblacionales hace que aparezca otra dos regiones muy coherentes, Murcia (R1) y la vega media (R8). El resto de las zonas Noroeste y altiplano presenta bastante variabilidad. Nótese que dichas regiones presentan unas concentraciones de NO2 muy bajas.

En la clasificación final (figura 4.6) aparecen 6 regiones, Cartagena y Mar Menor (R2), Murcia y alrededores (R1) el Noroeste, junto con el municipio de Yecla (R5) , el altiplano con parte de la vega media (R4), vega media (R8) y franja sur y Lorca (R3). No obstante, analizando los mapas anteriores y el mapa de porcentajes de asignación (figura 4.7,) muchos de los municipios pueden ser reasignado a zonas colindantes sin riesgo a que la coherencia de las regiones se vea comprometida. Por ejemplo, municipios como Molina de Segura, Abarán, etc pueden ser asignados al clúster 8. Básicamente todos los colores tendientes al rojo nos muestran las zonas que pueden ser reasignadas sin problema. El caso de Yecla está en el límite pues prácticamente el 50% de las veces se asigna al Región del Noroeste.

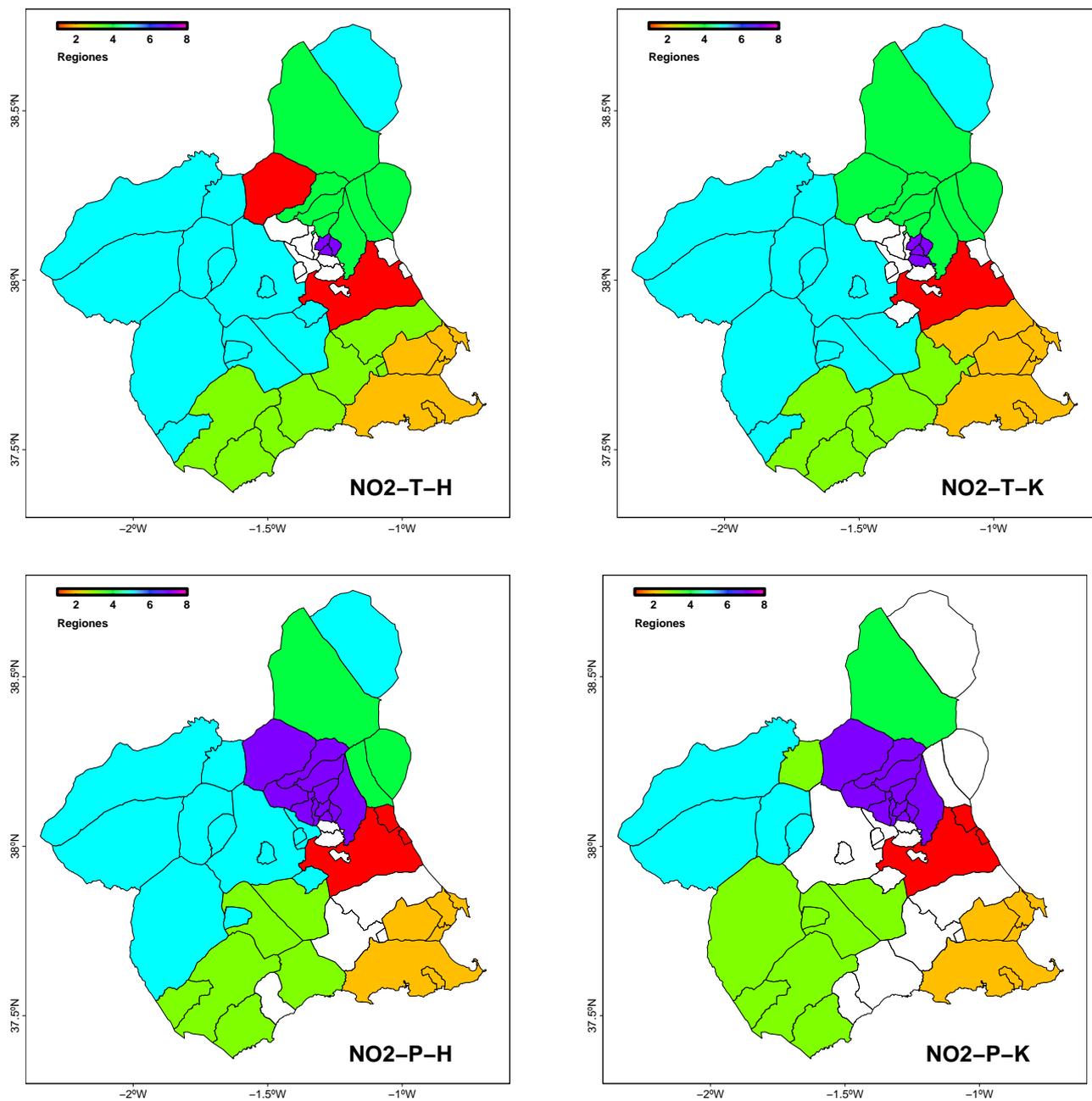


Figura 4.3: Clasificaciones parciales con ceros para el NO_2 . En la fila superior encontramos las clasificaciones con las series municipales promedio (T), para un método jerárquico (H) (izda) y K-means (dcha) (K). En la fila inferior se representan los resultados usando las series municipales pesadas por población (P). A modo de ejemplo, el título interior **NO2-P-K** significa análisis para el NO_2 utilizando la serie poblacional y el algoritmo K-Means.

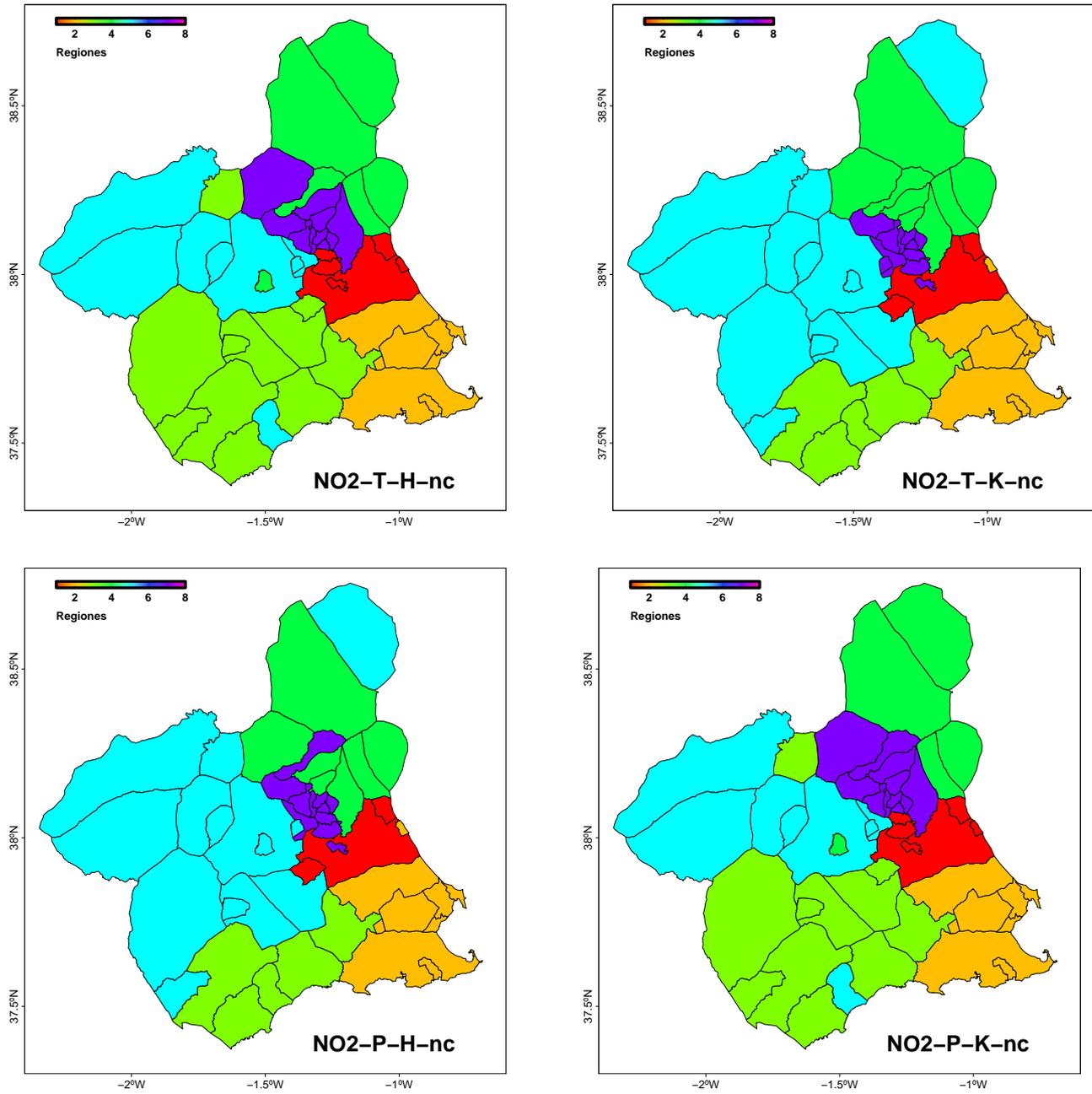


Figura 4.4: Igual que figura 4.3 pero usando la zona más repetida.

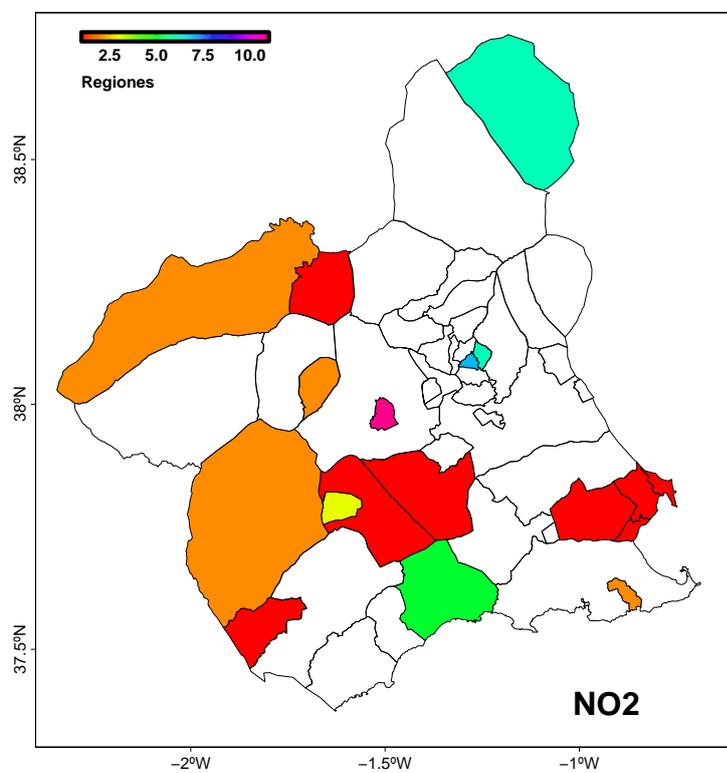
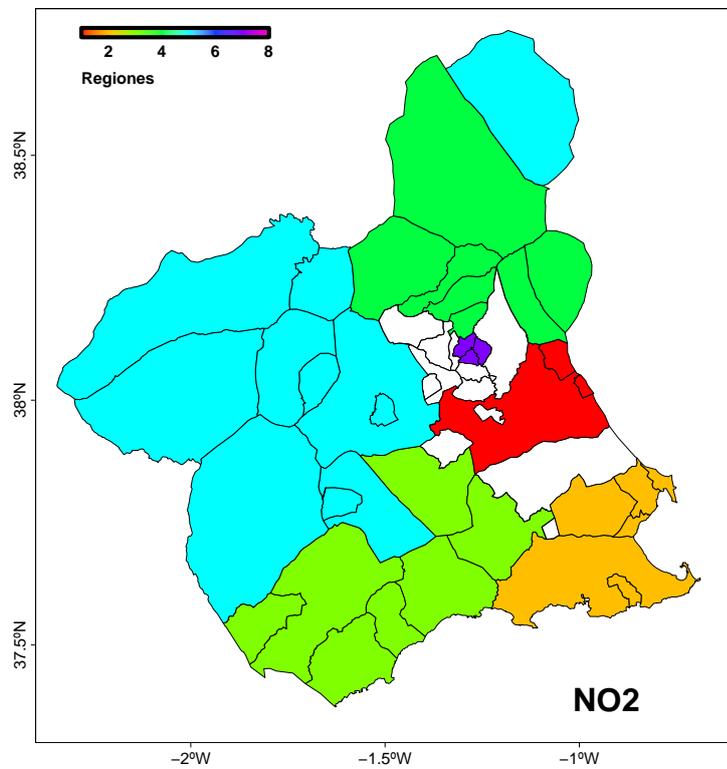


Figura 4.5: Clasificaciones finales con ceros para el NO₂.

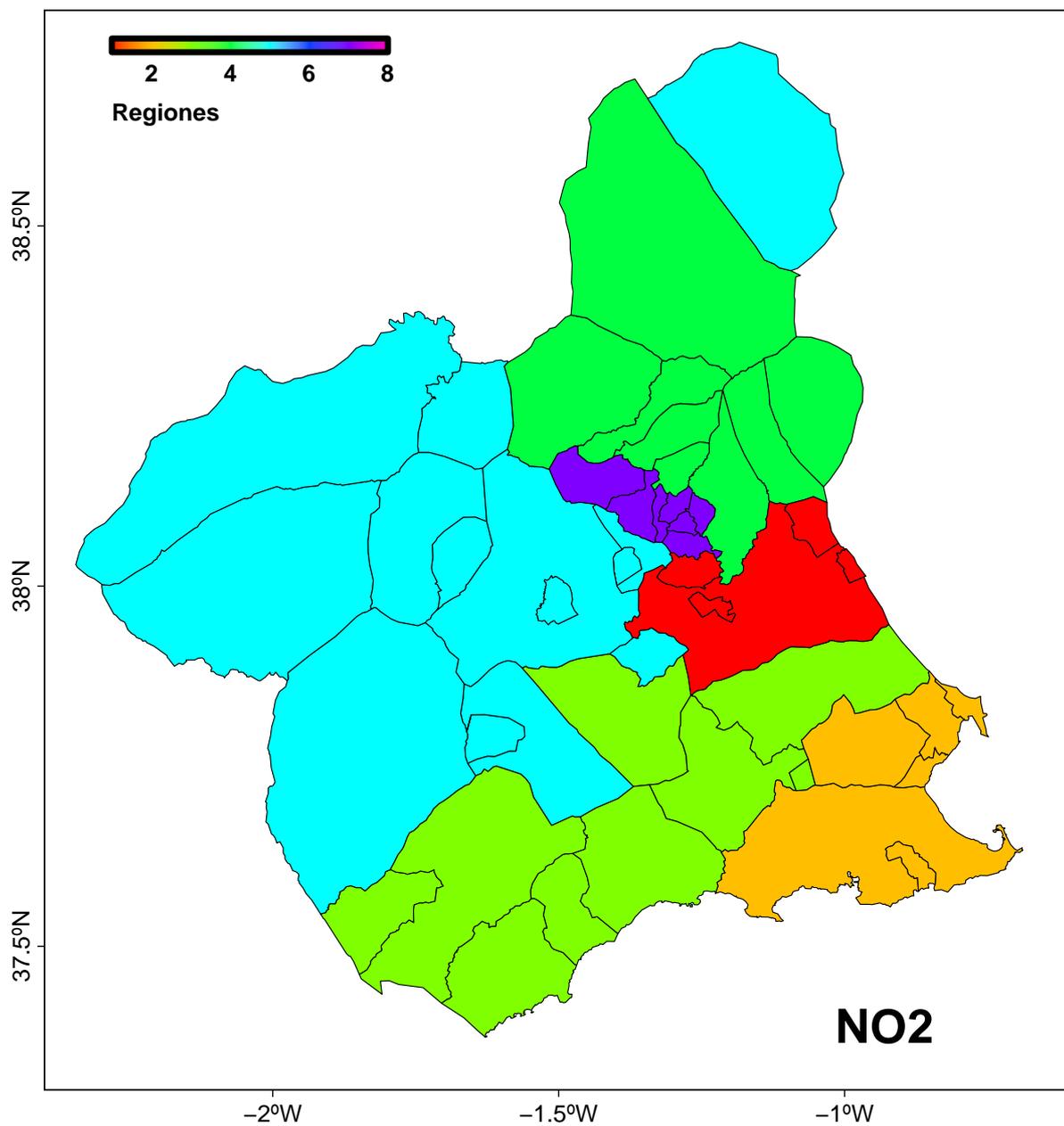


Figura 4.6: Clasificación final para el NO₂.

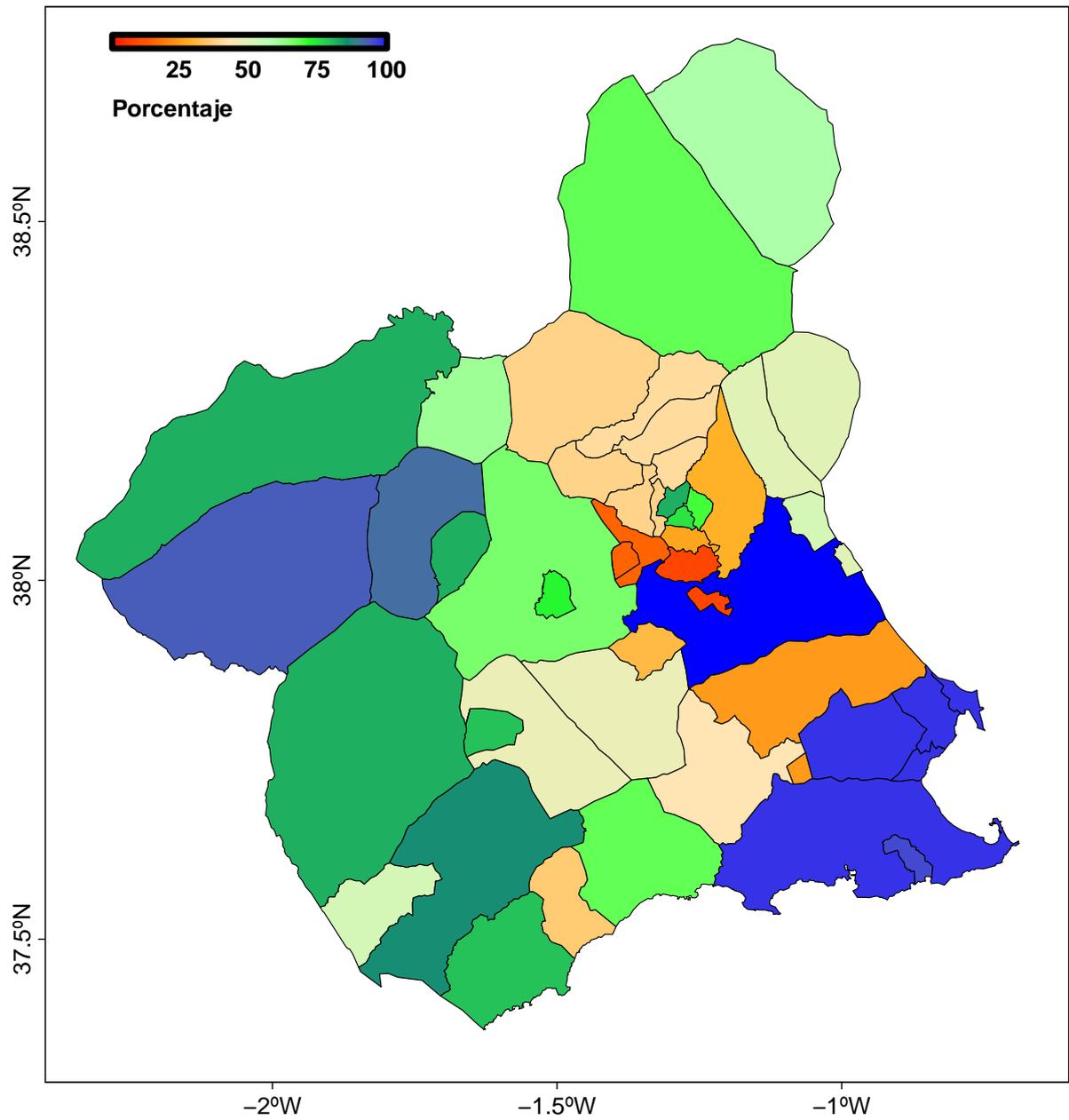


Figura 4.7: Porcentaje de coincidencias con la clasificación final de la figura 4.6 para el NO₂.

Capítulo 5 — Resultados Ozono

Grupo G-MAR/UMU

5.1 Introducción

El ozono troposférico (O_3) se forma a nivel de la troposfera debido a una serie de reacciones fotoquímicas que involucran contaminantes atmosféricos. A continuación, se presenta una formulación simplificada del proceso:



En el **paso 1**, el dióxido de nitrógeno (NO_2) absorbe la luz solar ($h\nu$) y se descompone en monóxido de nitrógeno (NO) y oxígeno atómico (O).

En el **paso 2**, el oxígeno atómico (O) reacciona con el oxígeno molecular (O_2) para formar ozono (O_3).

En el **paso 3**, el monóxido de nitrógeno (NO) reacciona con el ozono (O_3) para regenerar NO_2 y oxígeno molecular (O_2), cerrando el ciclo.

Este proceso de formación y destrucción del ozono troposférico es un equilibrio dinámico y está influenciado por la concentración de NO_x

y COVs en la atmósfera. El ozono troposférico es un contaminante y un componente clave de la contaminación del aire, con implicaciones para la salud humana y el medio ambiente.

Es importante destacar que la susceptibilidad a los efectos del ozono troposférico varía de persona a persona y depende de factores como la edad, la salud general y la duración de la exposición. Por lo tanto, es esencial tomar medidas para reducir la exposición al ozono troposférico, especialmente en áreas urbanas y en días con altas concentraciones de ozono. Las regulaciones y políticas de calidad del aire se implementan para controlar y reducir las concentraciones de ozono y proteger la salud pública.

El ozono troposférico, cuando se encuentra en concentraciones elevadas en la atmósfera, puede tener consecuencias negativas para el medio ambiente, dañando a la vegetación, reduciendo la producción agrícola, y cambios en ecosistemas tanto terrestres como acuáticos.

Es importante abordar tanto las implicaciones para la salud como las consecuencias ambientales del ozono troposférico a través de la regulación de las emisiones y la adopción de prácticas que reduzcan la formación de ozono. Esto es esencial para proteger la salud humana y preservar el medio ambiente.

5.2 Climatologías y valores umbrales

En las tablas 5.2 y 5.1 se presentan los valores límite y umbrales para las concentraciones de Ozono dadas por el RD 102/2011. A continuación se presentan las climatologías relevantes relacionadas con dichos valores.

En la figura 5.1 se presentan los valores medios anuales para el Ozono, tanto para las máximas diarias como los máximos diarios octohorarios. Observamos que gran parte de la CARM presenta valores por encima de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los máximos diarios y valores por encima de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los máximos octohorarios. Los valores más bajos se encuentran en las zonas con mayor contaminación por óxidos de nitrógeno; la zona de Murcia seguida por Cartagena. Esto se debe a la destrucción del Ozono. En general los valores son muy altos, esto es debido a las condiciones favorables para la formación; gran insolación y alta

Cuadro 5.1: Valores límite para el Ozono

Objetivo	Parámetro	Valor
Protección humana	1 Máxima diaria de las medias móviles octohorarias (1)	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que no deberá superarse más de 25 días por cada año civil de promedio en un período de 3 años
Protección vegetal	2 AOT40, calculado a partir de valores horarios de mayo a julio	18,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ de promedio en un período de 5 años
Protección humana LP	3 Máxima diaria de las medias móviles octohorarias en un año civil	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Protección vegetal LP	4 AOT40, calculado a partir de valores horarios de mayo a julio	6,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$

Cuadro 5.2: Umbrales de activación, información y de alerta para el Ozono

Parámetro	Promedio	Umbral
Umbral de activación	Promedio 8 horas	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Umbral de información	Promedio horario	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Umbral de alerta	Promedio horario	240

temperatura.

