



Estrategia de Energía, Clima y Aire de la Comunidad de Madrid

2023-2030



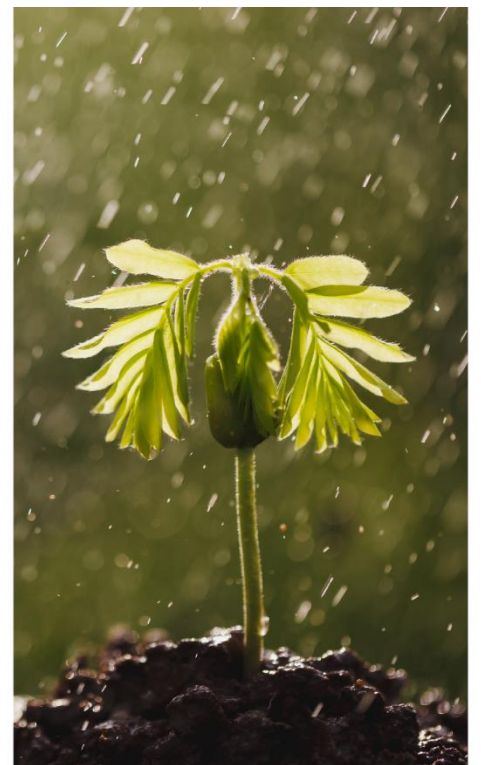
**Comunidad
de Madrid**

Anexo 5. Evaluación del efecto de las medidas de la Estrategia

CONVENIO DE INVESTIGACIÓN
"MODELIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LA COMUNIDAD DE MADRID"
ENTRE LA COMUNIDAD DE MADRID Y LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)



LABORATORIO DE
MODELIZACIÓN AMBIENTAL.
ETSI INDUSTRIALES.
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE
MADRID (UPM).



Índice de contenido



ÍNDICE DE CONTENIDO	2
ÍNDICE DE TABLAS.....	3
ÍNDICE DE FIGURAS	4
1. OBJETO DEL DOCUMENTO	5
2. INTRODUCCIÓN	6
3. ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES.	7
4. SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE	9
5. RESUMEN Y CONCLUSIONES	22



Índice de tablas

Tabla 1. Cuantificación de la reducción de emisiones y consumo de combustibles asociadas al sector transporte/movilidad (en 2030 respecto a 2018).....	8
Tabla 2. Cuantificación de la reducción de emisiones y consumo de combustibles asociadas al sector residencial, comercial e institucional (en 2030 respecto a 2018).....	8
Tabla 3. Cuantificación de la reducción de emisiones y consumo de combustibles del resto de sectores (en 2030 respecto a 2018).....	8
Tabla 4. Resumen de los principales resultados en relación a la media anual de NO ₂ para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio de la zona (escenarios base y 2030), reducción absoluta (media y máxima) y reducción relativa (media y máxima).....	12
Tabla 5. Resumen de los principales resultados en relación al percentil horario 99,8 de concentración de NO ₂ para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio de la zona (escenarios base y 2030), variación absoluta (media y máxima) y variación relativa (media y máxima).....	14
Tabla 6. Resumen de los principales resultados en relación al promedio anual de concentración de PM ₁₀ para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio de la zona (escenarios base y 2030), variación absoluta (media y máxima) y variación relativa (media y máxima).	16
Tabla 7. Resumen de los principales resultados en relación al percentil diario 90,4 de concentración de PM ₁₀ para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio en cada zona (escenarios base y 2030), variación absoluta (media y máxima) y variación relativa (media y máxima).	17
Tabla 8. Resumen de los principales resultados en relación al promedio anual de concentración de PM _{2,5} para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio para cada zona (escenario base y 2030), variación absoluta (media y máxima) y variación relativa (media y máxima).	19
Tabla 9. Resumen de los principales resultados en relación al percentil diario 93,2 de concentración de O ₃ para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio para cada zona (escenario base y 2030), variación absoluta (media / mínima y máxima) y variación relativa (media / mínima y máxima).....	21
Tabla 10. Resumen de emisiones bajo el escenario planteado	22