Si analizamos el número de superaciones tanto de los valores de activación (figura 5.2), promedio de 8 horas superiores a 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, observamos que en la mitad de la región se superan los 25 días anuales. Estas superaciones son especialmente notables en el norte de la CARM. Estos valores pueden ser debidos al transporte mediante el régimen de brisas del ozono producido en las zonas más pobladas. En cuanto a las zonas con mayor número de superaciones del umbral de información (180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se encuentran en la franja que vá desde el norte del municipio de Murcia, Molina de Segura y la vega media del Segura. No obstante el número de superaciones es raramente mayor a 5 superaciones/año.

Finalmente se presenta el AOT40, calculado como la suma de los excesos de Ozono (valores superiores a 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el periodo de mayo a Julio en el horario de 8 a 20 horas. La normativa establece que dicho valor debe ser inferior a 18.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$. Dicho valor se supera en prácticamente toda la CARM, exceptuando, de nuevo, todas las zonas con grandes concentraciones de Oxidos de Nitrógeno, como son el campo de Cartagena y la zona metropolitana de Murcia.

Notemos que gran parte de la CARM sufre AOT40 muy superiores, llegando a casi el doble de los valores recomendados.

Al igual que en la evaluación de los óxidos de nitrógeno, se han comparado los valores representados con los valores dados por las estaciones de medida de la CARM. Para el cálculo de los valores de AOT40 los datos perdidos se han corregido tomando el mismo porcentaje de ocurrencia que en los datos conocidos. Los valores más altos de AOT40 se dan en Caravaca (26) y en Alcantarilla (25) seguidos por Lorca (22) y Murcia (SBA-19). Los valores más bajos se dan la zona del campo de Cargena con valores que van desde 17 en la Aljorra, hasta 12 en Monpean. Notemos pues que aunque parece que se sobreestiman levemente los todos los valores, el comportamiento espacial descrito por los datos modelados es muy similar al observado, exceptuando el caso de Alcantarilla. Aunque notemos que ésta se encuentra situada en una zona con un fuerte gradiente de los valores de AOT.

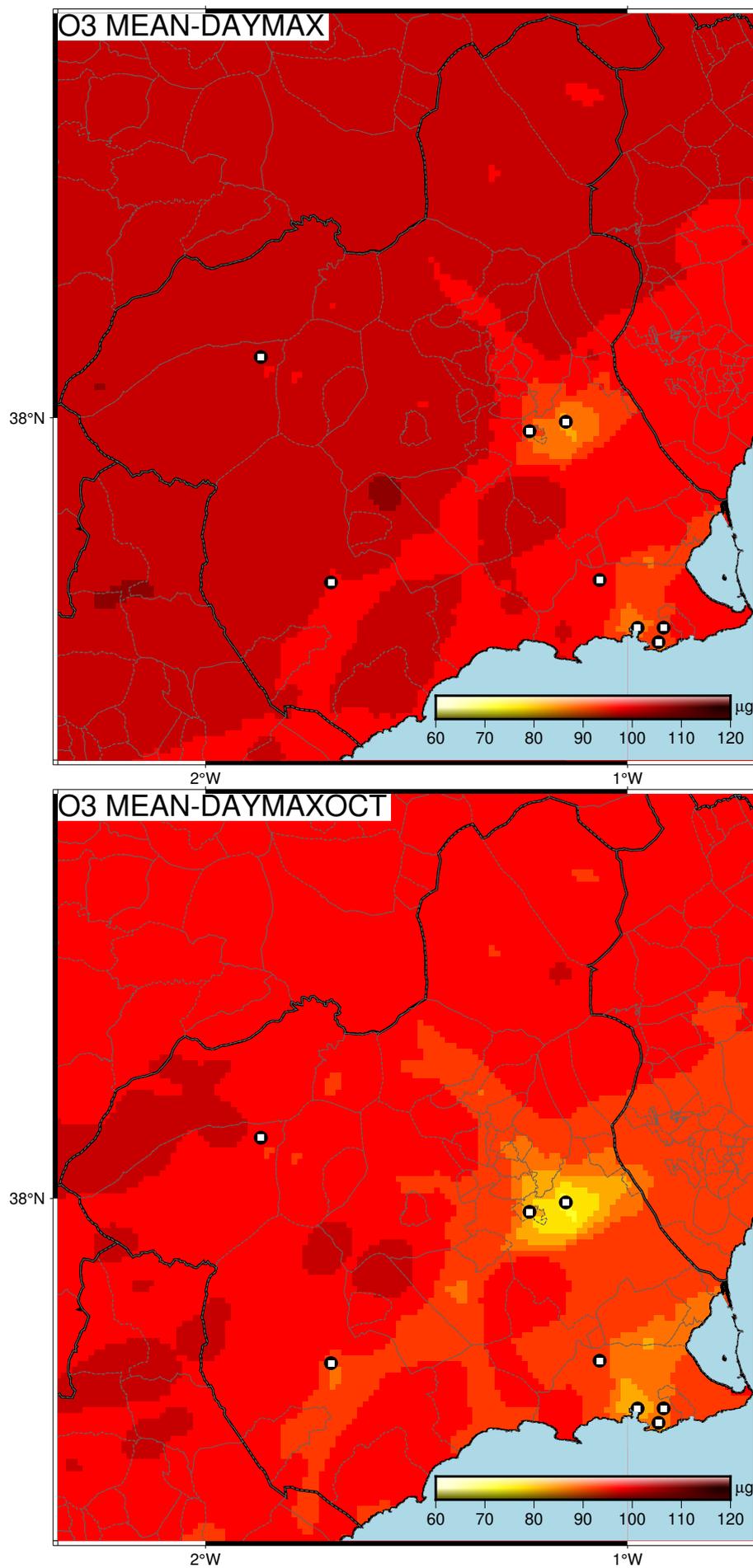


Figura 5.1: Promedio de las máximas diarias y de las máximas diarias octohorarias de Ozono.

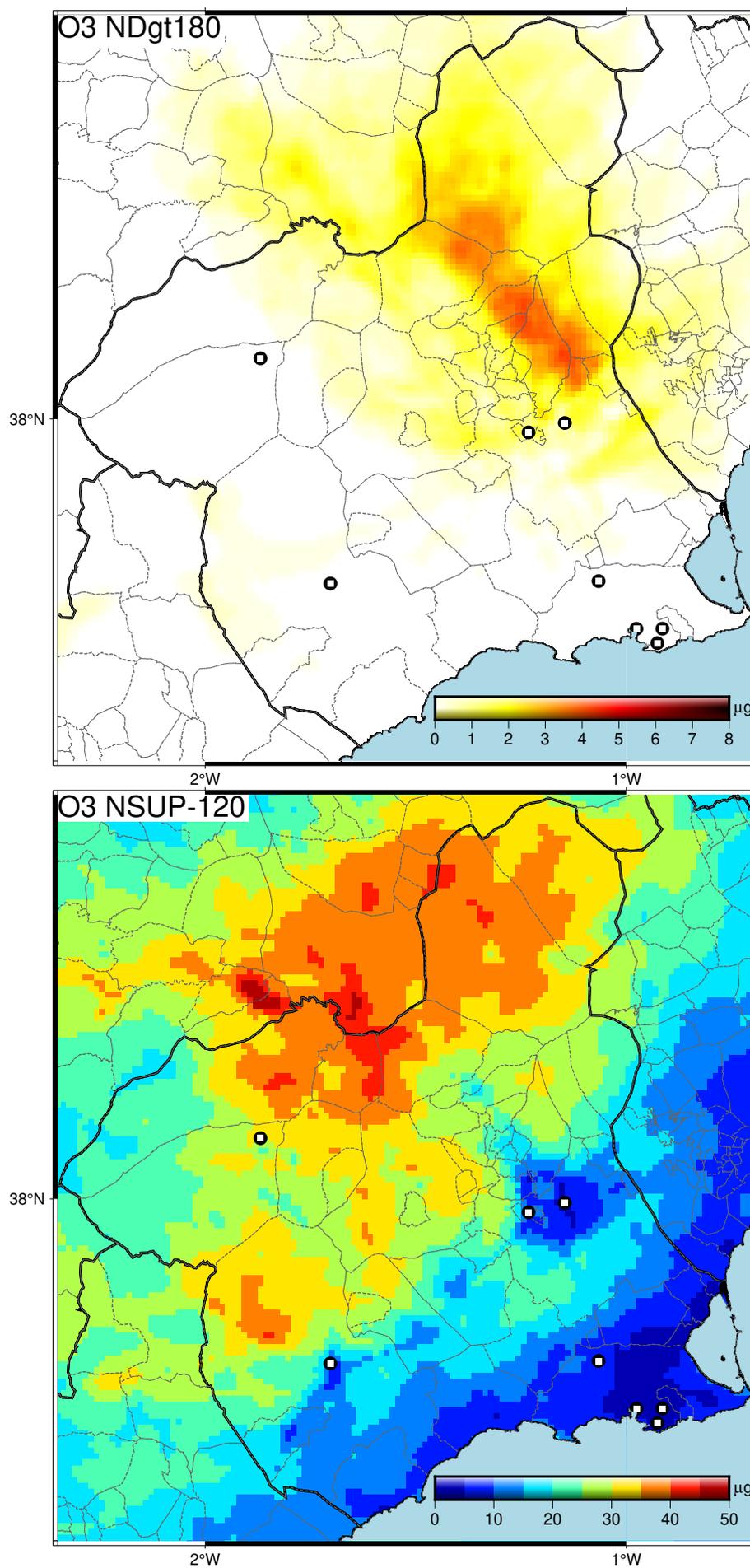


Figura 5.2: Número de superaciones anual del valor horario ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y del máximo diario octohorario ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

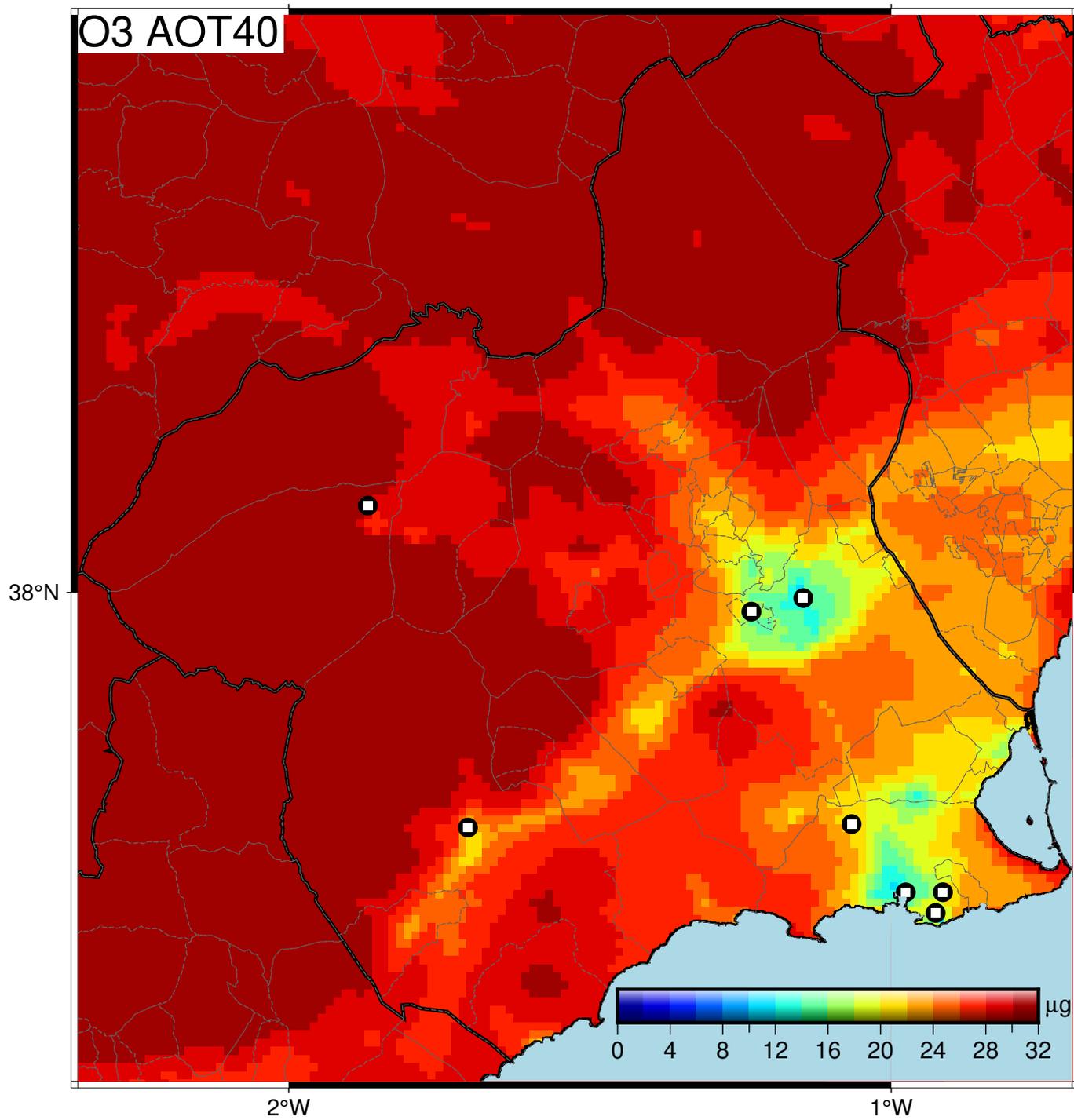


Figura 5.3: AOT40 en $\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h} \times 10^{-3}$

5.3 Zonificación

Tal y como se ha comentado en la sección de metodología, se presentan los resultados para el conjunto de agrupaciones que barre la combinación de la utilización de 6 a 16 PCs y 8 regiones para las series totales como las series pesadas por uso territorial y densidad de población utilizando dos métodos de clasificación distintos. El conjunto total de agrupaciones distintas ha sido 64.

Al igual que con el caso de los óxidos de nitrógeno, de nuevo aparecen regiones muy robustas comunes a todas las metodologías (Figuras 5.4 5.5). En este caso aparece 6 y 7 regiones, siendo 4 de ellas muy bien diferenciadas. El Noroeste, el Altiplano, Murcia y alrededores, y Cartagena y el Mar Menor. El cambio más importante introducido por las series poblacionales es la obtención de una región (R6) diferenciándose claramente de la región del Guadalentín (R4) y la agrupación de Molina de Segura en R8.

La figura 5.7 nos muestra las 7 regiones obtenidas y la figura 5.8 el porcentaje de veces asignadas. Su análisis nos muestra que regiones como el sur de Murcia, puede ser asignadas a otra región (a R6 en lugar de R1). Por otro lado municipios como Fortuna y Abanilla podrían agruparse a R8 sin perder coherencia.

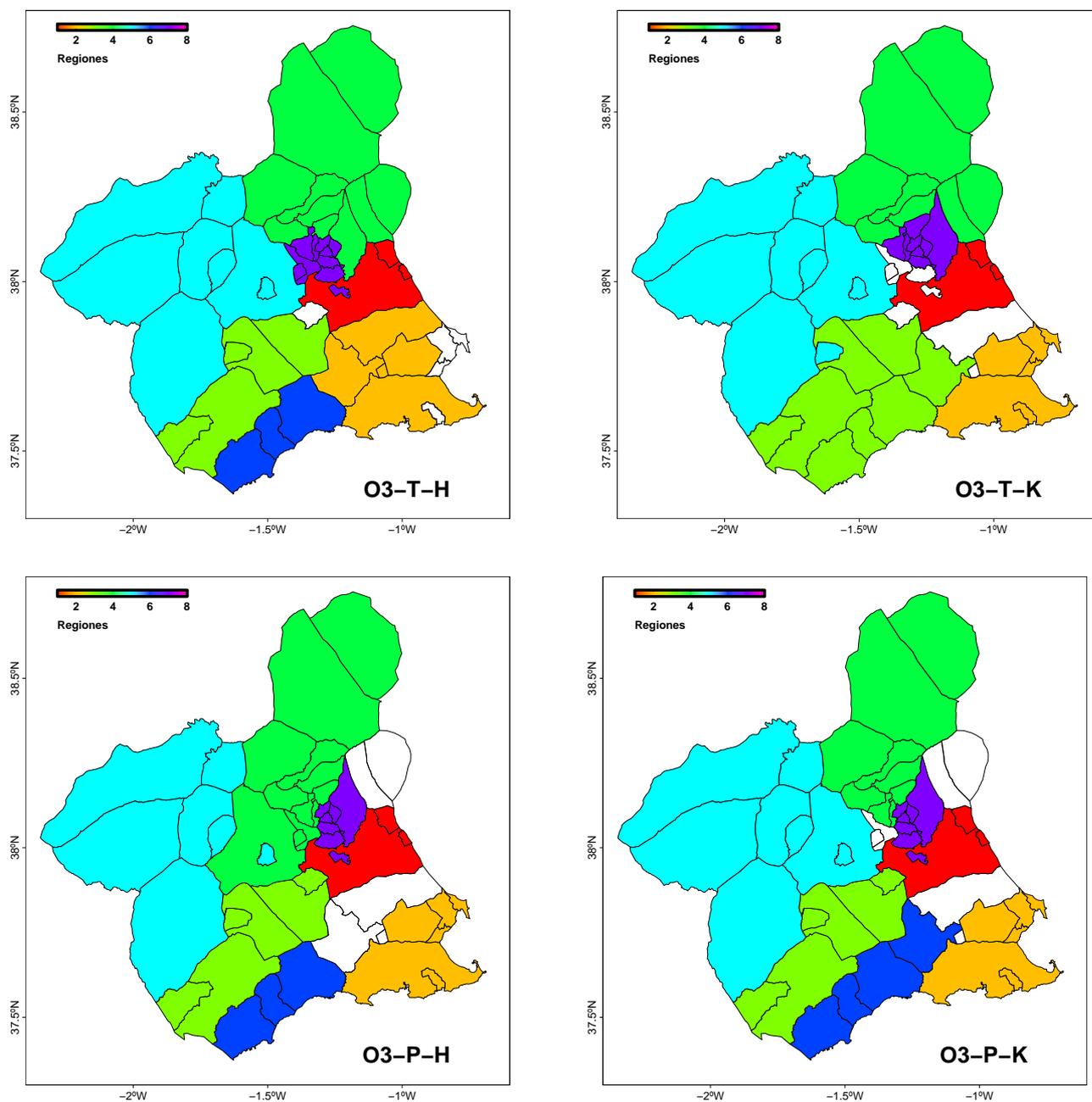


Figura 5.4: Clasificaciones parciales con ceros para el O_3 . En la fila superior encontramos las clasificaciones con las series municipales promedio (T), para un método jerárquico (H) (izda) y K-means (dcha) (K). En la fila inferior se representan los resultados usando las series municipales pesadas por población (P). A modo de ejemplo, el título interior O3-P-K significa análisis para el O_3 utilizando la serie poblacional y el algoritmo K-Means.

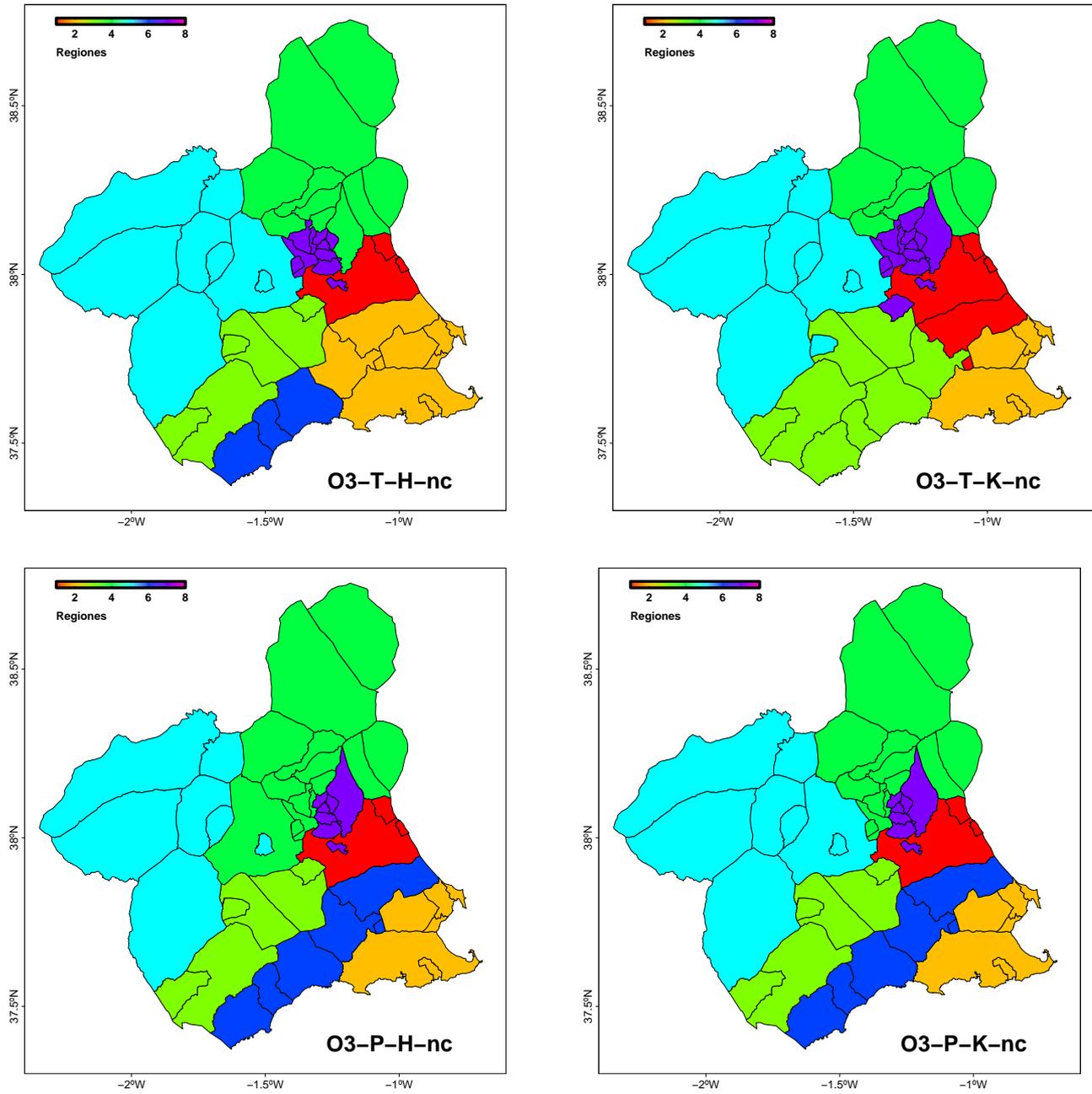


Figura 5.5: Igual que figura 5.4 pero usando la zona más repetida.

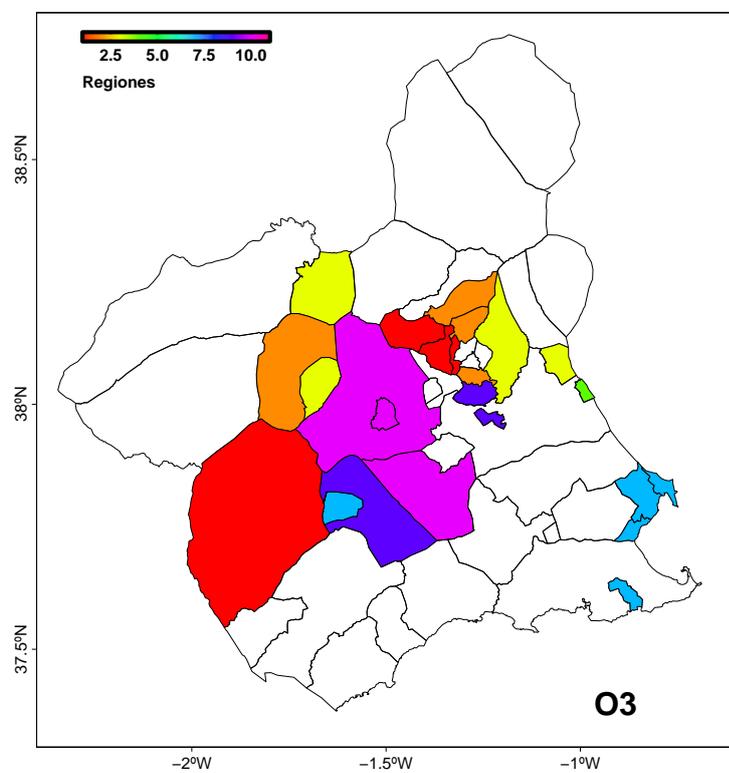
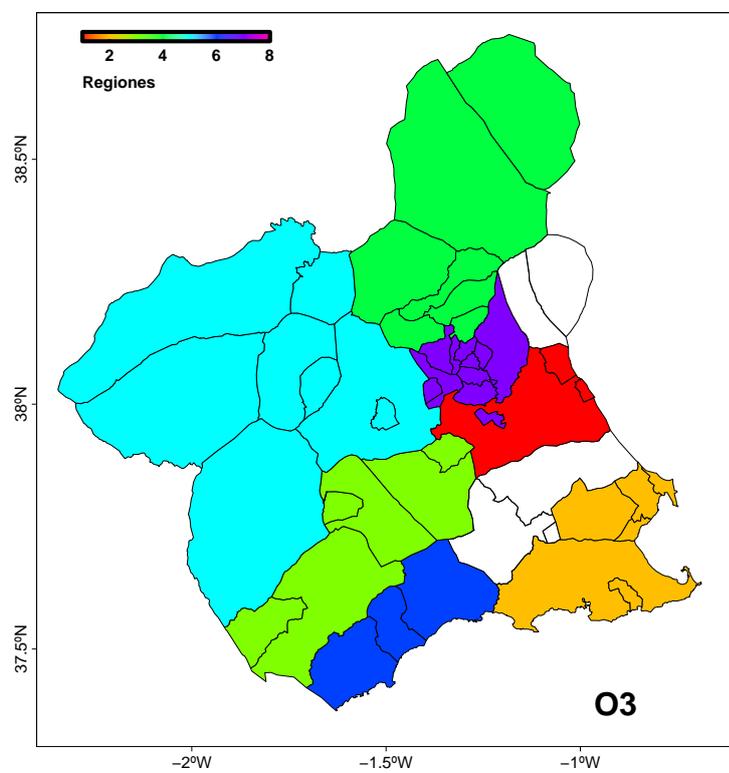


Figura 5.6: Clasificaciones finales con ceros para el O₃.

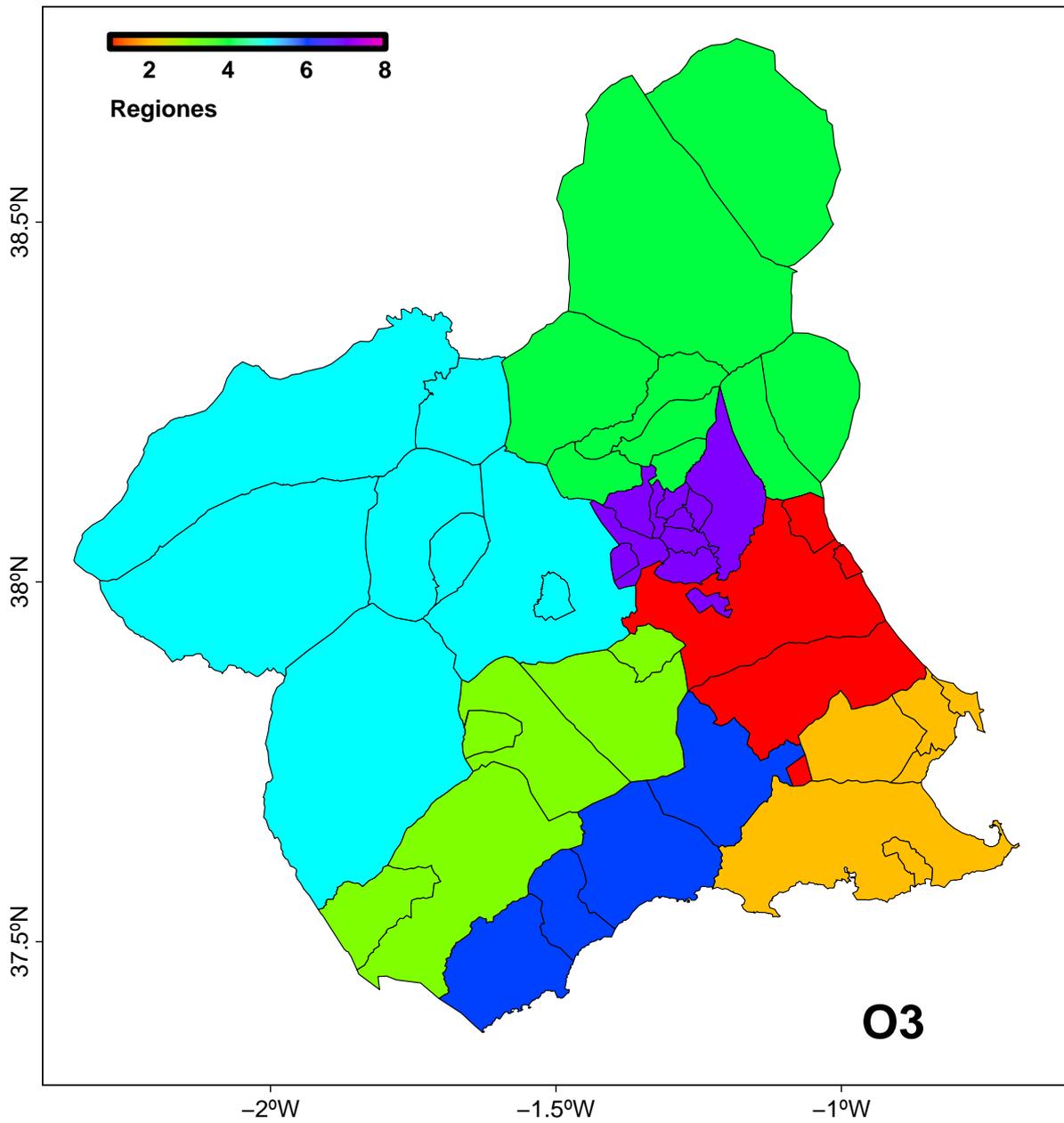


Figura 5.7: Clasificaciones final para el O_3 .

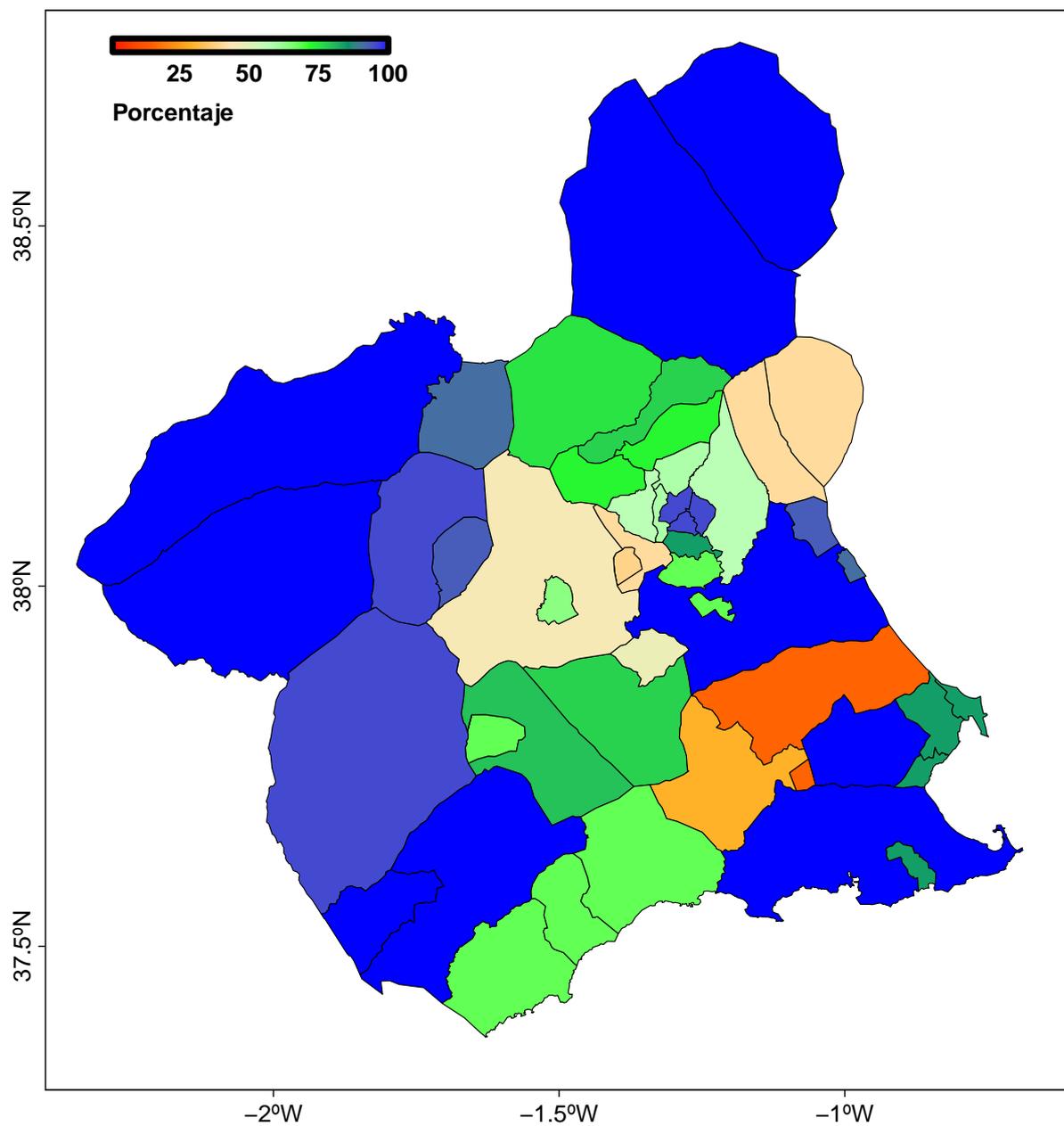


Figura 5.8: Porcentaje de coincidencias con la clasificación final de la figura 5.7 para el O₃.

Capítulo 6 — Resultados Material Particulado

Grupo G-MAR/UMU

6.1 Introducción

6.2 Climatologías y valores umbrales

En las tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 se representan los valores límites y umbrales para el material particulado, PM10 y PM2.5 expuestos en Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

Las figura 6.1 presenta los valores medios medios anuales para PM2.5 y PM10. Notemos que dichos valores son los correspondientes a las concentraciones de dicho material particulado de origen antrópico. Como se observa las concentraciones quedan por debajo de los valores umbrales en todos los casos. No obstante si representamos las concentraciones totales tanto de material de origen antrópico como natural, dichos valores se acercan al umbral de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en algunas zonas de la CARM, concretamente en el este del área metropolitana de Murcia. Notemos que las simulaciones empleadas no incluyen las incursiones de polvo sahariano. Su inclusión podría hacer que si se superaran estos valores.

Si analizamos los valores diarios. Los aerosoles de origen antrópico no superan nunca los umbrales. No obstante para el PMTotal si

se obtienen zonas donde el número de superaciones del valor $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sobrepasa el límite establecido (35). De nuevo el este del área metropolitana de Murcia se presenta como la zona más problemática. También cabe destacar la zona de Cartagena, pero el origen parece ser de origen natural (aerosol marino).

En cuanto a la capacidad del modelo para reproducir las observaciones, los valores medios los reproduce de manera satisfactoria, tanto en magnitud como en distribución espacial. Reconoce la estación SBA como la de mayor concentración media y la de Caravaca como la menor y el resto en medio. La única estación que parece estar infraestimada es ALJ. No obstante el número de superaciones es infravalorado. Por ejemplo en el caso de SBA, que presenta el mayor número de superaciones, el número medio diarias es de 75 mientras el modelo está entre 40 y 45. Caravaca presenta el menor número de superaciones (22), muy superior al obtenido por modelo (<5). Otras estaciones como Lorca presentan valores intermedios (53) pero de nuevo muy superiores a las obtenidos por el modelo (15-20). Estos resultados son esperables, ya que como se ha mencionado anteriormente el modelo no incluye el transporte de polvo sahariano, y la mayor parte de las superaciones se deben a episodios de intrusión de aire sahariano.

Período de Promedio	Valor Límite	Tol.
Valor límite diario (24 horas)	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año.	50
Valor límite anual (1 año civil)	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$	20

Cuadro 6.1: Valores límite de las partículas PM10 en condiciones ambientales para la protección de la salud

Parámetro	Umbral
Umbral de activación	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Umbral de información	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Umbral de alerta	$80 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Cuadro 6.2: Umbrales de activación, de información y de alerta para las partículas PM10

Período de Promedio	Valor
Valor objetivo anual (1 año civil)	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Valor límite anual (fase I) (1 año civil)	$25 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Valor límite anual (fase II) (1 año civil)	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Cuadro 6.3: Valores límite de las partículas PM2.5 en condiciones ambientales para la protección de la salud

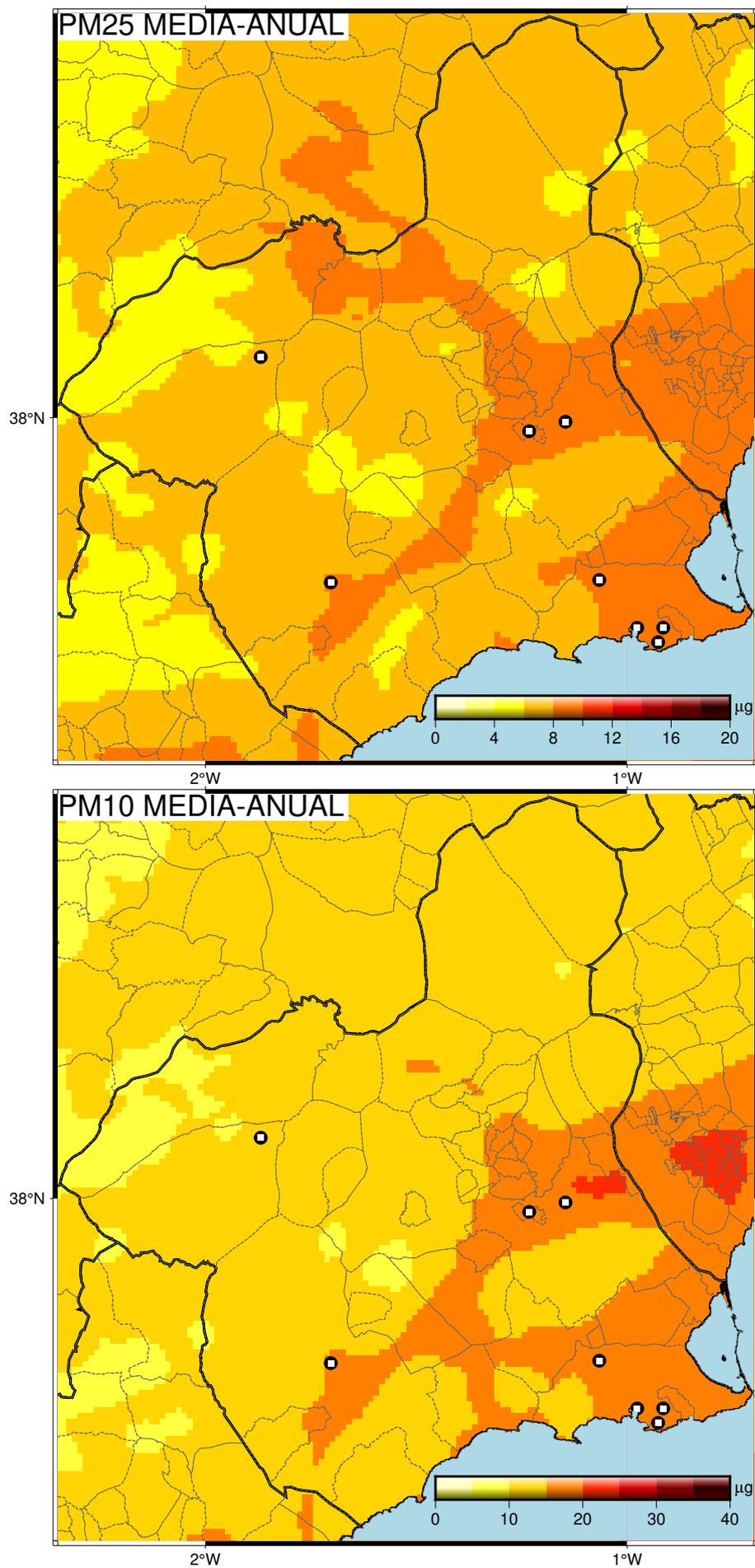


Figura 6.1: Valores medios anuales de PM25 (arriba) y PM10 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

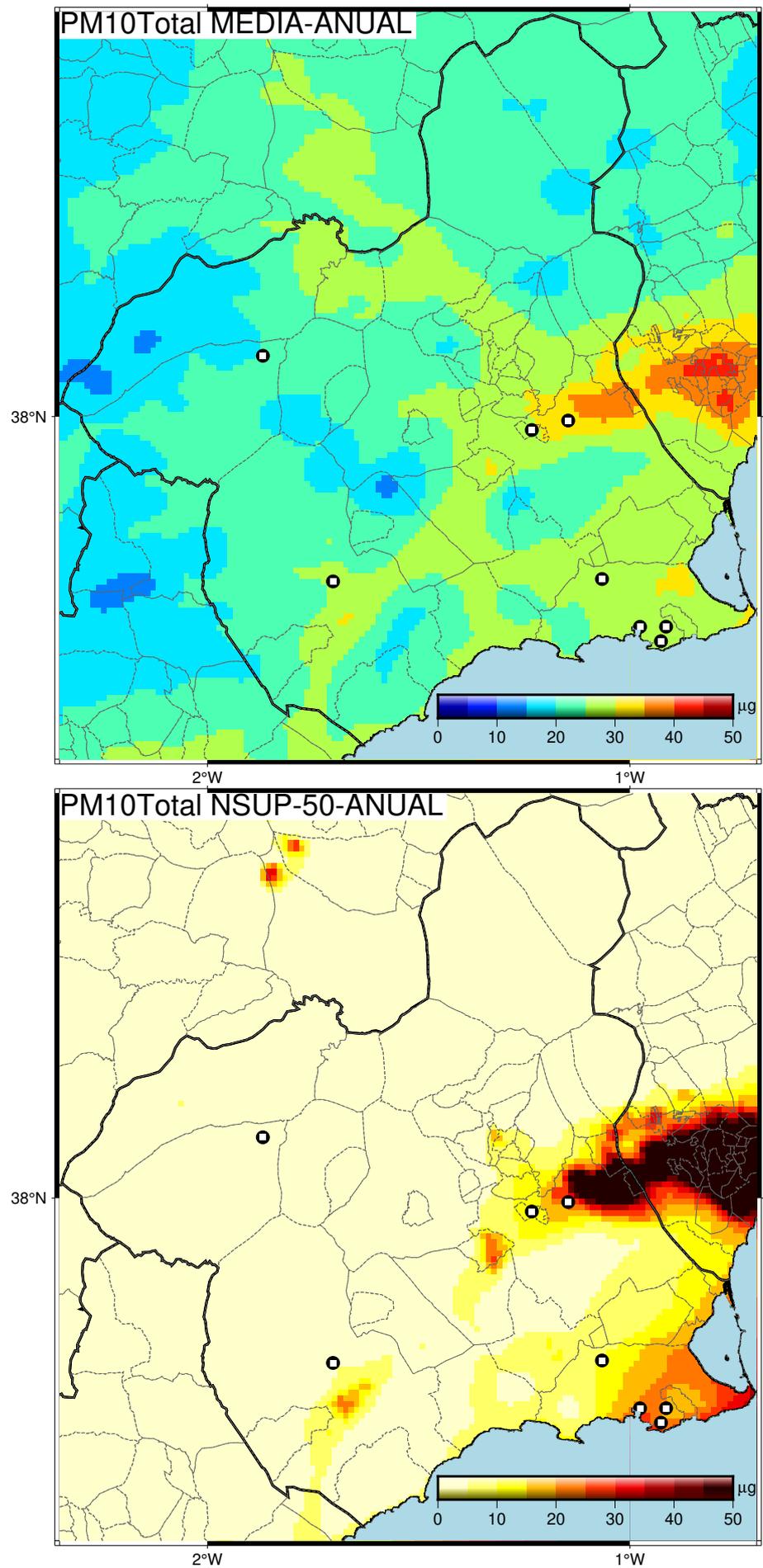


Figura 6.2: Valores medios anuales de PM10Total en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y número de días anual con valores sobre $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Parámetro	Umbral
Umbral de activación	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Umbral de información	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Umbral de alerta	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Cuadro 6.4: Umbrales de activación, de información y de alerta para las partículas PM_{2.4} para un promedio móvil de 24 horas.

6.3 Zonificación

La Zonificación se ha llevado a cabo de la misma manera que anteriormente. La zonificación se ha realizado tanto para PM₂₅ como PM₁₀.

Para el PM_{2.5} se obtienen 7 regiones bien diferenciadas (figura 6.6) No obstante la clasificación presenta bastante variabilidad respecto a la metodología empleada. Llama la atención la variabilidad en el agrupamiento de la región 1, que contiene al municipio de Murcia, así como la variabilidad de la región 8 (central). Sin embargo cuando se ponen todas las clasificaciones juntas se obtiene regiones muy coherentes (figura 6.6) donde tan solo los municipios de Mula y Calasparra presenta porcentajes de asignación muy bajos, y los los municipios de Alhama, Librilla, Fortuna y Abanilla con valores en torno al 50% (figura 6.7).

En el caso del PM₁₀ aparecen solo 6 regiones (figura 6.11). En este caso los municipios con menor porcentaje de afinidad a las regiones asignadas son Mula, Campos de Río, Albaudete y Alhama, así como la franja que va desde Águilas a Murcia Sur.

Finalmente para el PM₁₀Total, los resultados son intermedios (figura 6.13 y 6.14) introduciendo un region más que PM₁₀ que va desde Murcia Sur a Mazarrón, casi coincidente con la region 8 de PM_{2.5}. Los municipios con menor porcentaje de asignación vuelven a ser los mismos.