Índice de figuras

Figura 1. Esquema básico del sistema de simulación de la calidad del aire	10
Figura 2. Dominios empleados en la simulación meteorológica. (a) Dominio D1 (27x27 km ²), D2 (9x9 km ²) y D3 (3x3 km ²). (b) Dominio D4 (1 km ²), Comunidad de Madrid. Proyección cartográfica cónica Lambert Conformal con $\alpha = 20^{\circ}\text{N}$, $\beta = 60^{\circ}\text{N}$ y $\Upsilon = 3^{\circ}\text{W}$	11
Figura 3. Concentración media anual de NO ₂ predicha para el escenario base (izquierda) y el año 2030 (derecha)	12
Figura 4. Variación de la concentración media anual de NO ₂ : absoluta (izquierda) y relativa (derecha)	13
Figura 5. Percentil horario 99,8 de la concentración de NO ₂ de la serie anual predicha para el escenario base (izquierda) y 2030 (derecha)	14
Figura 6. Variación absoluta (izquierda) y relativa (derecha) del percentil horario 99,8 de concentración de NO ₂ (19 ^o valor anual más alto)	15
Figura 7. Concentración media anual de PM ₁₀ predicha para el escenario base (izquierda) y el año 2030 (derecha)	15
Figura 8. Variación de la concentración media anual de PM ₁₀ : absoluta (izquierda) y relativa (derecha)	16
Figura 9. Percentil diario 90,4 de concentración de PM ₁₀ de la serie anual predicha para el escenario base (izquierda) y el año 2030 (derecha)	17
Figura 10. Variación absoluta (izquierda) y relativa (derecha) del percentil diario 90,4 de concentración de PM ₁₀ (36 ^o valor anual más alto)	18
Figura 11. Concentración media anual de PM _{2,5} predicha para el escenario base (izquierda) y el año 2030 (derecha)	19
Figura 12. Variación de la concentración media anual de PM _{2,5} : absoluta (izquierda) y relativa (derecha)	20
Figura 13. Percentil diario 93,2 de concentración de O ₃ predicha para el escenario base (izquierda) y el año 2030 (derecha)	20
Figura 14. Variación de la concentración del percentil 93,2 de O ₃ : absoluta (izquierda) y relativa (derecha)	21
Figura 15. Superación de los valores límite del escenario 2030 establecidos por la propuesta de nueva Directiva 2030 (a) y por las recomendaciones de la OMS (b) para la media anual de NO ₂ y para la media anual de PM _{2,5} (c) y (d)	23





1. OBJETO DEL DOCUMENTO

El presente documento resume la metodología y principales resultados en relación con la evaluación del efecto de las medidas de reducción de emisiones definidas en la nueva Estrategia de Energía, Clima y Aire de la Comunidad de Madrid – 2023- 2030 (en adelante, Estrategia).

El documento se estructura en dos partes; en primer lugar, se cuantifican las principales medidas propuestas en la estrategia, en términos de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado, tanto PM_{10} como $\text{PM}_{2,5}$. Posteriormente, y mediante el uso de técnicas de modelización, se analiza la variación en los niveles de concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono troposférico (O_3) y material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$) para los escenarios de emisiones del año 2018 (escenario base) y el escenario 2030, que incluye las medidas cuantificables definidas en la Estrategia. Es importante señalar que las emisiones utilizadas en la modelización para el ámbito exterior de la Comunidad de Madrid son en ambos casos las del escenario base (2018), de tal manera que las variaciones obtenidas son debidas exclusivamente a las medidas regionales y no tienen en cuenta las posibles reducciones de emisiones que pueda haber en el resto de España y Europa.

Esta evaluación sirve de referencia en relación con el cumplimiento de los valores límite de concentración para los contaminantes atmosféricos previamente citados (NO_2 , O_3 y material particulado) y recogidos en el Real Decreto 102/2011, para el horizonte temporal definido en la estrategia (año 2030). Además, en el apartado de conclusiones se reflexiona sobre la compatibilidad con el cumplimiento de la actual propuesta de directiva del Parlamento europeo y del Consejo relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia sobre calidad del aire de fecha 26 de octubre de 2022 (a fecha de elaboración del presente documento), así como con los valores guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

El presente documento se ha realizado en el marco de la tercera anualidad del convenio de investigación "Modelización de la Calidad del aire en la Comunidad de Madrid" (en adelante, Convenio) firmado entre la Comunidad de Madrid (concretamente la actual Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Agricultura) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).



2. INTRODUCCIÓN

Según se expone en el punto anterior, uno de los objetivos de la Estrategia es el de reducir los efectos negativos de la contaminación atmosférica sobre los ciudadanos en la Comunidad Autónoma de Madrid. Para ello, la Estrategia pretende mejorar la calidad del aire en la ciudad de modo que sea posible acercarse al cumplimiento de los valores límite de concentración fijados por el Real Decreto 102/2011, así como los nuevos valores límite más restrictivos que se están discutiendo en el marco de la revisión de la nueva Directiva Europea de calidad del aire a 2030, para NO_2 , O_3 , PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$.



3. ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES

3.1. Aproximación metodológica

El trabajo en este punto se ha basado en el análisis del nivel de ambición desarrollado en el Convenio y ha tenido en cuenta otros instrumentos de planificación relevantes, tanto de la propia Comunidad como de otras administraciones. La necesidad imperiosa de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la existencia de compromisos a nivel internacional ha facilitado que las distintas administraciones definan objetivos a medio plazo como el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC). Esta estrategia, consistentemente con la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética, plantea reducir en el año 2030 las emisiones de gases de efecto invernadero del conjunto de España en, al menos, un 23 % respecto del año 1990. Trasladando este mismo objetivo a la Comunidad de Madrid, esto implicaría reducir las emisiones directas actuales (2018) en casi un 50%. Esto sugiere que las reducciones en este ámbito han de ser mucho más exigentes. En consecuencia, el escenario de emisiones planteado se basa en una reducción de GEI compatible con los objetivos nacionales y consistente con la ruta de descarbonización planteada por el Ayuntamiento de Madrid en su hoja de ruta hacia la Neutralidad Climática de la Ciudad de Madrid en 2050. Esto implica la implementación de una serie de medidas de enorme calado sobre los sectores del tráfico y residencial, comercial e institucional (RCI), con reducciones que llevarían aparejadas unas reducciones de emisión superiores al 60% (respecto a 2018) en ambos casos.

Considerando estas circunstancias y la coyuntura legal actual, se consensuó con la Comunidad de Madrid que la simulación (**apartado 4**) a realizar dentro del Convenio se centraría en estudiar el efecto que tendría este escenario de emisiones en el año 2030 manteniendo constante las condiciones de contorno; es decir, sin considerar el posible efecto de medidas y estrategias a nivel nacional o internacional, fuera del ámbito competencial de la CM y que carecen del detalle suficiente para su integración en este ejercicio.

Dado el diseño del experimento, los resultados de la simulación permiten evaluar el grado de compatibilidad de las políticas climáticas en curso con la revisión de los valores límite actualmente en discusión en la propuesta de Directiva relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia. Esto ha generado información relevante para valorar la proporcionalidad entre objetivos climáticos y de calidad del aire específicamente para la región de Madrid y facilitará la identificación de estrategias efectivas en ambos ámbitos con el objeto de asegurar la contribución de la Comunidad de Madrid a la consecución de los objetivos globales asociados al cambio climático y minimizar la exposición de sus ciudadanos a la contaminación atmosférica.

3.2. Cuantificación de las medidas

Una vez determinada la filosofía y visión del escenario 2030, se procedió a cuantificar las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), de manera compatible con los objetivos nacionales y consistente con la ruta de descarbonización planteada por el Ayuntamiento de Madrid en su hoja de ruta con escenario temporal 2030. Esto implica una serie de supuestos de gran calado sobre los sectores del tráfico rodado y residencial, comercial e institucional (RCI) fundamentalmente, que tendrían un impacto considerable en otros contaminantes relevantes para la calidad del aire.

En relación con tráfico rodado se han cuantificado 6 medidas de reducción de emisiones (Tabla 1):

- A1. Uso eficiente de los medios de transporte
- A2. Apoyo de medidas de cambio modal.
- A3. Impulso a la movilidad eléctrica y de bajas emisiones.

- A4. Impulso a la transformación de las flotas de transporte de viajeros y mercancías mediante el uso de tecnologías y combustibles menos contaminantes
- A5. Renovación de la flota institucional y de la flota de autobuses urbanos e interurbanos.
- A7. Implementación de Zonas de Bajas Emisiones en los municipios de la Comunidad de Madrid

Tabla 1. Cuantificación de la reducción de emisiones y consumo de combustibles asociadas al sector transporte/movilidad (en 2030 respecto a 2018)

Medida	Reducción de emisiones anuales (t, excepto GEI en kt de CO ₂ -equivalente)							
	SO ₂	NO _x	COVNM	CO	NH ₃	PM _{2,5}	PM ₁₀	GEI
Medidas A1, A2 y A7	8	3891	194	2180	57	183	263	1445
Medida A4	2	5744	58	486	17	81	81	1674
Medida A3	17	5910	366	4643	173	208	208	2641
Medida A5	0	626	8	172	0	6	6	215
TOTAL sector	27	16171	626	7481	247	478	558	5975

La cuantificación de las medidas del sector RCI se ha realizado en conjunto (Tabla 2):