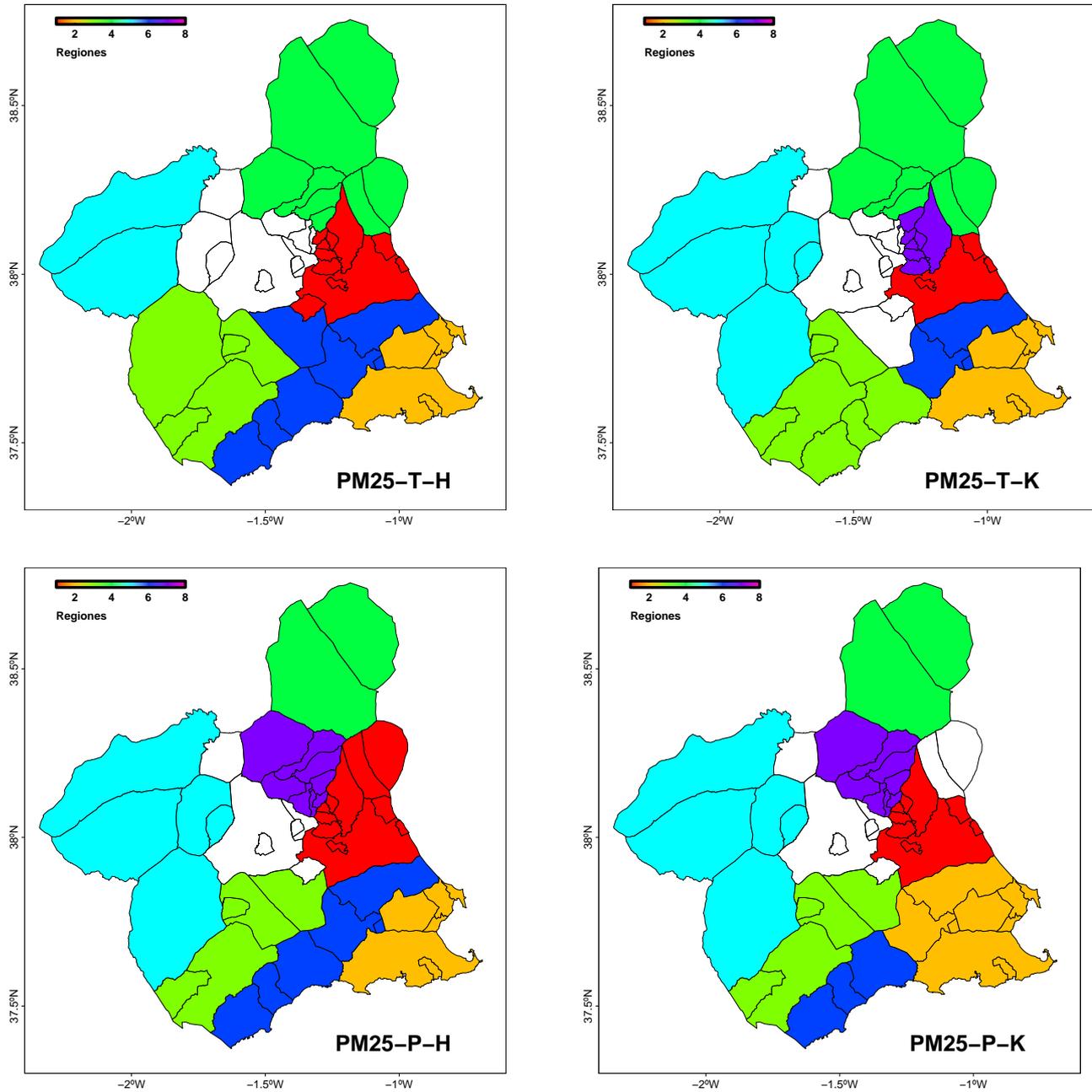


Figura 6.3: Clasificaciones parciales con ceros para el PM2.5. En la fila superior encontramos las clasificaciones con las series municipales promedio, para un método jerárquico (izda) y K-means (dcha). En la fila inferior se representan los resultados usando las series municipales pesadas por población. A modo de ejemplo, el título interior PM25-P-K significa análisis para el PM25 utilizando la serie poblacional y el algoritmo K-Means.

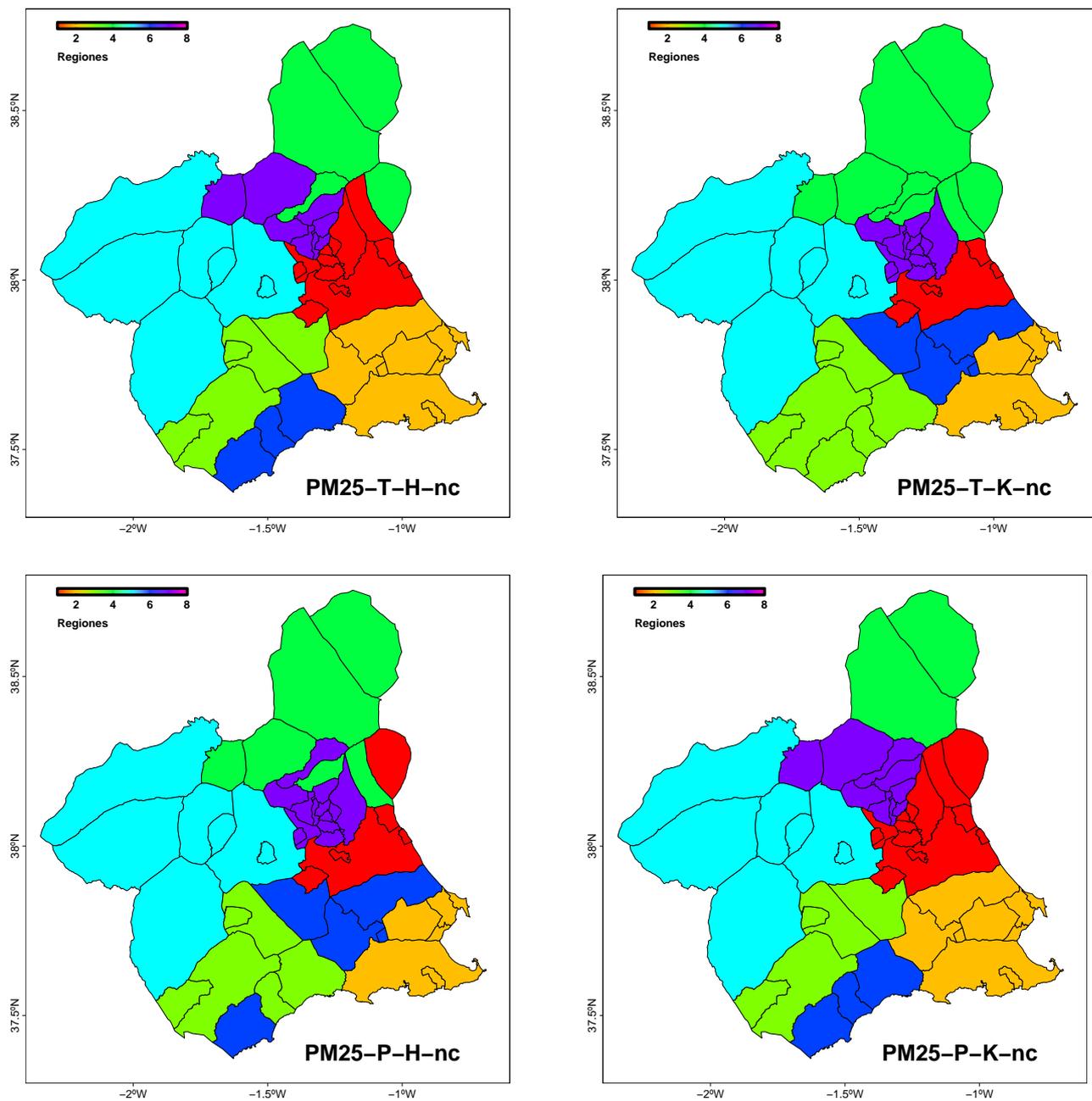


Figura 6.4: Igual que figura 6.3 pero usando la zona más repetida

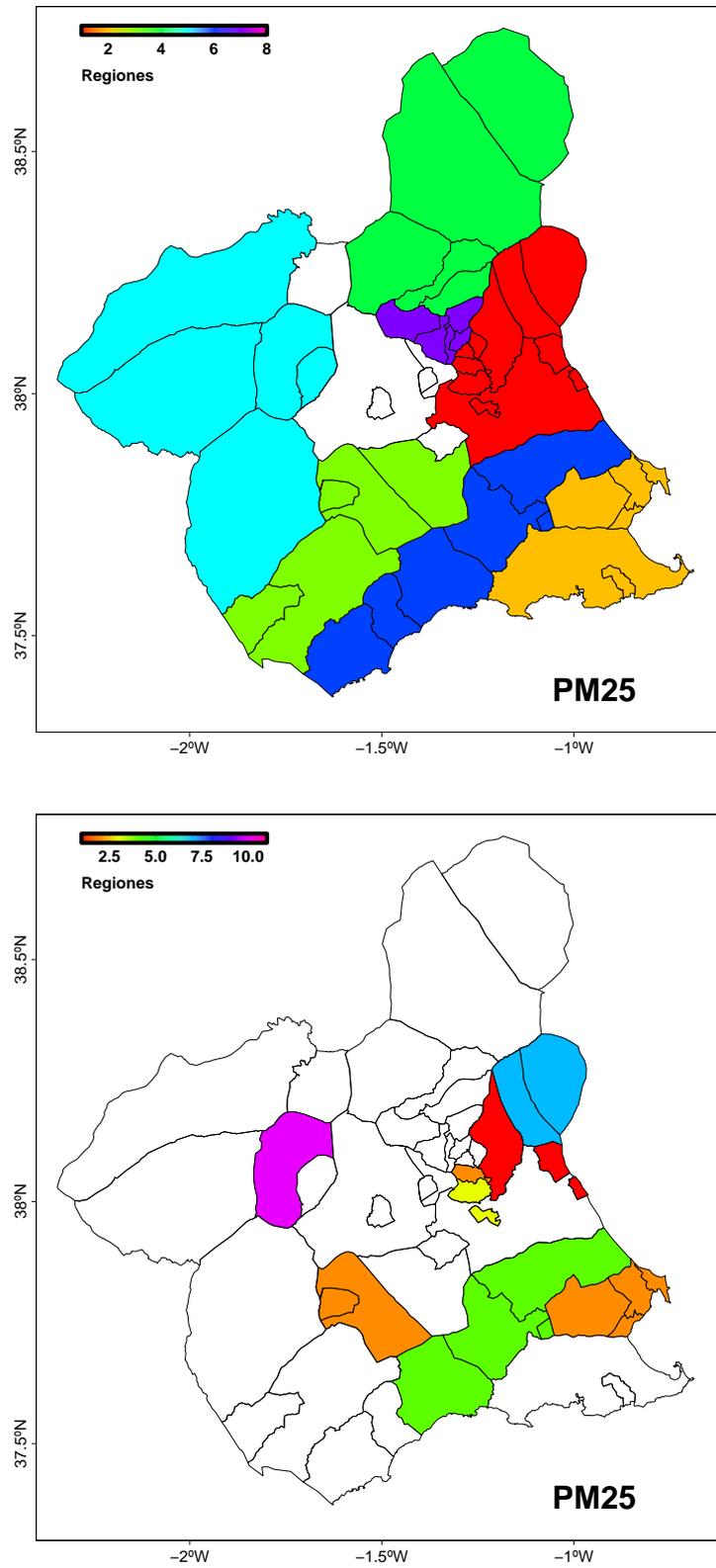


Figura 6.5: Clasificaciones finales con ceros para el PM2.5.

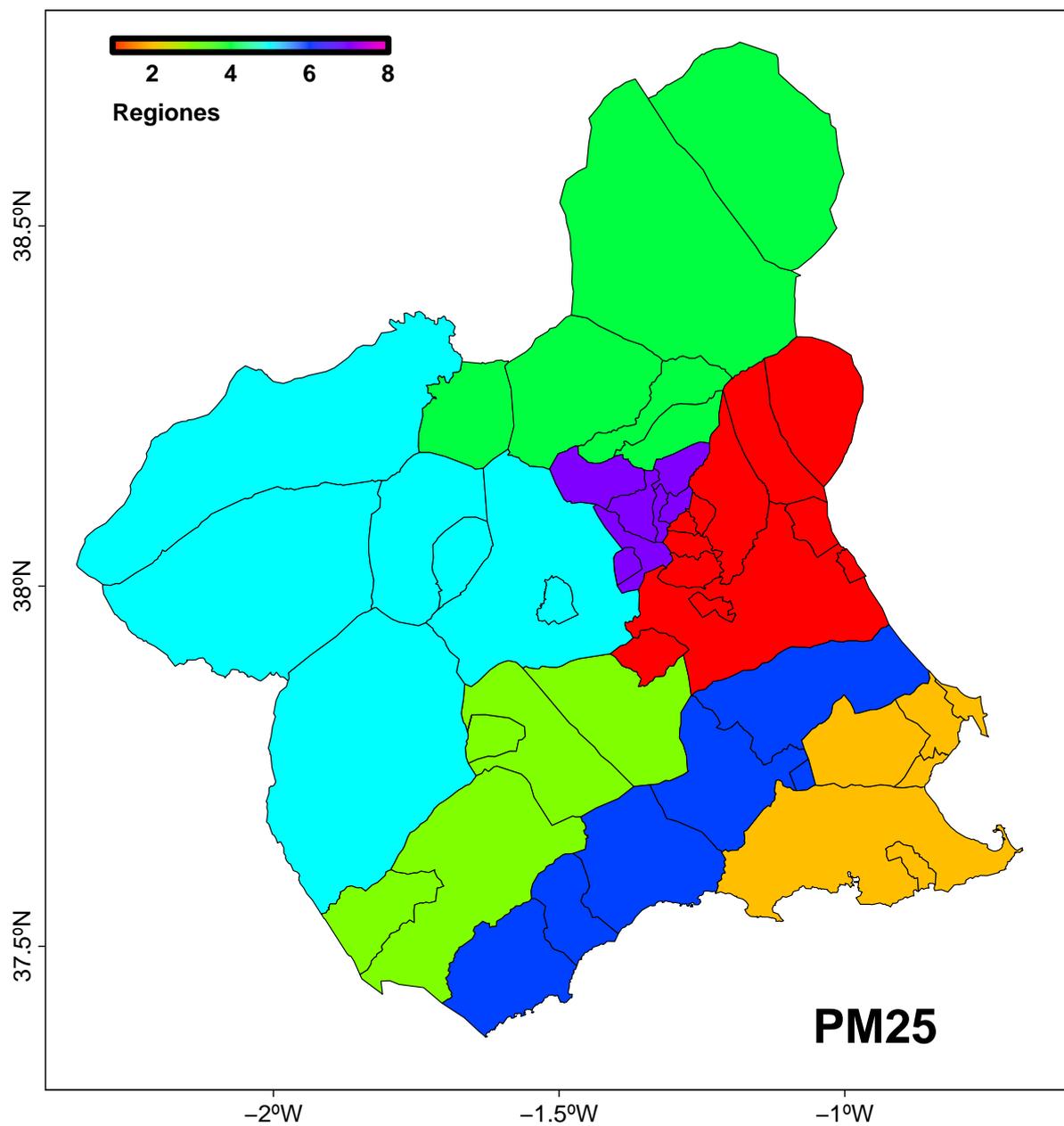


Figura 6.6: Clasificaciones final para el PM2.5.

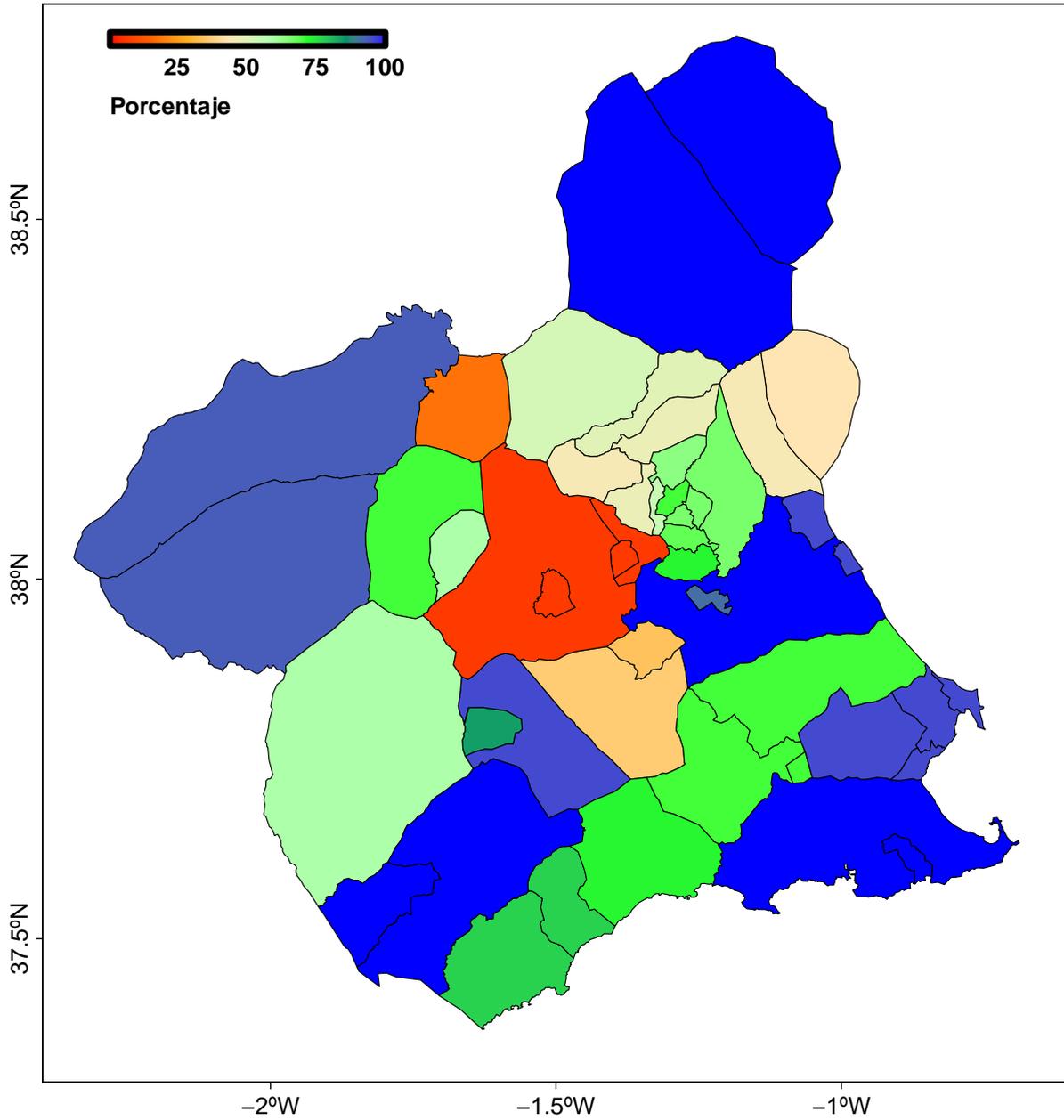


Figura 6.7: Porcentaje de coincidencias con la clasificación final de la figura 6.6 para el PM2.5.

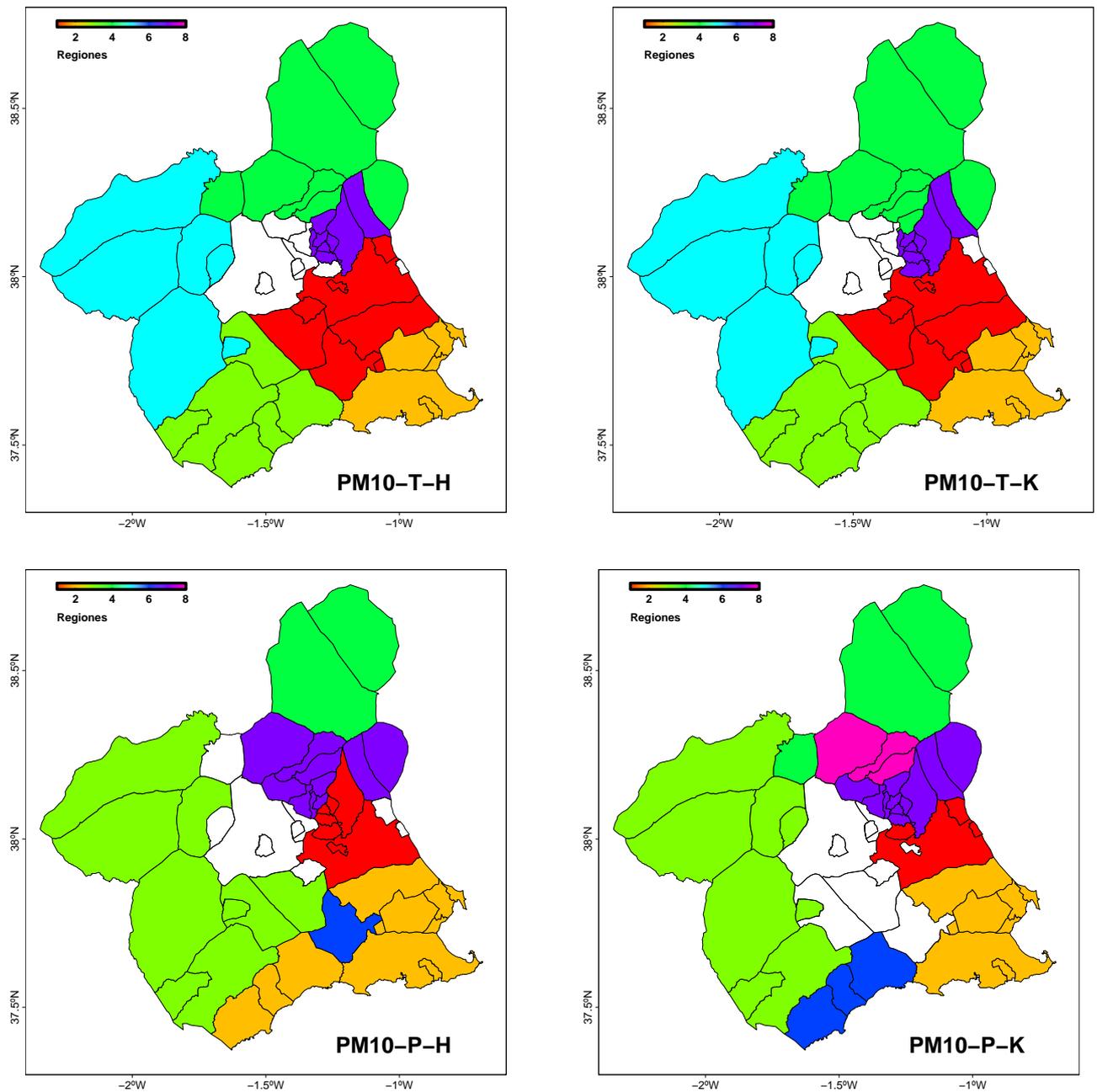


Figura 6.8: Clasificaciones parciales con ceros para el PM10. En la fila superior encontramos las clasificaciones con las series municipales promedio (T), para un método jerárquico (H) (izda) y K-means (dcha) (K). En la fila inferior se representan los resultados usando las series municipales pesadas por población (P). A modo de ejemplo, el título interior PM10-P-K significa análisis para el PM10 utilizando la serie poblacional y el algoritmo K-Means.

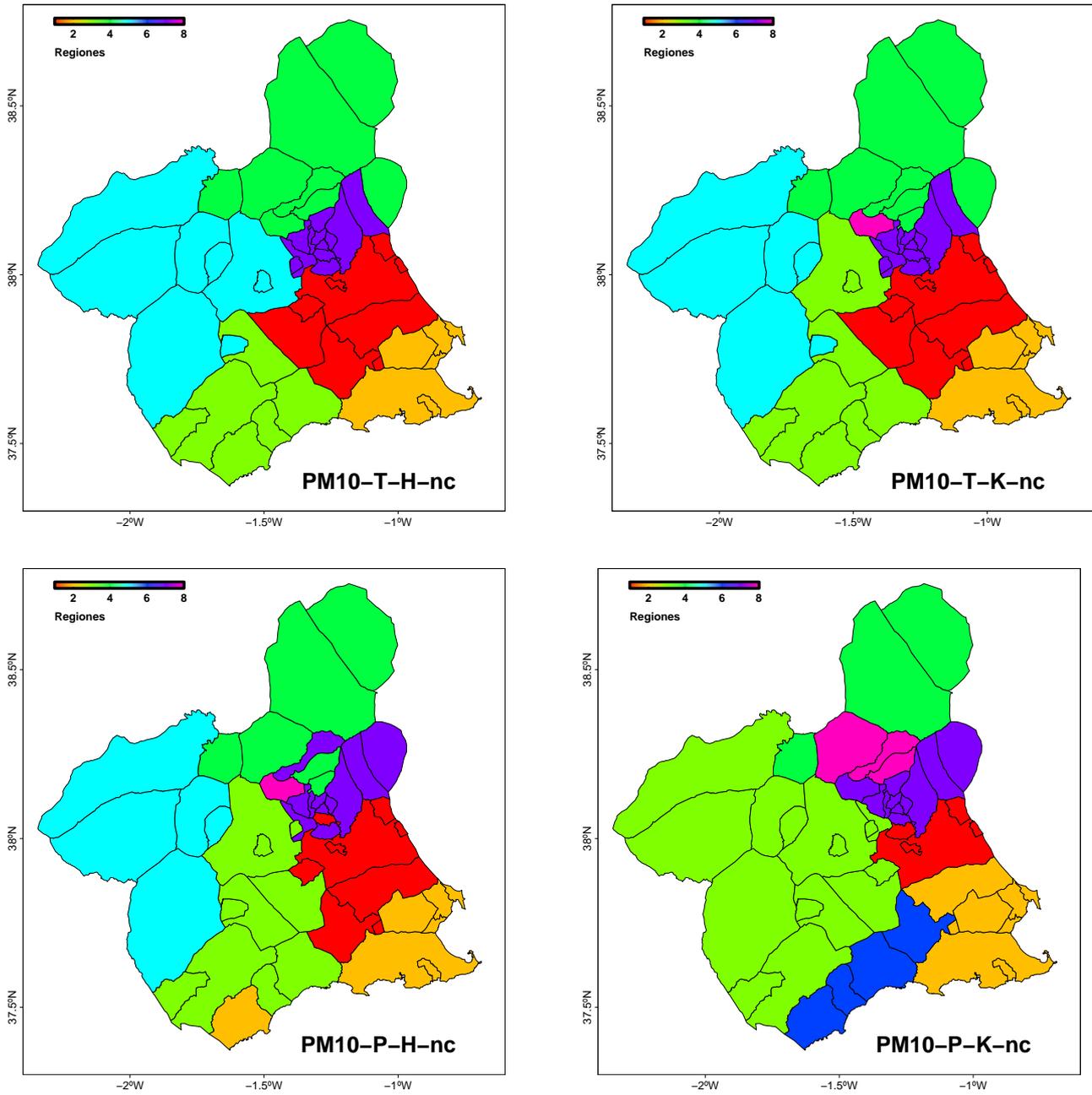


Figura 6.9: Igual que figura 6.8 pero usando la zona más repetida

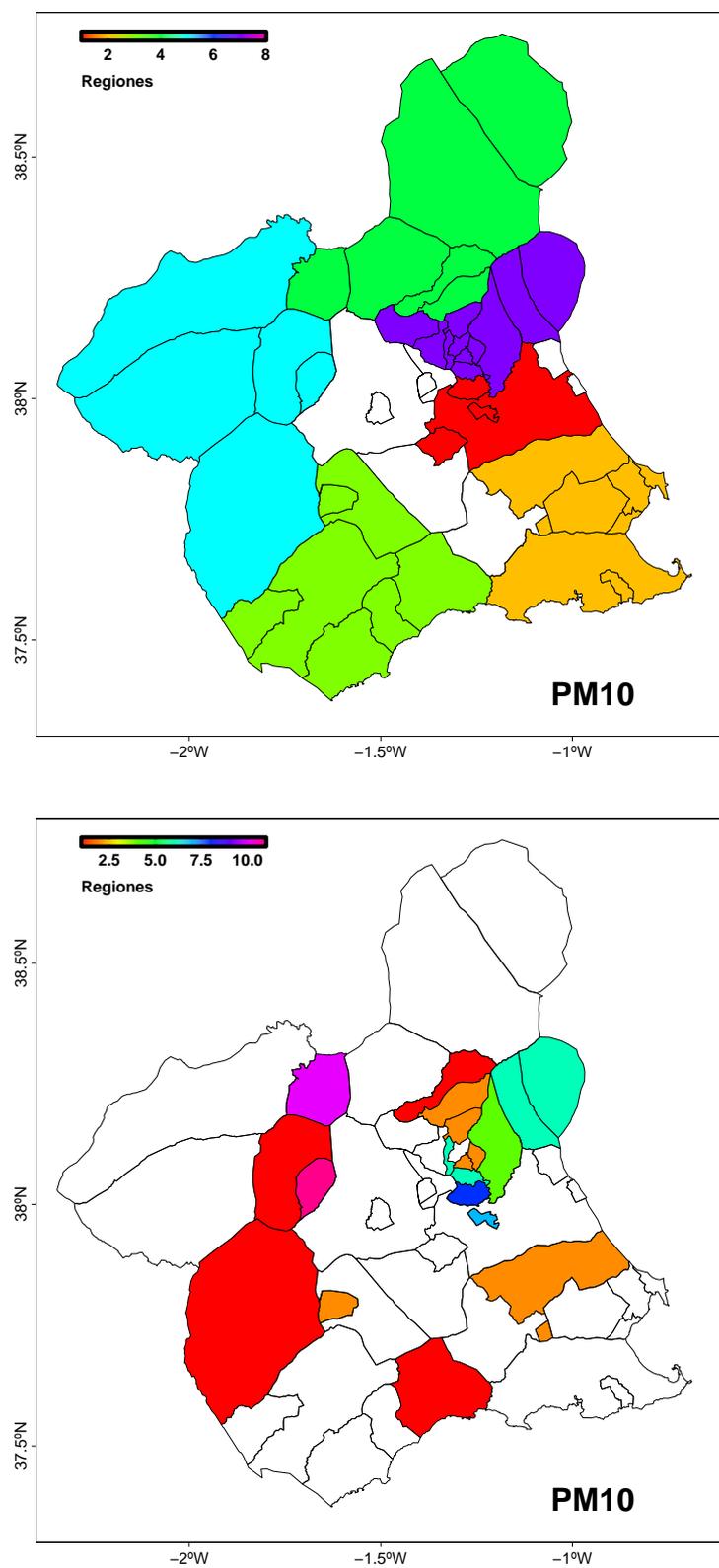


Figura 6.10: Clasificaciones finales con ceros para el PM10.

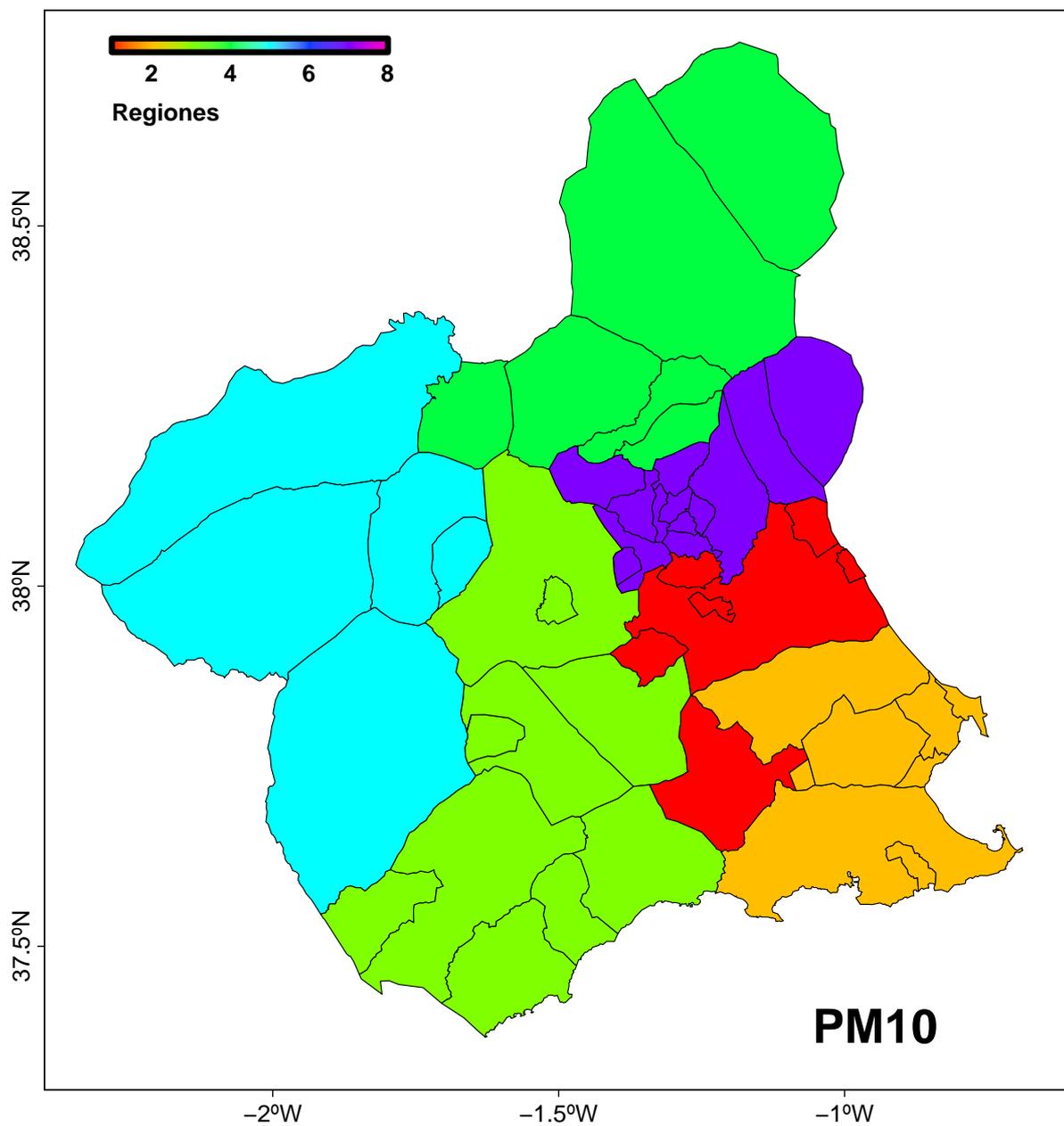


Figura 6.11: Clasificaciones final para el PM10.

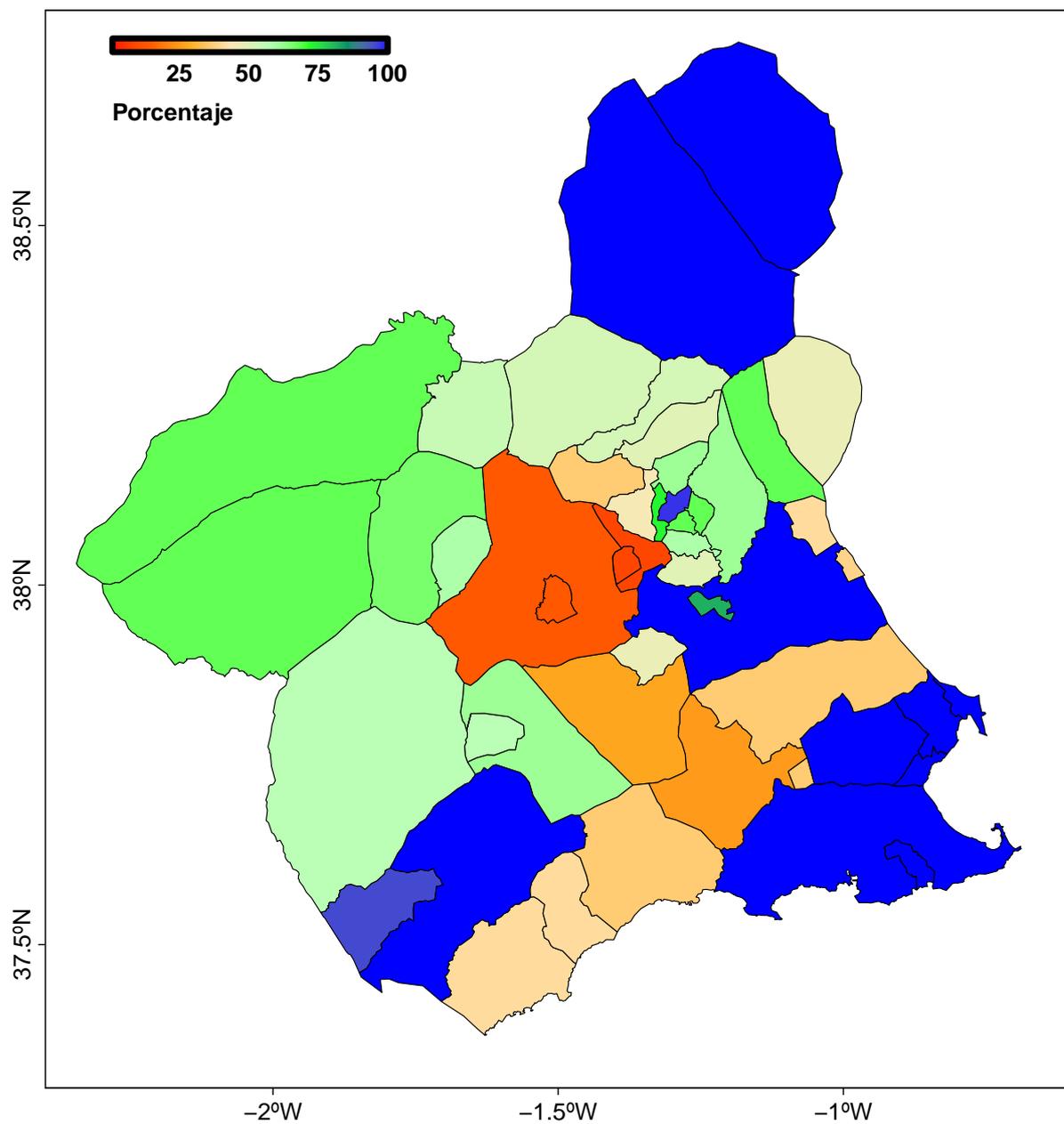


Figura 6.12: Porcentaje de coincidencias con la clasificación final de la figura 6.11 para el PM10.

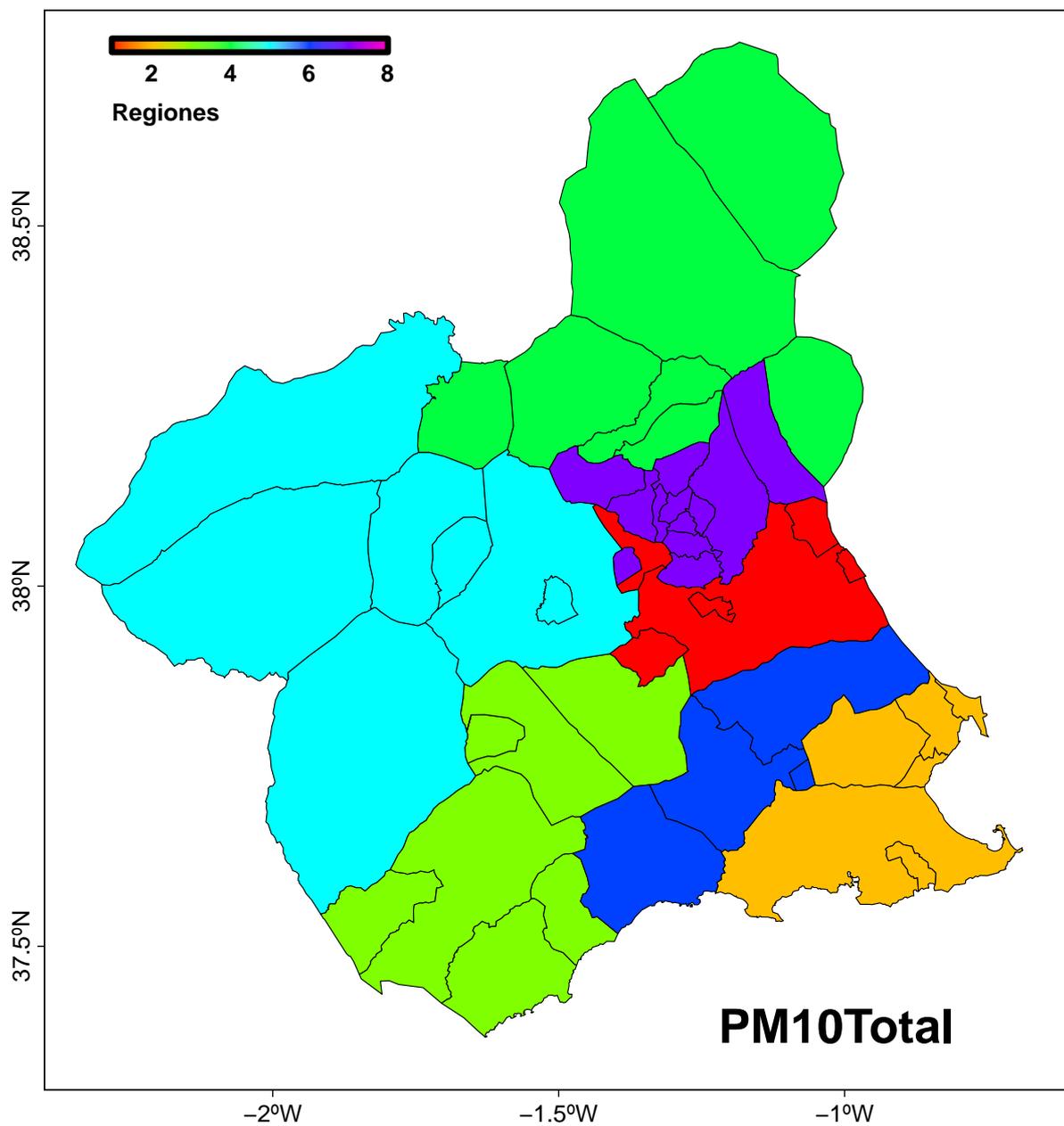


Figura 6.13: Clasificaciones final para el PM10.

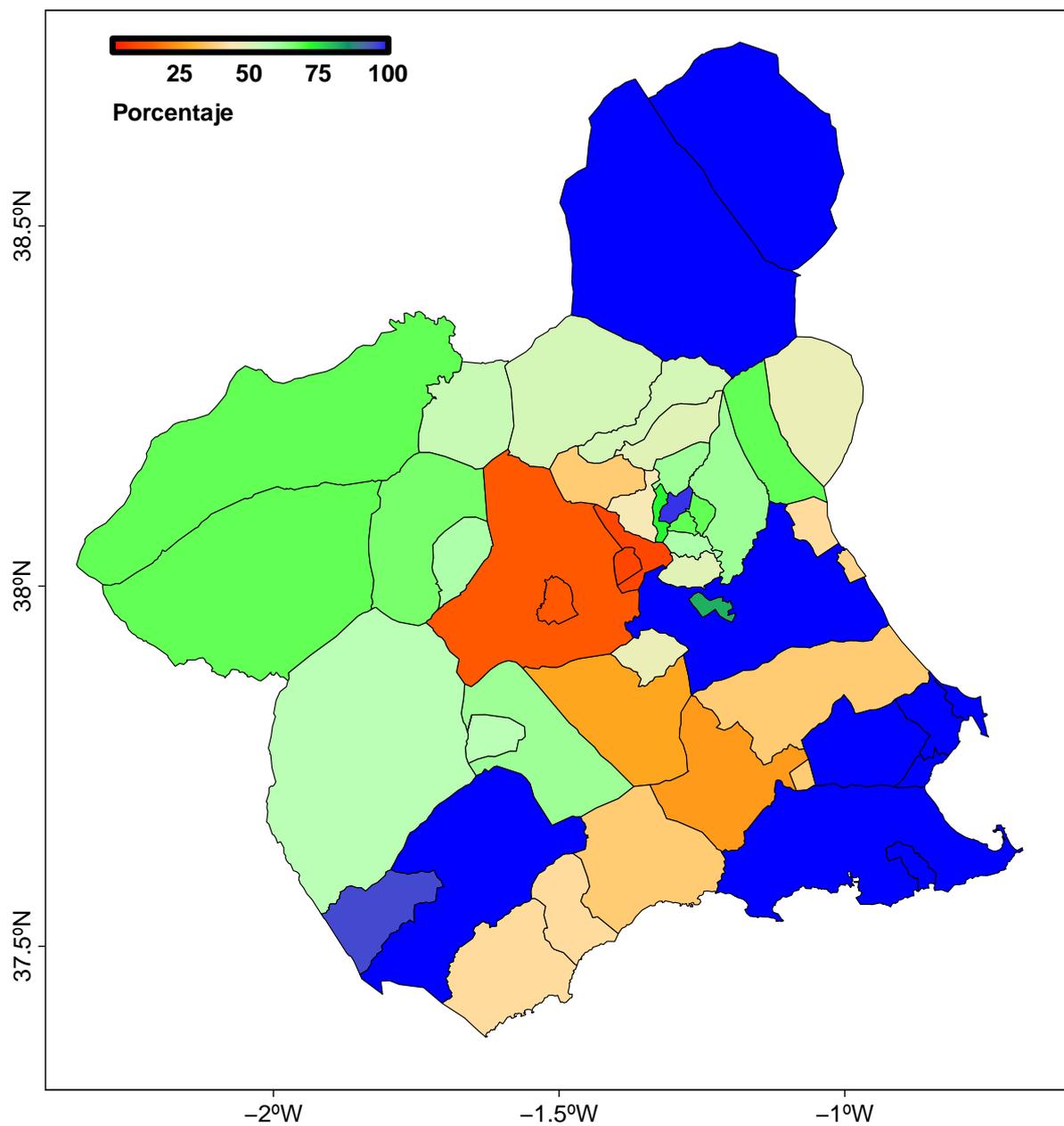


Figura 6.14: Porcentaje de coincidencias con la clasificación final de la figura 6.13 para el PM10.

Capítulo 7 — CO y SO₂

Grupo G-MAR/UMU

7.1 Introducción

El dióxido de azufre (SO₂) se origina principalmente a partir la quema de combustibles fósiles, en determinadas actividades industriales y generación de energía (centrales térmicas). Hay otras fuentes naturales de generación como las erupciones volcánicas, y la descomposición de sustancias orgánicas.

Tiene una serie de efectos perjudiciales en la salud humana y en el medio ambiente.

Los impactos sobre la salud humana son fundamentalmente Irritación respiratoria que se manifiesta en síntomas como tos, dificultad para respirar, garganta irritada y congestión nasal. Las personas con problemas respiratorios preexistentes, como el asma, son especialmente sensibles a estos efectos. También contribuye a agravar enfermedades respiratorias crónicas, como el asma y la bronquitis, lo que puede resultar en ataques más frecuentes y graves. A largo plazo puede contribuir al desarrollo de enfermedades pulmonares crónicas y a una disminución de la función pulmonar.

Los daños sobre el crecimiento de vegetación, principalmente por deposición pueden ser notables, o a través de la formación de lluvia ácida, que además puede dañar edificios, ecosistemas acuáticos, etc. A gran escala puede tener implicaciones sobre el cambio climático.

El contenido de monóxido de carbono (CO) en la atmósfera se debe a principalmente a procesos de combustión tales como combustibles fósiles y biomasa. La combustión incompleta es su principal causa de formación, y se debe a tener insuficiente oxígeno presente para que se produzca una combustión completa. Las principales fuentes emisoras son: vehículos, combustión de biomasa en chimeneas y quemas de agrícolas o incendios forestales, algunos procesos industriales

Los efectos sobre la salud humana pueden ser notables. El envenenamiento por monóxido de carbono puede producir desde dolor de cabeza, mareos, debilidad, náuseas, confusión y, en casos graves, pérdida del conocimiento e incluso la muerte. A largo plazo puede producir mayor susceptibilidad a enfermedades cardíacas y problemas neurológicos así como dificultades cognitivas

El valor límite impuesto por de 10mg para las máxima diaria de las medias móviles octohorarias.

7.2 Climatologías y valores umbrales

Período de Promedio	Valor Límite	Margen de Tolerancia
Valor límite horario	1 hora	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO ₂ que no podrán superarse en más de 24 ocasiones por año civil.
Valor límite diario	1 día	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO ₂ que no podrán superarse más de 125
Nivel crítico (invierno extendido)	1 año	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Cuadro 7.1: Valores límite del dióxido de azufre.