Tabla 2. Cuantificación de la reducción de emisiones y consumo de combustibles asociadas al sector residencial, comercial e institucional (en 2030 respecto a 2018)

Medida	Reducción de emisiones anuales (t, excepto GEI en kt de CO ₂ -equivalente)							
	SO ₂	NO _x	COVNM	CO	NH ₃	PM _{2,5}	PM ₁₀	GEI
Edificios residenciales	633	4176	1343	2213	-	277	278	3448
Servicios	46	742	151	151	-	26	26	691
TOTAL sector	679	4918	1494	1494	-	303	304	4139

También se han cuantificado medidas de otros sectores definidos en la Estrategia, como con son el sector energía, industria y *utilities* y el sector agricultura y medio natural. Las medidas cuantificadas en estos sectores son las listadas a continuación y sus cuantificaciones se resumen en la Tabla 3:

- A25. Reducción de las emisiones difusas de gases fluorados en el sector industrial y comercial.
- A29. Fomento del uso responsable del agua
- A30. Gestión de los residuos basada en un enfoque de economía circular
- A36. Mejora de la eficiencia energética en explotaciones agrarias y maquinaria agrícola
- A38. Reducción de emisiones de metano y amoniaco en el sector ganadero.

Tabla 3. Cuantificación de la reducción de emisiones y consumo de combustibles del resto de sectores (en 2030 respecto a 2018)

Medida	Reducción de emisiones anuales (t, excepto GEI en kt de CO ₂ -equivalente)							
	SO ₂	NO _x	COVNM	CO	NH ₃	PM _{2,5}	PM ₁₀	GEI
A25	-	-	-	-	-	-	-	489
A29		0	3	4	0	0	0	52
A30	1	32	74	16	15	26	26	246
A36	1	207	18	91	0	9	9	37
A38	-	-	-	-	806	-	-	-
TOTAL otros sectores	2	239	95	111	821	35	35	824



4. SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

Una vez evaluada la reducción de emisiones de las medidas cuantificables, se ha procedido a analizar el efecto conjunto de todas ellas en la calidad del aire, con un horizonte temporal 2030. Para ello, se ha simulado de forma simultánea el efecto resultante de la combinación de todas las medidas individuales en la Comunidad de Madrid (incluido el municipio de Madrid). Esta metodología dificulta el análisis del impacto en la calidad del aire de las medidas a nivel individual, pero permite considerar efectos sinérgicos e interrelaciones y, por tanto, proporciona una estimación consistente en cuanto a los niveles de calidad del aire esperables en el futuro. Para ello, se ha utilizado un modelo de simulación de la calidad del aire multi-escala y multi-contaminante que permite obtener las concentraciones de los distintos contaminantes en función de las variaciones de emisión asumidas. El sistema de simulación constituye una herramienta óptima para evaluar las interacciones entre todas las fuentes y ámbitos geográficos, y así proporcionar una visión general de la concentración a nivel regional.

4.1. Metodología: sistema de simulación

La evaluación de la estrategia en términos de calidad del aire se basa en la aplicación de un sistema de modelización de última generación. El sistema está compuesto principalmente por tres modelos, WRF, SMOKE y CMAQ y el esquema conceptual de los flujos de información del sistema se muestran en la Figura 1. El elemento principal del sistema de modelización es el modelo de transporte-químico, Community Multiscale Air Quality (CMAQV5.3.2), desarrollado por parte de la agencia de medio ambiente norteamericana (*United States Environmental Protection Agency, US EPA*) (*Byun and Ching, 1999; Byun and Schere, 2006*). Los datos meteorológicos requeridos por este modelo de transporte y reacción química se obtienen del modelo Weather Research and Forecasting (WRFV4.2.1) – versión *Advanced Research* (WRF-ARW) (*Skamarock and Klemp, 2008*). Es un modelo euleriano (el espacio se discretiza en celdas y las ecuaciones se tratan de forma local) de área limitada, no hidrostático que resuelve las ecuaciones dinámicas fundamentales para un fluido totalmente compresible. Dicho modelo constituye la evolución del *Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)* (*Grell et al., 1994*). Las emisiones se procesan con el sistema Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKEV4.8) para adecuar las emisiones a los requerimientos del modelo de transporte-químico. Este sistema está constituido por un conjunto de algoritmos de alta eficiencia para matrices dispersas y está basado en el paradigma de procesamiento paralelo de emisiones (*UNC Carolina Environmental Program, 2009*).