Parámetro	Período de Promedio	Umbral
Umbral de activación	Promedio horario (1)	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Umbral de información	Promedio horario (2)	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Umbral de alerta	Promedio horario	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Cuadro 7.2: Umbrales de activación, de información y de alerta para el dióxido de azufre

Para el caso de las estaciones de medida de la CARM solo se encuentran superaciones de los límites horarios en las estaciones de escombreras un año con más de 24 superaciones del límite horario. En cuanto al límite diario, no se observa ningún año con más de 2

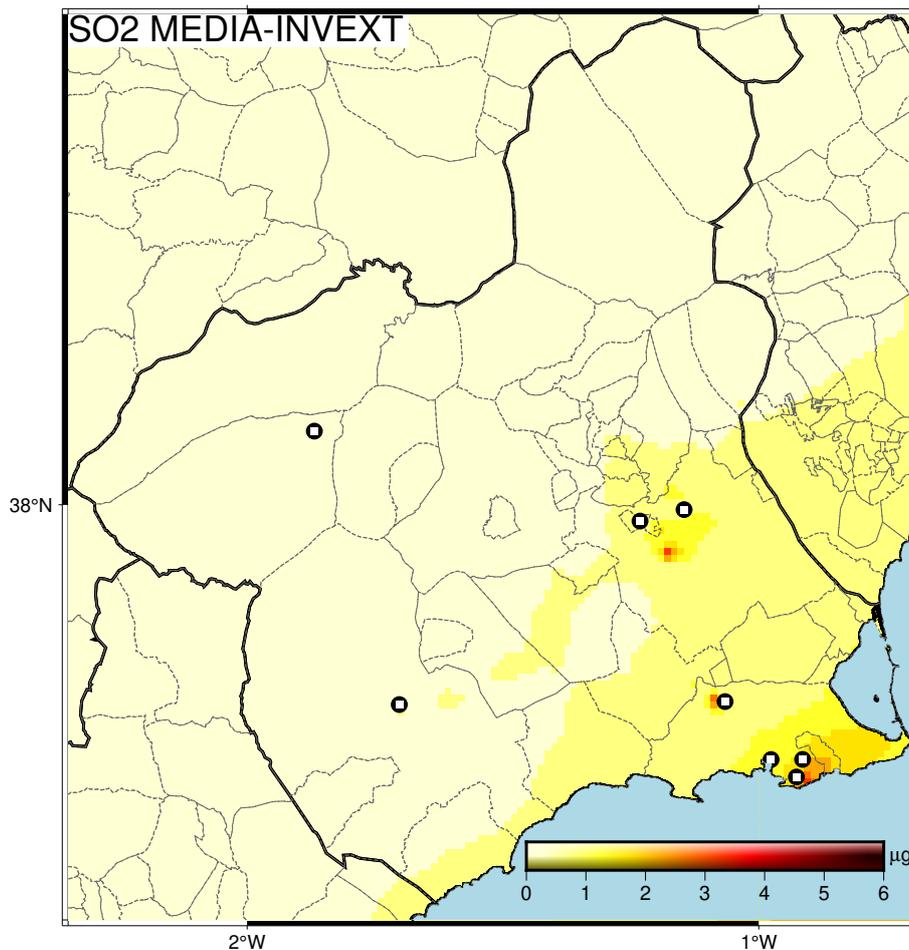


Figura 7.1: Valores medios anuales de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de SO_2

superaciones. En cuanto a los valores anuales para invierno extendido (de octubre a marzo) la estación de Alumbres es la que presenta un mayor valor, $12,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seguida por Escombreras con $11,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El resto de las estaciones presentan valores muy inferiores.

En el caso del modelo los valores medios anuales son inferiores a los observados (ver figura 7.1)

No se obtiene ninguna superación de los umbrales. Este resultado se explica por como el modelo simula las emisiones. Aunque la carga anual sea similar, ésta se reparte de manera más o menos equitativa a lo largo de año. Mientras que en las emisiones reales, en este caso, hay una variabilidad temporal enorme en las emisiones.

7.3 Zonificación del CO y el SO₂

Como ya hemos notado la concentraciones de SO₂ solo son importantes en zonas muy concretas del sur de la región, más concretamente en torno al valle de escombreras y la zona de la Aljorra. Esto se hace patente en el cálculo de su zonificación pues con cuatro regiones puede caracterizarse de manera razonable la variación temporal significativa de dicho contaminante (figura 7.2). Incluso si se analizan las regiones por separado las regiones alejadas no presentan coherencia. Por otro lado, la zona mencionada, puede presentar también concentraciones importantes de otros contaminantes. Esta zona además posee unas características orográficas muy peculiares que hacen que su comportamiento pueda ser muy diferencial del resto. Es por ello que se propondrá que ese área sea considerada como una región especial en la zonificación final que se proponga, tal y como se ha llevado a cabo en zonificaciones anteriores.

En el caso del CO, la zonificación presenta 5 zonas (ver figura 7.3), donde se diferencia claramente, Murcia Norte (1), Noroeste y Altiplano (4), vega media del Segura(7) , el campo de Cartagena y mar menor (2), y una gran zona central y sur (3).

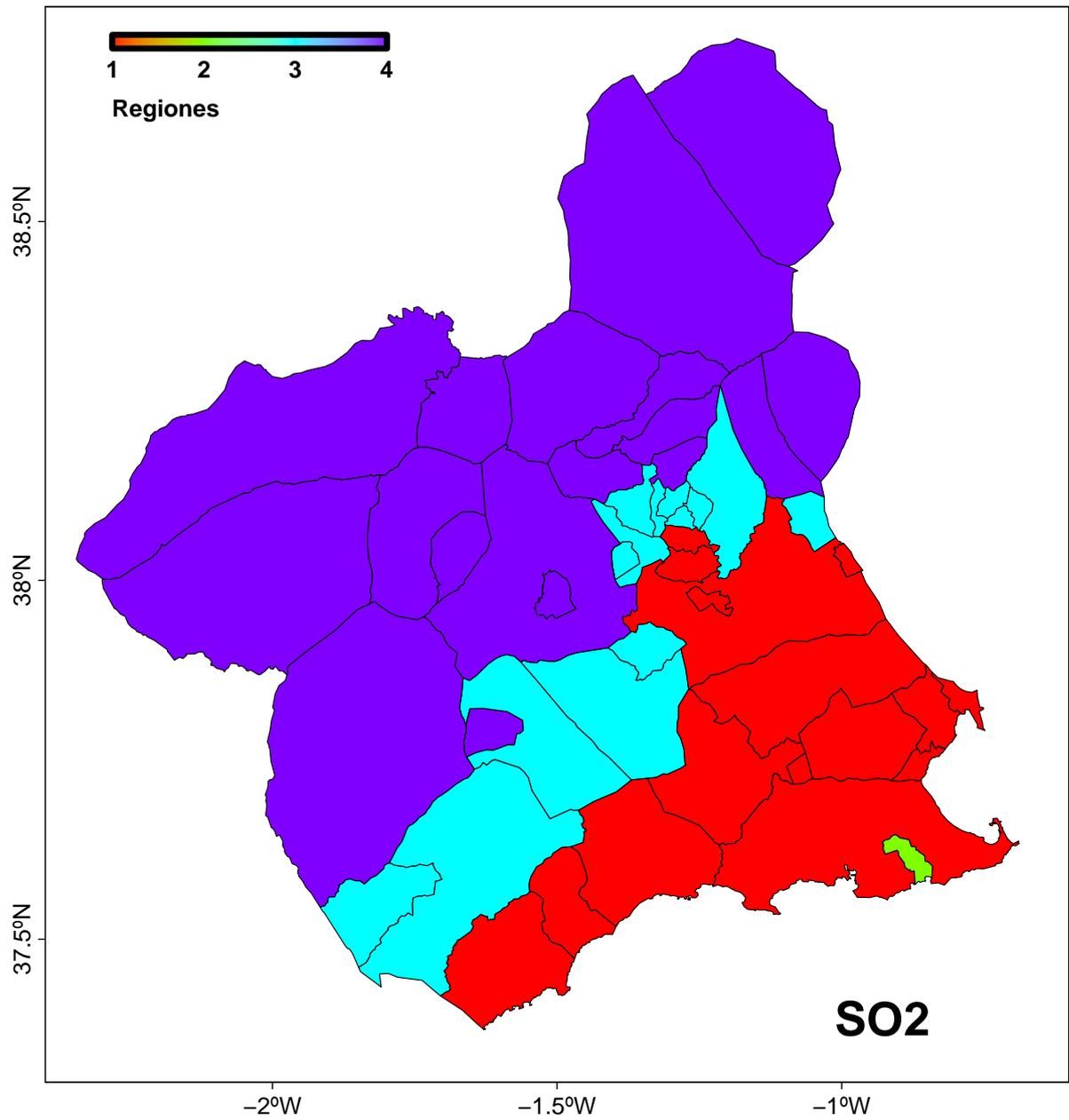


Figura 7.2: Clasificación final para el SO₂.

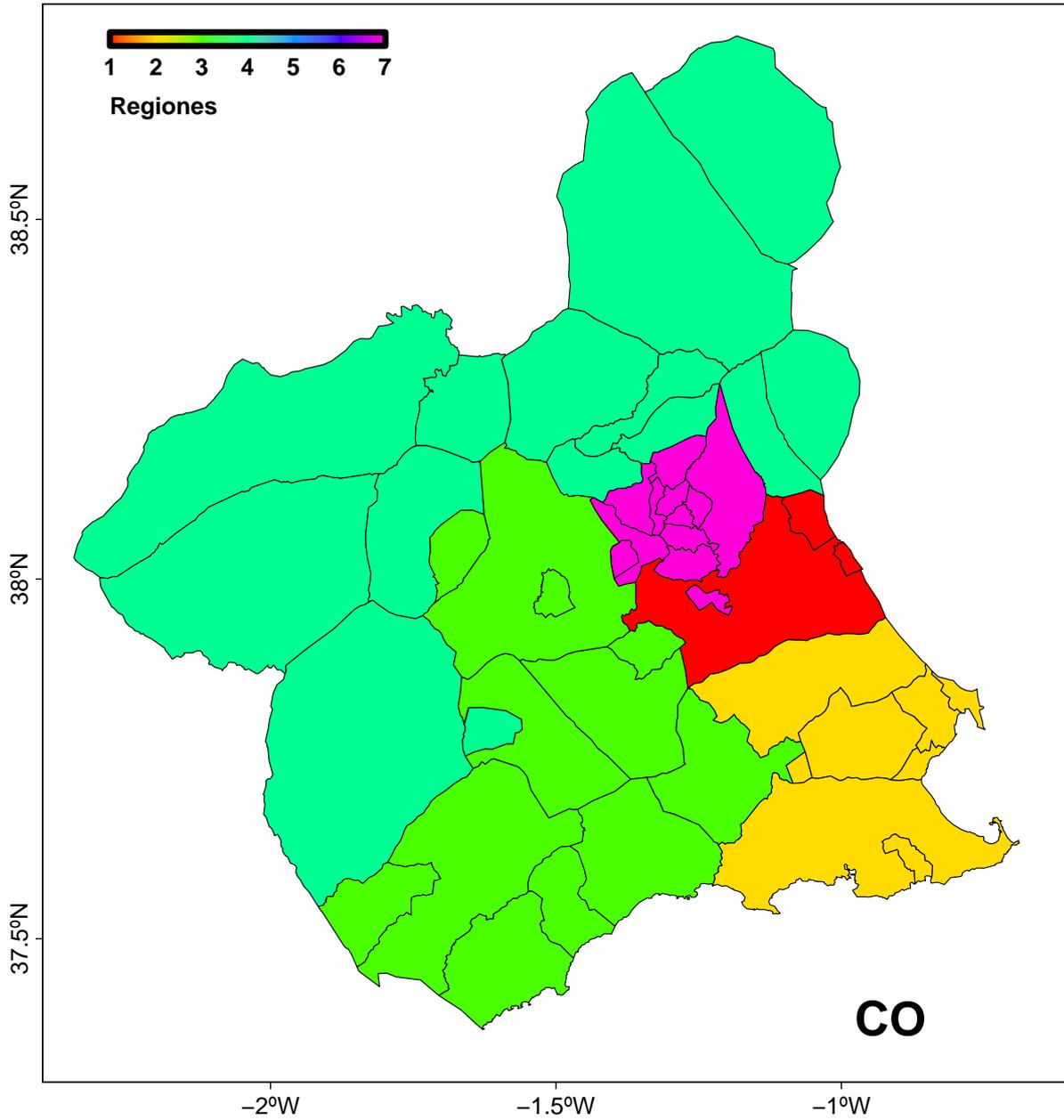


Figura 7.3: Clasificación final para el CO.

Capítulo 8 — Zonificación multi-contaminante

Grupo G-MAR/UMU

8.1 Zonificación con todas las variables

En este caso se utilizan todas las agrupaciones anteriores y se buscan los agrupamientos más robustos. La tabla 8.1 presenta los resultados de agrupación de un total de 136 clasificaciones provenientes de distintos contaminantes (4), metodologías (2), tipo de series (2), y PCS. Para cada localidad se presenta, la región a la que se ha asignado el municipio (R.1), el número de veces (NR.1) y el porcentaje PR.1. Las siguientes columnas indica lo mismo pero para la segunda zona más veces asignada. NC y PC nos indican el número y porcentaje de veces que presenta un cero, es decir no se ha agrupado en solitario. Y por último NOC y POC nos indica el número y porcentaje de veces que se asigna a otras zonas. Por ejemplo, Abanilla es asignada a la region 4, porque es la región a la que más veces se ha unido el municipio (un 43% de las veces). Sin embargo, en otras configuraciones se ha asociado a la region 7. Esto significa que la relación no es muy robusta. Por ejemplo en el caso de Yecla, se asocia a la región 4 un 70% de las veces, lo que significa que es una relación mucho más robusta.

Las columnas R.1 y PR.1 se pueden ver más claramente en las figuras 8.1 y 8.2. En la figura 8.1 se presenta la zonificación resultante, mientras en la figura 8.2 se presenta el porcentaje de veces que se ha asignado. Esto significa que dichos municipios pueden ser asignados a zonas adyacentes sin una pérdida significativa en la diferenciación entre ellas. Es decir, la zonificación final puede variar en función de posibles

Cuadro 8.1: Tabla de asignaciones. R.1 indica la región con mayor asignación, NR.1 indica el número de clasificaciones en las que el sub-municipio queda dentro de la zona Y PR el porcentaje de veces. NR.2 significa la segunda zona a la que más veces se ha asignado, y así sucesivamente. NC y PC denota el número y porcentaje de veces que no se ha asignado a ninguna región. Y finalmente NOC Y PNOC denotan el número de veces y porcentaje que los datos se han asignado a otras regiones.

	R.1	NR.1	PR.1	R.2	NR.2	P.2	R.3	NR.3	PR.3	NC	PC	NOC	PNOC
Abanilla	4	59	43	1	25	18	7	7	5	44	32	1	1
Abarán	4	77	57	7	42	31	1	10	7	1	1	6	4
Aguilas	6	66	49	3	62	46	1	5	4	0	0	3	2
Albudeite	7	22	16	4	12	9	5	6	4	90	66	6	4
Alcantarilla	1	55	40	7	30	22	2	0	0	51	38	0	0
Aledo	3	74	54	5	51	38	8	1	1	10	7	0	0
Alguazas	7	65	48	1	37	27	2	0	0	34	25	0	0
Alhama de Murcia	3	82	60	5	16	12	6	14	10	20	15	4	3
Archena	7	112	82	1	12	9	1	12	9	0	0	0	0
Beniel	1	100	74	2	2	1	7	1	1	33	24	0	0
Blanca	4	75	55	7	43	32	1	9	7	3	2	6	4
Bullas	5	106	78	3	5	4	8	2	1	23	17	0	0
Calasparra	5	64	47	4	17	12	1	8	6	32	24	15	11
Campos del Río	7	23	17	4	13	10	5	6	4	90	66	4	3
Caravaca de la Cruz	5	127	93	3	8	6	4	1	1	0	0	0	0
Cartagena	2	136	100	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Cehegín	5	111	82	3	9	7	8	1	1	15	11	0	0
Ceutí	7	91	67	1	34	25	4	4	3	7	5	0	0
Cieza	4	75	55	7	40	29	8	11	8	0	0	10	7
Fortuna	4	57	42	1	25	18	7	9	7	44	32	1	1
Fuente Alamo	6	47	35	3	38	28	2	12	9	30	22	9	7
Jumilla	4	127	93	1	9	7	2	0	0	0	0	0	0
Librilla	3	28	21	1	18	13	5	15	11	69	51	6	4
Lorca3	6	65	48	3	45	33	5	8	6	13	10	5	4
Lorquí	7	88	65	1	35	26	4	6	4	7	5	0	0
Mazarrón	6	65	48	3	57	42	1	5	4	4	3	5	4
Molina de Segura	7	51	38	1	40	29	4	22	16	22	16	1	1
Moratalla	5	126	93	3	7	5	4	1	1	2	1	0	0
Mula	5	42	31	4	11	8	8	6	4	72	53	5	4
Murcia2	6	37	27	2	28	21	1	20	15	35	26	16	12
Ojós	7	63	46	4	23	17	8	4	3	46	34	0	0
Pliego	5	58	43	3	8	6	8	3	2	65	48	2	1
Puerto Lumbreras	3	114	84	5	21	15	1	0	0	1	1	0	0
Ricote	4	42	31	7	40	29	8	9	7	45	33	0	0
San Javier	2	125	92	1	0	0	1	0	0	11	8	0	0
San Pedro del Pinatar	2	125	92	1	0	0	1	0	0	11	8	0	0
Torre-Pacheco	2	133	98	1	0	0	1	0	0	3	2	0	0
Torres de Cotillas	1	45	33	7	42	31	2	0	0	49	36	0	0
Totana	3	107	79	5	19	14	1	0	0	10	7	0	0
Ulea	4	58	43	7	56	41	1	12	9	5	4	5	4
Unión (La)	2	127	93	1	0	0	1	0	0	9	7	0	0
Villanueva Segura	7	71	52	4	23	17	8	4	3	38	28	0	0
Yecla	4	94	69	5	28	21	1	7	5	5	4	2	1
Santomera	1	101	74	4	7	5	7	1	1	27	20	0	0
Alcázares (Los)	2	127	93	1	0	0	1	0	0	9	7	0	0
Lorca1	5	112	82	3	22	16	1	0	0	2	1	0	0
Lorca2	3	131	96	1	5	4	2	0	0	0	0	0	0
Murcia1	1	136	100	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0

requerimientos tomando en cuenta el porcentaje de agrupamiento como factor de decisión. Por ejemplo, el municipio de Campos del Rio, pude pasar a la región 5 o incluso 3, Fortuna o Abanilla podrían pasar a la región 7.

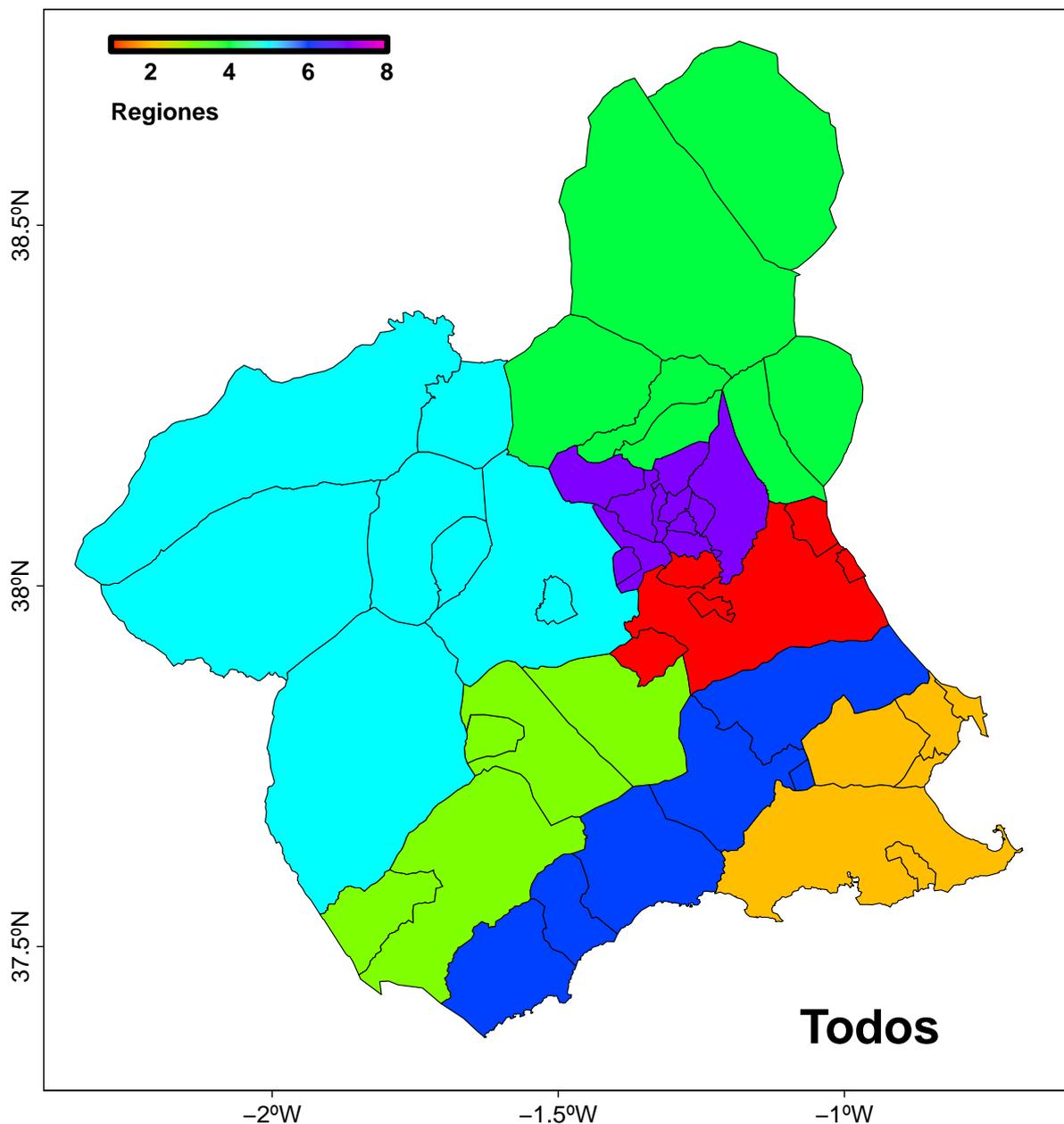


Figura 8.1: Clasificaciones final para todos los contaminantes agrupados por mayor frecuencia de aparición areal.