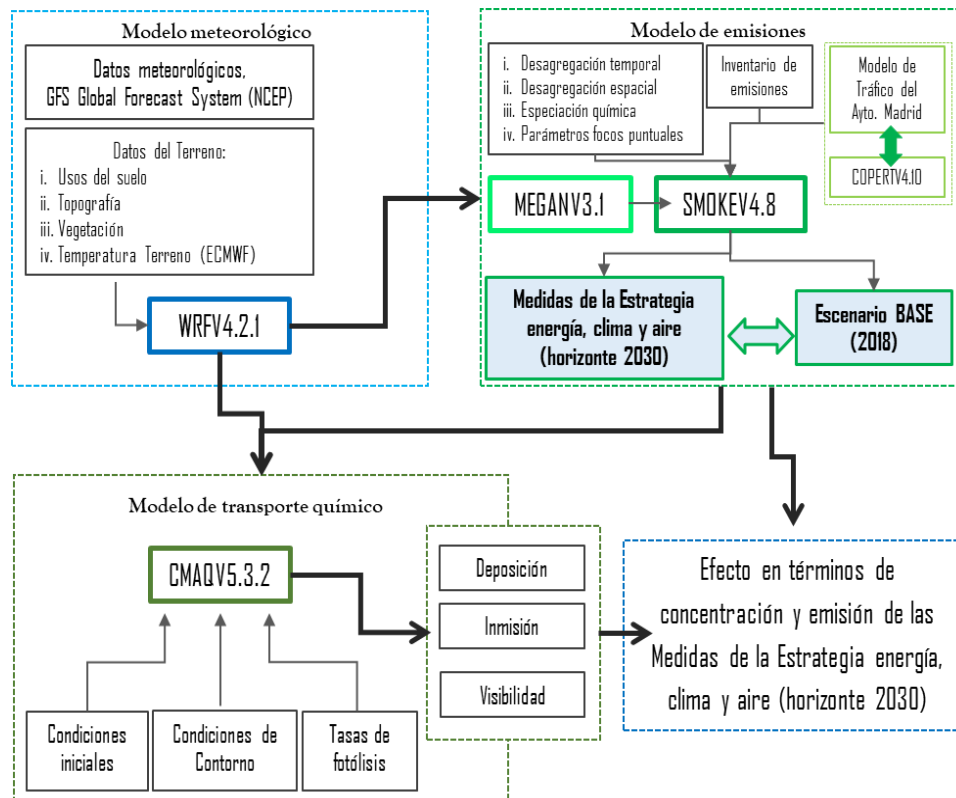


Figura 1. Esquema básico del sistema de simulación de la calidad del aire

Para representar la superficie terrestre se ha empleado una proyección cartográfica cónica conforme Lambert Conformal con $\alpha=20^{\circ}\text{N}$ y $\beta=60^{\circ}\text{N}$; latitudes sin deformación, entre las cuales se sitúa la Península Ibérica. Para la simulación de las variables meteorológicas y obtención de condiciones de contorno fundamentales para este tipo de simulaciones se ha utilizado la habitual estrategia de dominios anidados (Figura 2), con objeto de capturar todas las influencias meteorológicas desde la escala sinóptica o regional hasta los efectos y fuentes locales (Borge et al., 2010).

El dominio D1 comprende toda Europa y el norte de África, con un tamaño de celda de $27 \times 27 \text{ km}^2$, el dominio D2 está centrado en la Península Ibérica y tiene una resolución espacial de $9 \times 9 \text{ km}^2$, el dominio D3 comprende el centro de la Península Ibérica y tiene una resolución de $3 \times 3 \text{ km}^2$. Los dominios más grandes sirven para dar condiciones de contorno a los dominios más pequeños. Por último, el dominio D4 comprende la Comunidad de Madrid y tiene una resolución horizontal de 1 km^2 y unas dimensiones de 136 km en dirección E-O y 144 km en dirección N-S (Figura 2); suficiente para contener la totalidad de la Comunidad de Madrid. Debido a la irregularidad geométrica de la frontera administrativa de la Comunidad de Madrid, el dominio engloba parcialmente las provincias limítrofes.

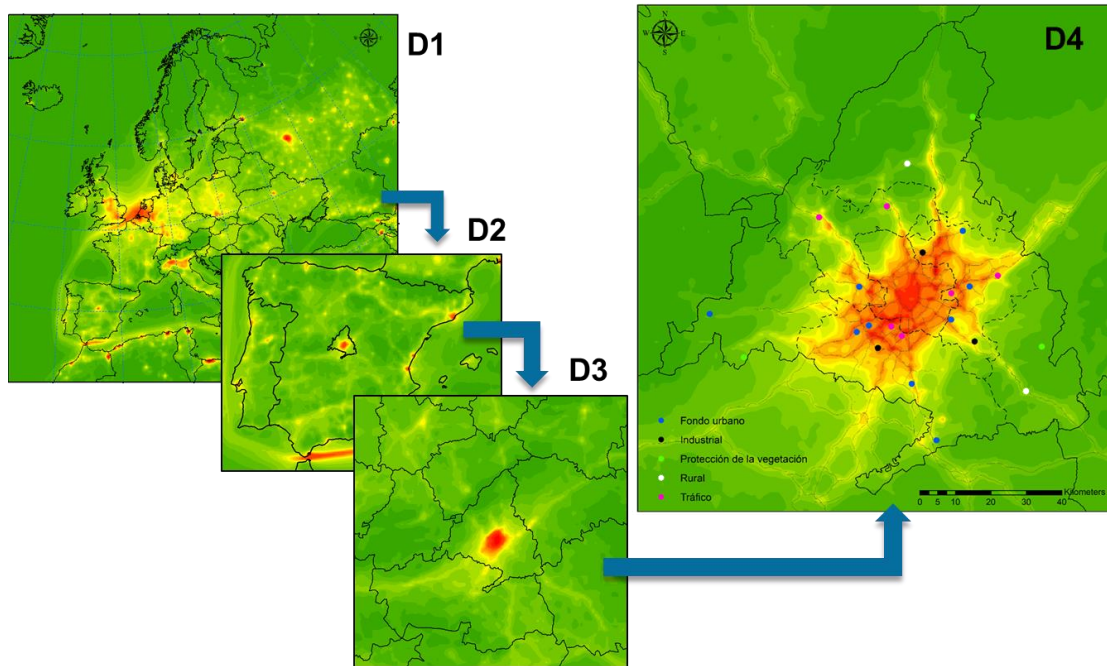


Figura 2. Dominios empleados en la simulación meteorológica. (a) Dominio D1 (27x27 km²), D2 (9x9 km²) y D3 (3x3 km²). (b) Dominio D4 (1 km²), Comunidad de Madrid. Proyección cartográfica cónica Lambert Conformal con $\alpha = 20^{\circ}\text{N}$, $\beta = 60^{\circ}\text{N}$ y $\Upsilon = 3^{\circ}\text{W}$

4.2. Resultados

Todos los resultados mostrados en este apartado se corresponden con las predicciones del sistema de modelización para el dominio D4 representado en la Figura 2. Este punto consta de seis epígrafes en los que se resumen los resultados obtenidos para los parámetros relevantes según la legislación vigente:

- Media anual de NO₂, que no debe exceder 40 µg/m³ para la protección de la salud humana.
- Percentil 99,8 de la serie anual de concentraciones horarias de NO₂ (19º valor más alto), que no debe superar 200 µg/m³.
- Media anual de PM₁₀ cuyo valor límite para la protección de la salud humana es de 40 µg/m³
- Percentil 90,4 de los promedios diarios de PM₁₀, lo que corresponde al 36º valor más alto, que no debe superar 50 µg/m³.
- Media anual de PM_{2,5}, cuyo valor límite para la salud humana se establece en 20 µg/m³.
- Máxima diaria de las medias móviles octohorarias de O₃ que no puede superar en más de 25 ocasiones el valor de 120 µg/m³.

En todos los casos, se muestran las diferencias entre los dos escenarios (escenario 2030 – escenario base) en términos relativos y absolutos, con objeto de analizar los patrones espaciales de las diferencias y así localizar en qué lugar del dominio son más efectivas las medidas adoptadas por la Estrategia. Es importante volver a señalar que las emisiones utilizadas en la modelización para el ámbito geográfico exterior de la Comunidad de Madrid permanecen en los valores del escenario base (año 2018), de tal manera que las variaciones obtenidas son debidas exclusivamente a las medidas regionales y no tienen en cuenta las reducciones de emisiones que pueda haber en el resto de España y Europa.

4.2.1. Media anual de NO₂

Los resultados de la simulación pronostican un claro descenso de los niveles de concentración de NO₂ en 2030 para todo el dominio y más concretamente en el centro de la ciudad de Madrid y en el entorno de las principales vías de comunicación de la Comunidad de Madrid. Esta circunstancia es consecuencia principalmente de la reducción de emisiones de NO_x en el sector del tráfico rodado y RCI (aproximadamente un 67% en 2030 respecto a 2018, para el conjunto de ambos sectores). En la Figura 3 se muestran los valores correspondientes a la media anual (parámetro más restrictivo en relación con el cumplimiento de los valores límite establecidos legalmente y coincidente con el valor guía definido por la OMS) para el escenario base y el año 2030. Examinando los patrones espaciales de ambos mapas, se observa que los niveles de

concentración de NO₂ están dominados principalmente por el tráfico rodado, localizándose los valores más altos en el centro de la ciudad de Madrid.