Una vez fijada una zonificación se puede obtener distintos parámetros asociados a la zonas como la población, el área, etc. En la tabla 8.2 se presenta un ejemplo asociada a la clasificación

Por otro lado puede ser interesante mirar los resultados parciales

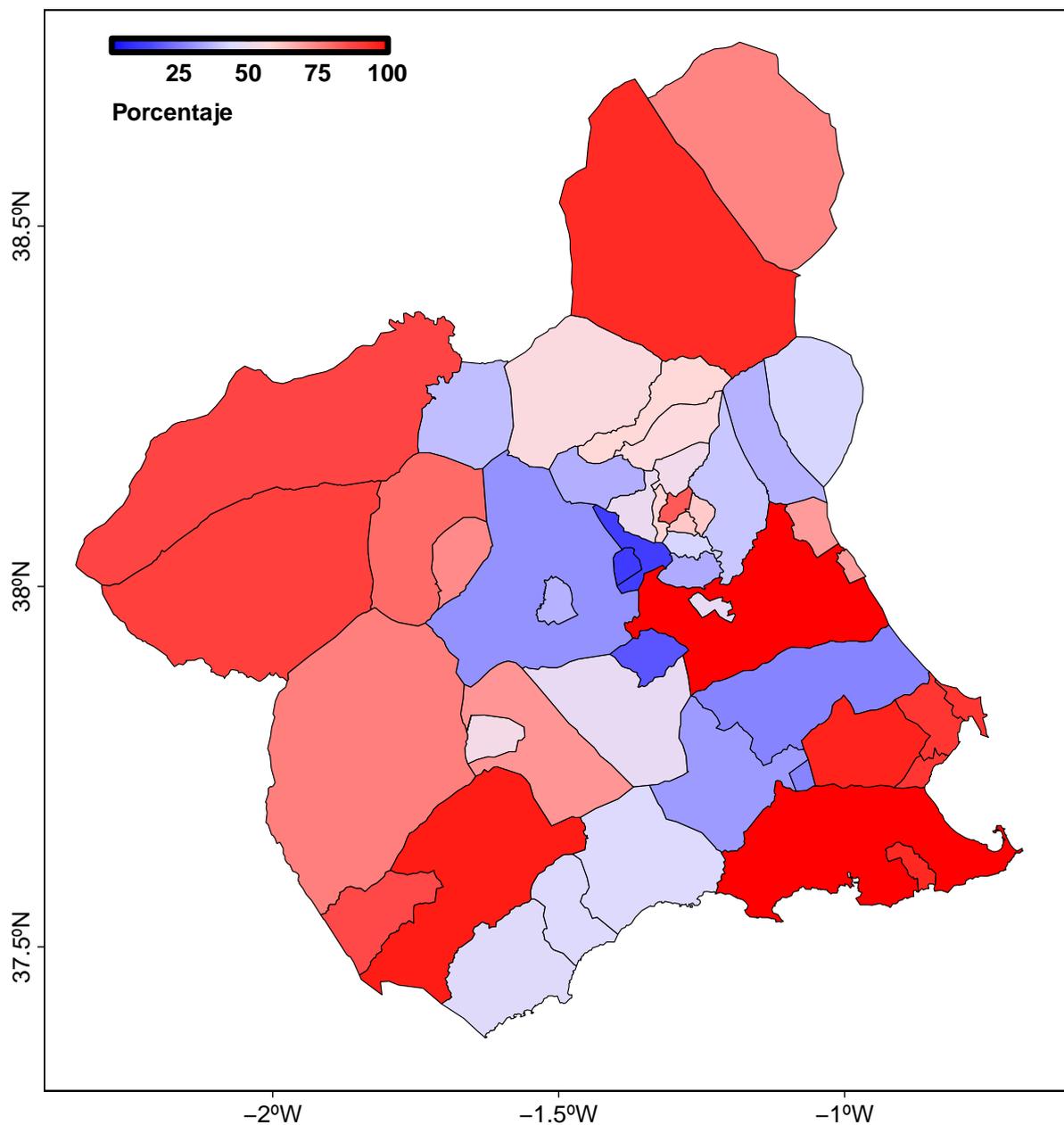


Figura 8.2: Porcentaje de valores de todas las clasificaciones correspondientes a la indicada.

Cuadro 8.2: Valores de Población y área para las distintas regiones presentadas en la zonificación de la figura 8.1

Región	Población	Área (km ²)
1	480843	676
2	334682	883
3	132712	1344
4	123829	2528
5	90607	4053
6	92419	1338
7	126745	486

por contaminante o por metodología (tipo de series y clustering). Si agrupamos por metodología observamos que las mayores diferencias aparecen dependientes del distinto uso de series, poblacionales o completas (figura 8.3). El número óptimo de grupos parece ser 7. Aunque obtenemos una configuración con 6 regiones.

8.2 Configuraciones similares

La clasificación presentada optimiza el parecido temporal de las series municipales pertenecientes a cada zona. No obstante como se ha mostrado anteriormente el cambio de algunos municipios de zona no debe de modificar sustancialmente la robustez de las zonas escogidas. Esto nos permite plantear distintas configuraciones espaciales a partir de otros criterios como pueden ser importancia del contaminante, población, etc o cualquier otro que los responsables y expertos en contaminación estimen oportunos. Las tablas construidas nos indicarán que municipios son menos susceptibles a la hora de ser cambiados de zona. Y el cálculo de los índices de robustez y similaridad nos mostrarán si las modificaciones planteadas hacen se pierda calidad en la zonificación planteada.

En la figura 8.4 se muestra otra configuración posible. El cálculo de los índices de robustez y similaridad expuestos en la sección metodológica nos indica que ésta configuración es prácticamente equivalente a la anterior. El cálculo de los índices se ha llevado a cabo para todas las series utilizadas. En este caso solo se aprecia un pérdida de coherencia interna para las series de NO₂ poblacionales. El resto de las variables no se ve afectadas, incluso aumenta la coherencia interna para las series de NO₂ espaciales. El resto de los índices permanece prácticamente inalterado con lo que podemos concluir que ambas configuraciones son muy similares.

Otra posibilidad de cambio se basa en la obtención de un menor número de regiones tal y como nos mostraban los resultados de las clasificaciones por metodología (figura 8.3). A partir de dichos resultados, unido a la poca robustez de la región 6, podemos plantear una nueva zonificación que reduzca el número de regiones, repartiendo los sub-municipios en las regiones 3 y 2. En la figura 9.2 se presenta una nueva posibilidad. Mientras Aguilas, Lorca Playa, y Mazarrón pasaría a la zona 3, Fuente Álamo y Murcia Sur pasaría a la zona 2

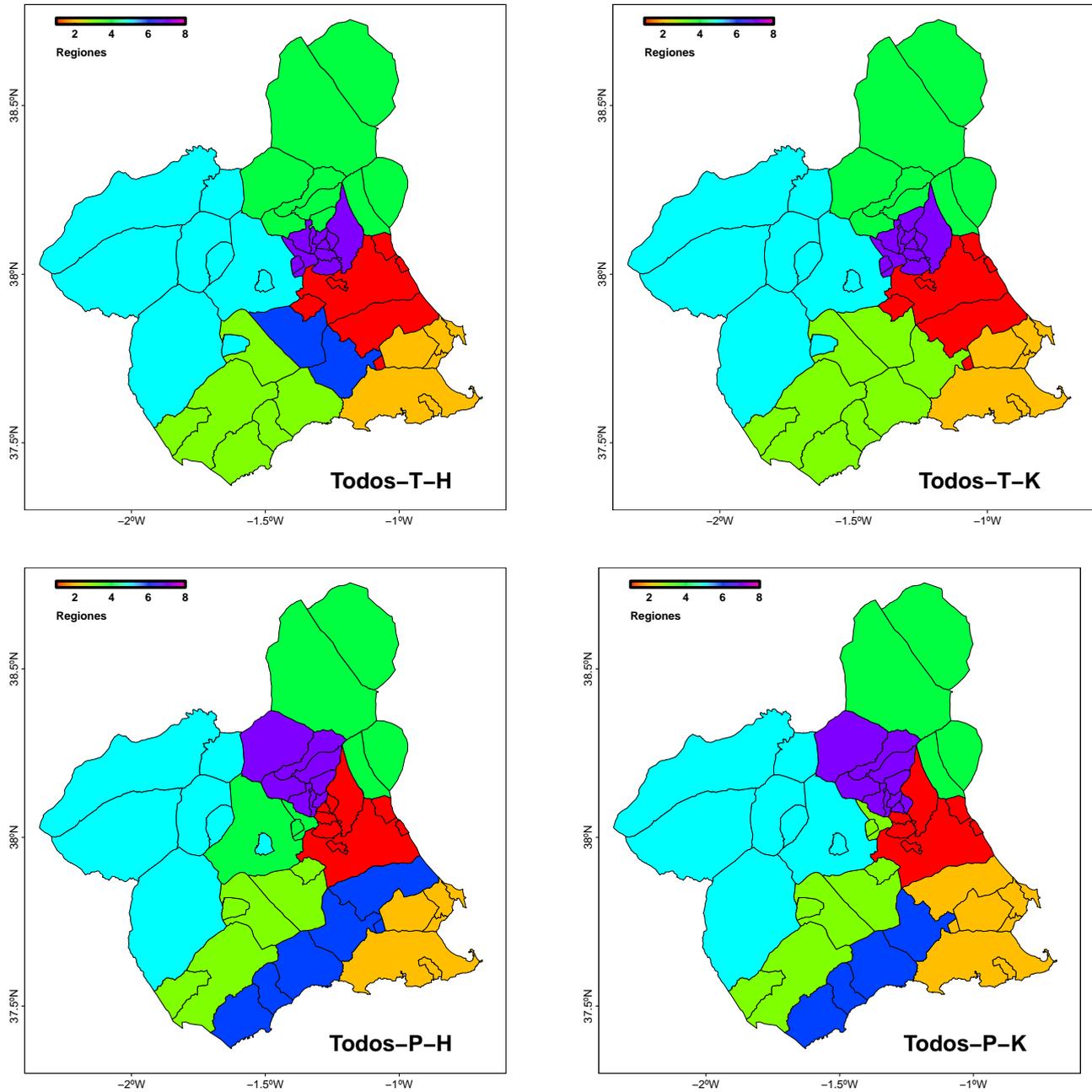


Figura 8.3: Clasificaciones parciales sin ceros para el PM10. En la fila superior encontramos las clasificaciones con las series municipales promedio, para un método jerárquico (izda) y K-means (dcha). En la fila inferior se representan los resultados usando las series municipales pesadas por población.

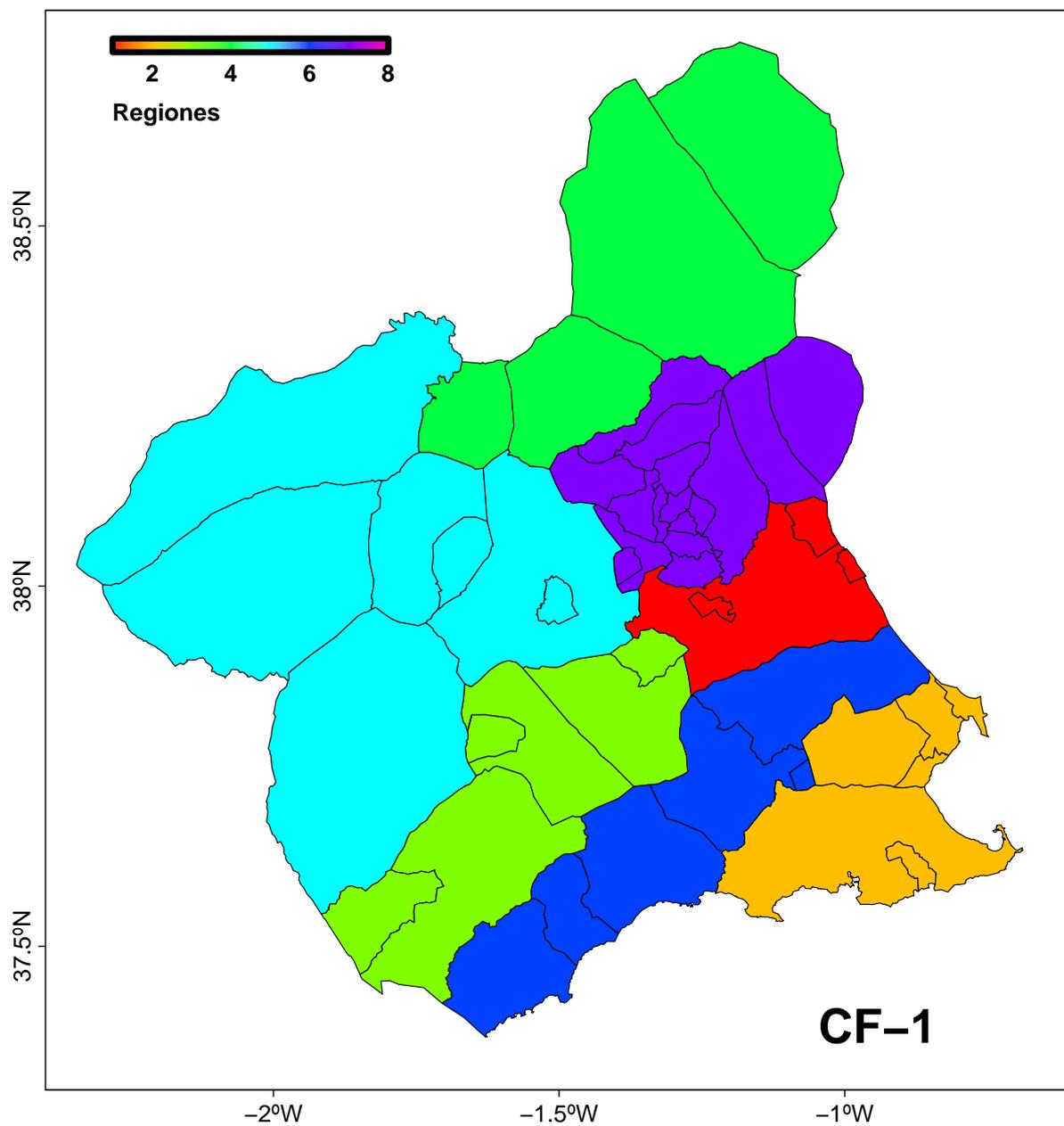
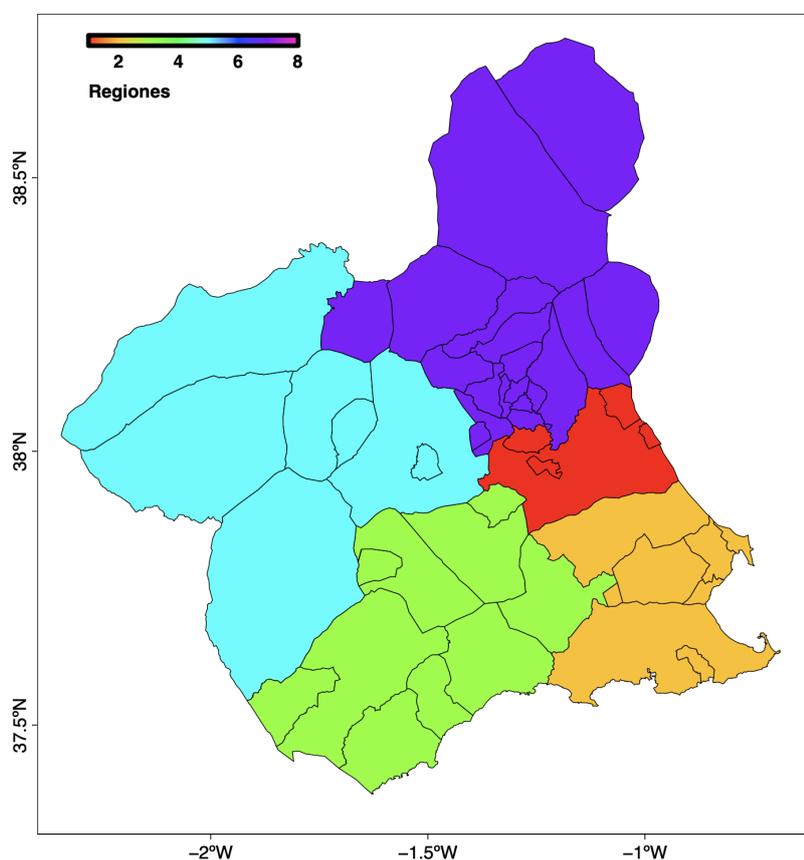


Figura 8.4: Zonificación alternativa 1.

Cuadro 8.3: Valores de población y área para la zonificación de la figura 8.4

Región	Población	Area	Pob. (%)	Área (%)
1	475882	620	34	5
2	334682	883	24	8
3	137673	1400	10	12
4	101327	2126	7	19
5	80922	3868	6	34
6	92419	1338	7	12
7	158932	1073	12	9

(Cartagena). De nuevo, igual que en el caso anterior, aunque hay un pequeña disminución de los índices de robustez y similitud, estos son pequeños, despreciables ante como cambiarían si la elección se llevara a cabo de manera aleatoria.

**Figura 8.5:** Zonificación alternativa 2.

8.3 Zonificaciones Transitorias

La legislación actual establece una serie de criterios sobre mínimos en referentes a las estaciones de medida para cada una de las zonas.

En el momento de realizar este trabajo en la CARM se dispone de las estaciones descritas en la sección 2.2. Según dichos criterios en la zonificación planteada anteriormente (figura 8.4) como definitiva habría dos zonas, el Altiplano (region 4) y litoral sur (región 6) que no quedarían cubiertas con las zonificaciones propuestas. Por ello se hace necesario, establecer una zonificación transitoria que permita seguir aplicando los índices regionales de calidad del aire observados hasta que las todas las zonas propuestas estén dispuestas con las estaciones de calidad del aire necesarias.

Como se ha visto a lo largo de la memoria, dependiendo del contaminante, las zonificaciones obtenidas son ligeramente diferentes. En la zona norte y noroeste de la región el contaminante que puede presentar mayores concentraciones es el Ozono. Un método sencillo para intentar agrupar de manera transitoria la Region 4 (Noroeste) con otra región es calcular la similaridad temporal de las distintas series. Para ello calculamos la matriz de correlación para cada una de las series regionales (por contaminante y construcción) y buscamos la región con la presenta mayor coherencia.

Los resultados indican que la mayor coherencia se da con la region 7 (Valle del Segura) seguida muy de cerca por la región 5 (Noroeste). Con estos resultados se podría proponer algunas de las dos nuevas configuraciones que se presentan en la figura 8.6. En el panel superior se presenta la agrupación de la región 4 con la 5 y en el inferior con la 7.

En cuanto a a la región 6, tal y como se ha notado antes es una de las regiones que presenta menor coherencia espacial y no tendría estrictamente una estación. Su tratamiento transitorio se puede abordar de dos formas diferentes. La primera ya la hemos planteado anteriormente. En segundo lugar la estación de la Aljorra está prácticamente en los límites de la zona. Una evaluación indica que la correlación de las series de contaminación de la Aljorra presentan valores altos con la serie de la zona 6. Esto indicaría que al dicha estación puede ser un buen indicador de la calidad ambiental de la zona. Para mostrar este resultado en la Figura 8.7 se presenta los coeficientes de correlación de las series de la aljorra con el resto de puntos de la CARM. Es decir, dicha estación podría tomarse como representativa de dicha zona.

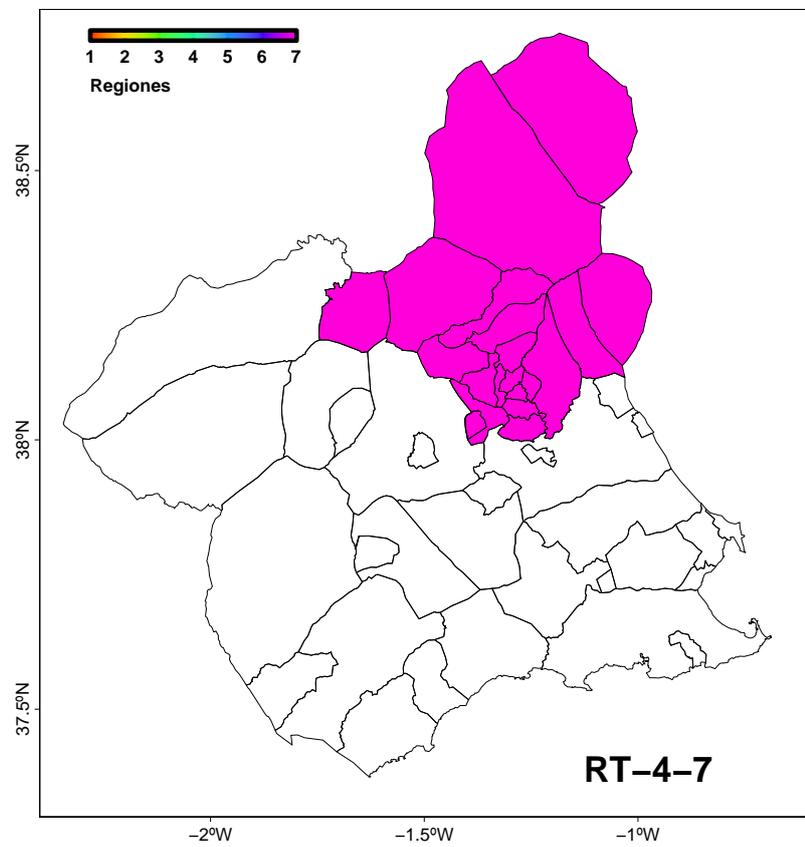
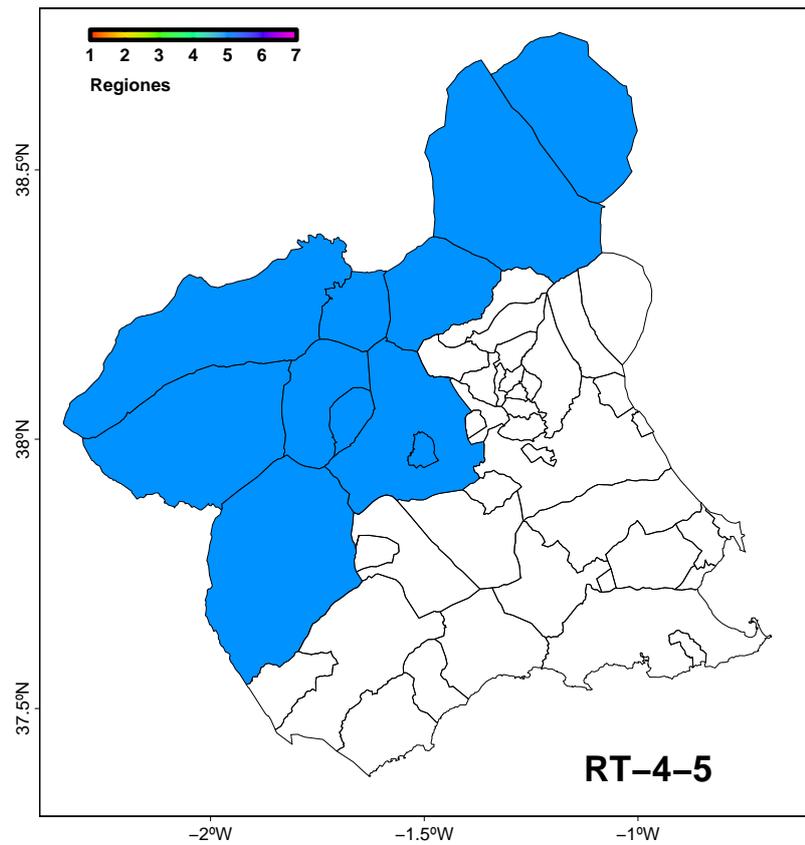


Figura 8.6: Configuraciones transitorias para el noroeste

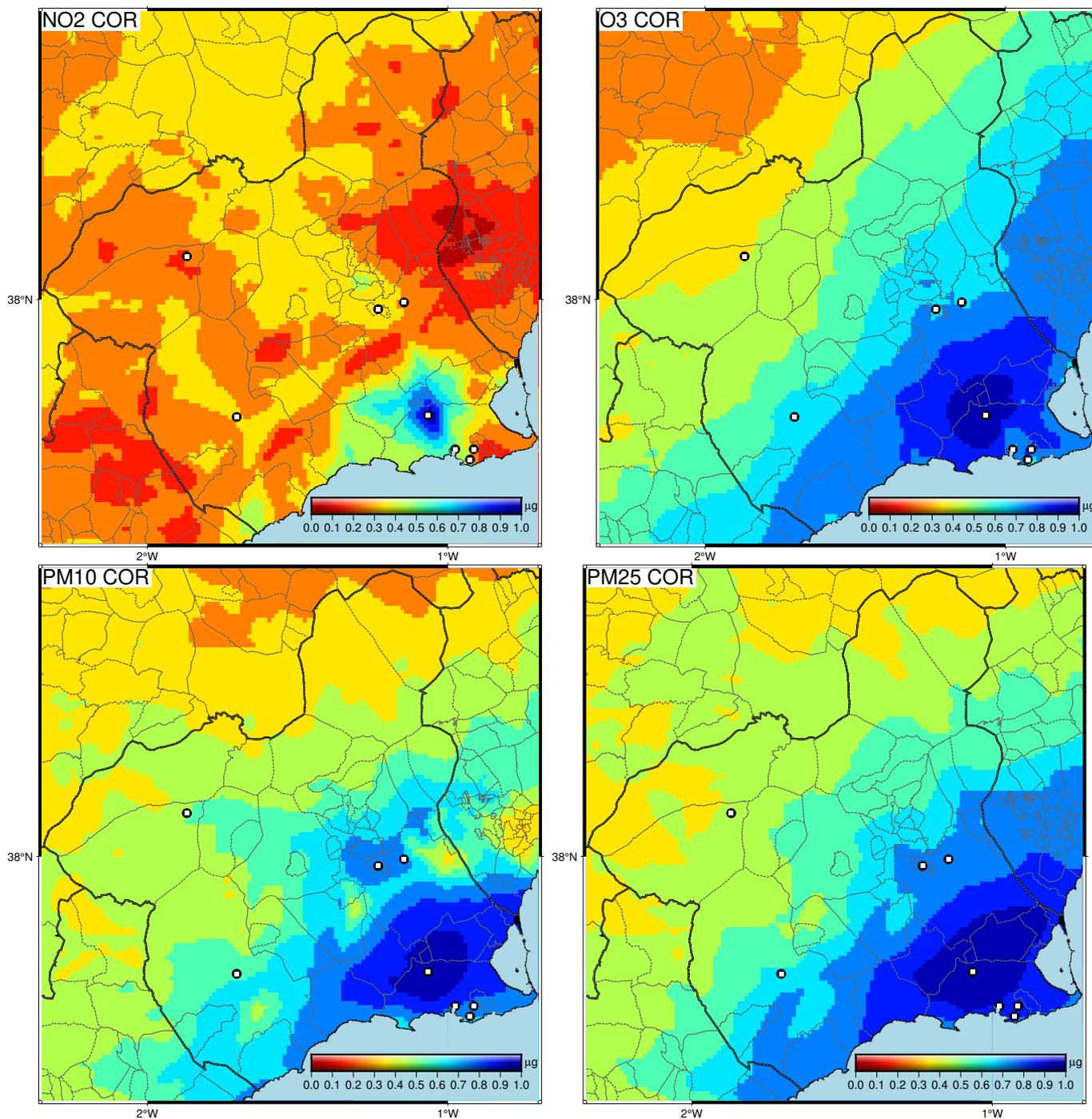


Figura 8.7: Correlación espacial del campo total de contaminantes con la serie de la Aljorra.