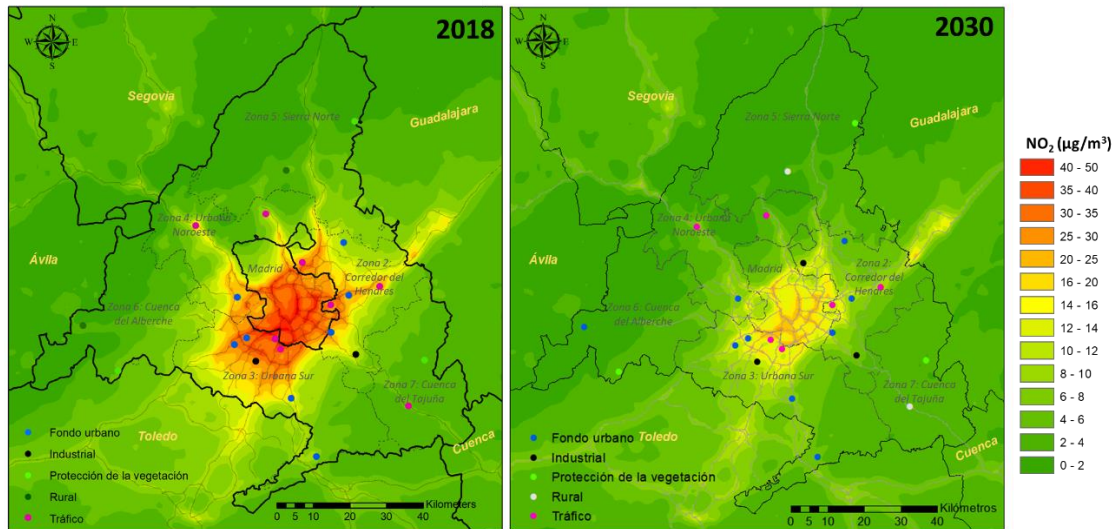


Figura 3. Concentración media anual de NO₂ predicha para el escenario base (izquierda) y el año 2030 (derecha)

La media anual de concentración de NO₂ correspondiente al área total de la Comunidad de Madrid es de 7,5 µg/m³ para el escenario base, que pasaría a 4,0 µg/m³ en el año 2030: descenso del 39,2%, que en términos absolutos equivale a 3,5 µg/m³ (Tabla 4).

La zona de calidad del aire con el promedio anual más alto es la zona 1 (ciudad de Madrid), con un valor de 22,9 µg/m³. En ella también se localiza la mayor reducción de concentración como consecuencia de la aplicación de las diferentes medidas de la Estrategia: descenso de 11,9 µg/m³, equivalente a una reducción porcentual del 52,1%. En algunos puntos del centro de la ciudad esa reducción puede llegar hasta 24 µg/m³ (un 57% de reducción). La segunda zona con mayores concentraciones es la zona 2 (Corredor del Henares), con un promedio anual en 2018 de 11,9 µg/m³, mientras que para el escenario 2030 los niveles de concentración se reducen en torno a 5,8 µg/m³ (-46,4%). En dicha zona se ubica la estación de Coslada la cual incumplió el valor límite anual con 41 µg/m³ durante el año 2018, y según los resultados del modelo registraría reducciones del 54% en 2030. En la Tabla 4 se resumen los resultados para el resto de las zonas, mostrándose las reducciones promedio y máximas.

Tabla 4. Resumen de los principales resultados en relación a la media anual de NO₂ para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio de la zona (escenarios base y 2030), reducción absoluta (media y máxima) y reducción relativa (media y máxima)

Zonificación calidad del aire	Media anual (µg/m ³)		Reducción (Media / Máxima)	
	Base (2018)	2030	Absoluta (µg/m ³)	Relativa (%)
Zona 1: Madrid	22,9	11,0	-11,9/-24,0	-52,1/-56,8
Zona 2: Corredor del Henares	11,9	6,1	-5,8/-17,0	-46,4/-56,6
Zona 3: Urbana Sur	11,8	6,3	-5,5/-22,9	-39,9/-56,4
Zona 4: Urbana Noroeste	7,2	3,4	-3,8/-16,8	-48,4/-57,8
Zona 5: Sierra Norte	2,6	1,5	-1,1/-6,6	-35,3/-56,3
Zona 6: Cuenca del Alberche	3,0	1,8	-1,2/-6,0	-34,8/-53,8
Zona 7: Cuenca del Tajuña	3,5	2,6	-1,0/-2,9	-26,3/-44,3
Comunidad de Madrid	7,5	4,0	-3,6/-24,0	-39,2/-57,8