8.4 Inclusión de regiones especiales

Como ya se ha discutido anteriormente (capítulo 7) una de las zonas más peculiares en la CARM desde el punto de vista de la contaminación atmosférica es la zona del Valle de Escombreras, la Unión y alrededores. En esta zona se encuentran grandes empresas, tales como refinerías, industrias químicas, centrales de ciclo combinado, etc. Por otro lado, presenta una circulación atmosférica local asociada a una topografía compleja que provoca un patrón espacial de contaminación atmosférica muy singular. El análisis de la correlación espacial de las series de contaminación (SO₂ y NO₂) de dicha zona (Alumbres y Escombreras) con el resto de la CARM (figura 8.8) nos muestra un patrón positivo bastante restringido a la zona del valle de Escombreras y la Unión. Así pues se propone una nueva subdivisión municipal que parte del sur de Cala Cortina siguiendo la cuerda hasta el límite norte municipal de la Unión. La nueva zona (especial) vendrá de uniando ambas áreas.

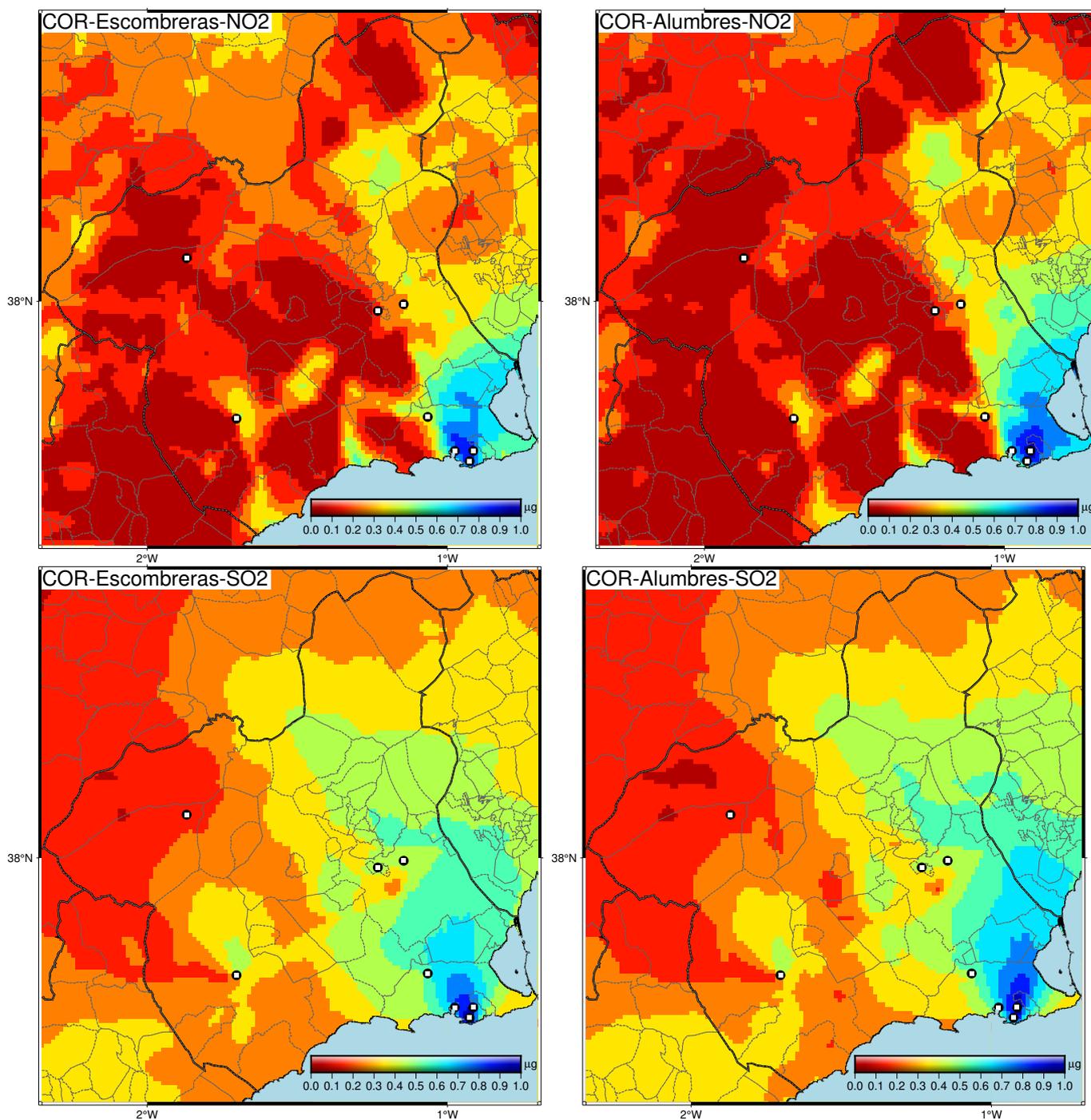


Figura 8.8: Correlación espacial del campo total de contaminantes, NO₂ (panel superior) y SO₂ (Panel Inferior) , con la serie de Escombreras (dcha) y la Aljorra (izda).

Capítulo 9 — Conclusiones y recomendaciones

Grupo G-MAR/UMU

9.1 Conclusiones

En este informe se ha presentado un estudio sobre la zonificación de la contaminación atmosférica en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. El análisis se ha llevado a cabo para los distintos contaminantes; NO₂, O₃, PM₁₀, PM₂₅, SO₂ y CO, proponiendo una zonificación por contaminante. Para cada contaminante se ha presentado un centrado en la superación de umbrales y valores límite establecidos en la legislación vigente.

Finalmente se ha llevado a cabo un estudio de la zonificación incluyendo todos los contaminantes. La zonificación ha sido planteada para maximizar la correlación de las series de contaminación interna de cada zona, y en segundo lugar minimizar la correlación entre distintas zonas. La metodología empleada ha sido especialmente desarrollada para este proyecto, y considera las incertidumbres asociadas al proceso de agrupamiento. Esto permite cierta flexibilidad en la elección final de la zonificación, adaptándose así a otro tipo de criterios externos. La metodología planteada, también permite el cálculo de unos índices que permiten evaluar el efecto sobre la calidad de la zonificación cuando se realizan las modificaciones antes mencionadas.

- Establecer una serie de unidades territoriales. Las unidades territoriales son coincidentes con los municipios salvo algunas

excepciones. Lorca se ha subdividido en tres *sub-municipios*, Murcia en dos, y en Cartagena se ha creado una zona especial relacionada con el valle de Escombreras. Las subdivisiones se han hecho en función de las distinta fisionomía de los municipios creando los nuevos límites siguiendo factores orográficos.

- Se han generado series territoriales. Para cada contaminante y submunicipio se ha creado dos series. La primera es el promedio de todos los puntos del modelo incluidos en el municipio. La segunda se calcula de igual manera pero pesando los puntos de grid en función de la población correspondiente.
- Clustering inicial. Para cada conjunto de series dadas por tipo, contaminante y municipio se han aplicado un análisis de funciones empíricas ortogonales. Al conjunto de las componentes principales se ha aplicado dos técnicas de agrupamiento, jerárquico (Ward) y no jerárquico (K-Means). Se han hecho distintas clasificaciones variando el número de PCs retenidas así como el número de clústers.
- Agrupamiento de clústers. Aunque la zonificación se realiza para cada una de las variables, la propuesta final ha de incluir todos los contaminantes. Para ellos se ha generado un método para numerar las regiones para que sean comparables entre si. La clasificación final se basa en el porcentaje de veces que un municipio pertenece a una determinada región. Este mismo hecho, hace que el número de regiones se optimize.

A partir de los resultados obtenidos se plantean distintas posibilidades de agrupamiento. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos se presenta como zonificación final una de las distintas zonificaciones que pueden ser consideradas como óptimas con un alto grado de robustez para el objeto del presente estudio, así como una zonificación transitoria, hasta que se disponga de seguimiento de la contaminación atmosférica que permita cubrir todas estas zonas.

9.2 Zonificación final

La zonificación final propuesta se presenta en la figura 9.1. Se identifican 7 regiones que podemos nombrar como Murcia metropolitana (1),

Campo de Cartagena y mar menor (2), Lorca y Costa Sur (Guadalentín) (3), Altiplano (4), Noroeste (5), Vega Media (Vega Oriental) (6) y la zona de especial interés formada por la Unión y el Valle de Escombreras (Escombreras) (7). En las tablas 9.1 y 9.2 se presentan los municipios pertenecientes a cada región y la población y área respectivamente.

Cuadro 9.1: Lista de municipios pertenecientes a cada Zona.

	Zona	Municipios
1	MURCIA AREA METROPOLITANA	Alcantarilla, Beniel, Santomera, Murcia
2	CAMPO CARTAGENA - MAR MENOR	Fuente Álamo de Murcia, Murcia-sur, San Javier, San Pedro del Pinatar, Torre-Pacheco. Los Alcázares. Cartagena
3	GUADALENTIN	Águilas. Aledo. Alhama de Murcia, Librilla, Lorca-centro, Lorca-sur Mazarrón, Puerto Lumbreras, Totana
4	ALTIPLANO	Calasparra, Cieza, Jumilla, Yecla
5	NOROESTE	Bullas, Caravaca de la Cruz, Cehegín, Moratalla, Mula, Pliego, Lorca-Norte
6	VEGA-ORIENTAL	Abanilla, Abarán, Albudeite, Alguazas, Archena, Blanca, Campos del Río, Ceutí, Fortuna, Lorquí, Molina de Segura, Ojós, Ricote, Las Torres de Cotillas, Ulea, Villanueva del Río Segura
7	ESCOMBRERAS	La Unión, Cartagena-Escombreras

Cuadro 9.2: Estadísticos de la clasificación DEF. El área viene dada en km². Los porcentajes están calculados respecto al total de la CARM.

Región	Población	Area	% Pob.	% Area
1	517012	581	34	5
2	357370	1474	24	13
3	235817	2087	16	18
4	106244	2127	7	19
5	85761	3869	6	34
6	188400	1111	12	10
7	20650	67	1	1

La nueva zona 4, correspondiente a los municipios de Yecla, Jumilla, Cieza y Calasparra, no dispone por el momento de la infraestructura técnica, en su caso una nueva estación para la evaluación de la calidad del aire. Por ello, se genera una nueva zonificación transitoria (figura 9.2), hasta que se pueda instalar la infraestructura que corresponda. De las configuraciones posibles expuestas en el capítulo de resultados se ha optado por unirla con la zona 5, que incluye los municipios de la comarca del noroeste junto al norte de Lorca, y los municipios de Mula y alrededores que corresponde con la configuración actual. Por

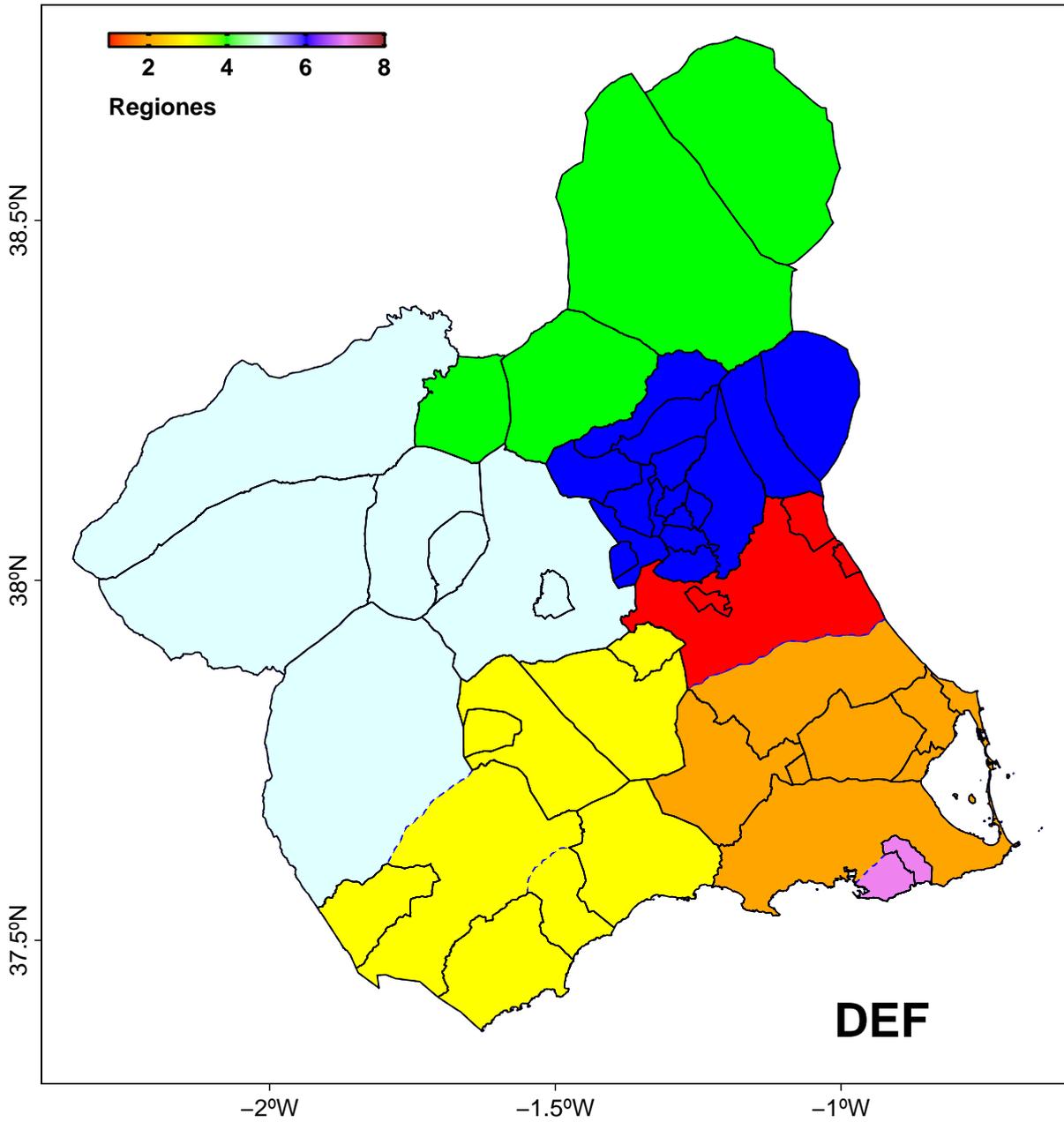


Figura 9.1: Zonificación final propuesta.

otro, lado notemos que ésta nueva zona tiende a englobar gran parte de los municipios incluidos en la zona norte en la zonificación anterior. Las estadísticas fundamentales de esta zonificación transitoria vienen dadas en la tabla 9.3.

Cuadro 9.3: Estadísticos de la clasificación TRN.

Región	Población	Area	% Pob.	% área
1	517012	581	34	5
2	357370	1474	24	13
3	235817	2087	16	18
5	192005	5996	13	53
6	188400	1111	12	10
7	20650	67	1	1

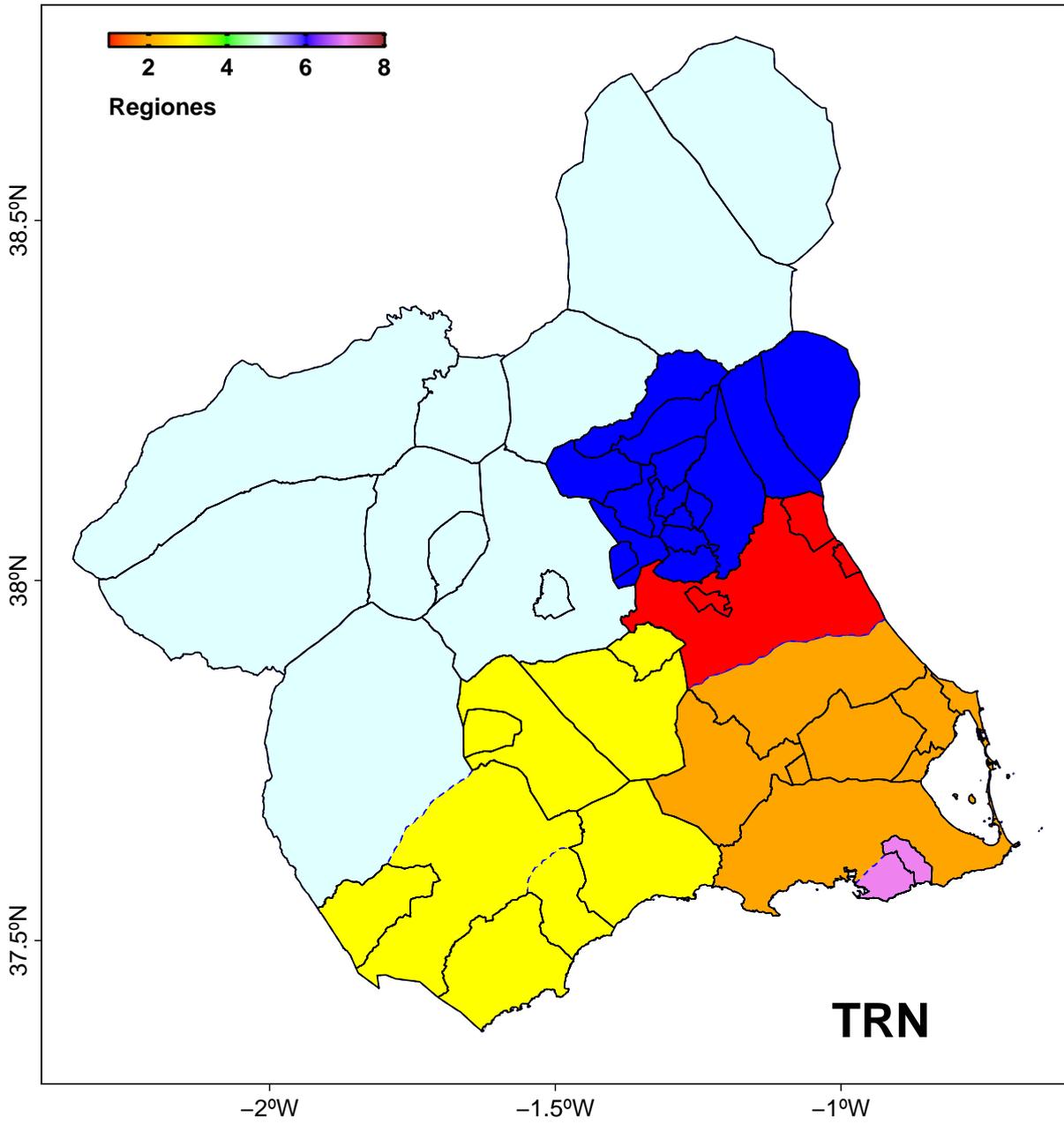


Figura 9.2: Zonificación transitoria final propuesta.



Bibliografía

Informes y libros

- Jain, A. K., M. N. Murty y P. J. Flynn (2010): *Data clustering: a tutorial*. Springer (véanse páginas 26, 27).
- Von Storch, H. y F. W. Zwiers (2000): *Climate analysis: methods and applications*. Cambridge University Press (véase página 24).

Artículos

- García-Valero, Juan Andres et al. (2012): A seasonal study of the atmospheric dynamics over the Iberian Peninsula based on circulation types. En: *Theoretical and applied climatology* volumen 110, páginas 291-310 (véase página 3).
- Govender, Paulene y Venkataraman Sivakumar (2020): Application of k-means and hierarchical clustering techniques for analysis of air pollution: A review (1980–2019). En: *Atmospheric pollution research* volumen 11 (1), páginas 40-56 (véase página 3).
- Grell, Georg A et al. (2005): Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. En: *Atmospheric environment* volumen 39 (37), páginas 6957-6975 (véase página 16).
- Jiménez, Pedro A et al. (2010): Surface wind regionalization over complex terrain: Evaluation and analysis of a high-resolution WRF simulation. En: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* volumen 49 (2), páginas 268-287 (véase página 3).

- Lorente-Plazas, R et al. (2015): A 49 year hindcast of surface winds over the Iberian Peninsula. En: *International journal of climatology* volumen 35 (10), páginas 3007–3023 (véase página 3).
- MacQueen, J. B. (1967): Some methods for classification and analysis of multivariate observations. En: *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability* volumen 1, páginas 281–297 (véase página 27).
- Menut, L. et al. (2013): CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modelling. En: *Geoscientific Model Development* volumen 6 (4), páginas 981–1028. doi: [10.5194/gmd-6-981-2013](https://doi.org/10.5194/gmd-6-981-2013). URL: <https://gmd.copernicus.org/articles/6/981/2013/> (véase página 18).
- Powers, Jordan G et al. (2017): The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. En: *Bulletin of the American Meteorological Society* volumen 98 (8), páginas 1717–1737 (véase página 18).
- Ward, J. H. (1963): Hierarchical grouping to optimize an objective function. En: *Journal of the American Statistical Association* volumen 58 (301), páginas 236–244 (véase página 26).
- Zhou, Zhi-Hua (2022): Open-environment machine learning. En: *National Science Review* volumen 9 (8), nwac123 (véase página 3).

Documentos Webs

- Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2023): *Centro de Descargas del CNIG*. URL: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> (véase página 11).
- Instituto Nacional de Estadística (INE) (2023): *Cifras Oficiales de Población de los municipios españoles: Revisión del Padrón Municipal. Resultados (2020)*. URL: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736177011&menu=resultados&idp=1254734710990 (véase página 13).
- QGIS Development Team (2023): *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. URL: <https://qgis.org> (véase página 7).

Otros documentos

- BOE y Gobierno de España (enero de 2011): *Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire*. DOI: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-1645. URL: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-1645 (véase página 2).
- MAR, Grupo (2017): *ZONIFICACIÓN DEL TERRITORIO SEGÚN CONTAMINANTE EN LA REGIÓN DE MURCIA (SINQLAIR)* (véanse páginas 2, 28).