La Figura 4 ilustra la reducción generalizada de los niveles de concentración de NO₂ esperables en toda la región, tanto en términos absolutos como relativos. La variación más importante en términos absolutos se localiza en el centro de la ciudad de Madrid, muy especialmente donde se presenta una mayor intensidad del tráfico rodado (Calle 30/M30 y M40). En esos puntos, se pueden alcanzar reducciones absolutas de hasta 24 µg/m³, equivalente a una reducción porcentual aproximada del 57%. En las zonas periféricas, las reducciones en términos absolutos son menores, pero porcentualmente son más importantes porque se localizan alrededor de las vías principales (autovías A1, A3 y A6), lejos de cualquier influencia de otra fuente de emisión.

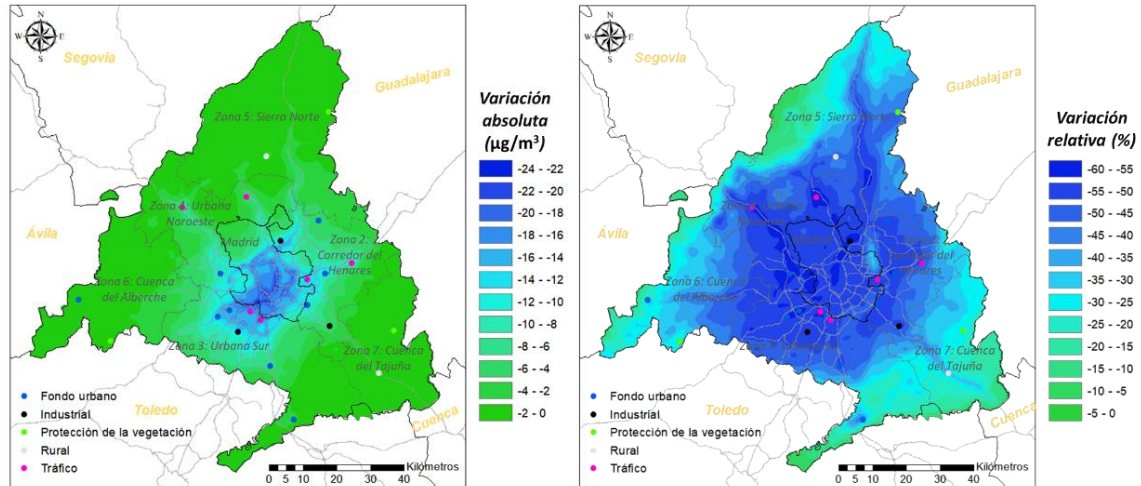


Figura 4. Variación de la concentración media anual de NO₂: absoluta (izquierda) y relativa (derecha)

4.2.2. Percentil horario 99,8 de NO₂

La evolución de los picos de concentración se puede evaluar a través del análisis de la variación pronosticada para el 19º valor horario más alto de la serie anual de concentraciones; es decir, el percentil 99,8 de la serie anual (indicador utilizado para definir el valor límite horario en el Real Decreto 102/2011).

De forma análoga a la media anual, se produce un descenso generalizado (Figura 5), que, como media para el conjunto de la Comunidad de Madrid, alcanza 55,4%, lo que supone una reducción de 28,4 µg/m³ como promedio en valor absoluto. Los patrones espaciales correspondientes al percentil 99,8 están marcados mayoritariamente por la influencia del tráfico rodado y el sector RCI, de tal manera que las concentraciones máximas se localizan en las principales vías del centro de la ciudad (calle 30/M30), con valores máximos que alcanzan 240 µg/m³ en el escenario base y 132 µg/m³ en 2030, lo que supone una reducción de hasta el 80% en los valores altos. En lo que respecta a las variaciones de este indicador entre ambos escenarios, la Figura 6 muestra como los cambios más reseñables en términos absolutos, se producen en el interior del municipio de Madrid, con reducciones máximas que pueden alcanzar 106 µg/m³ en el sector este de la Calle 30/M30, así como en algunas intersecciones importantes de la autovía de circunvalación M40. Como promedio, la reducción en los niveles de concentración de NO₂ dentro de la zona 1 (municipio de Madrid) es igual a 54 µg/m³, lo que equivale a una variación relativa del 46% (Tabla 5).

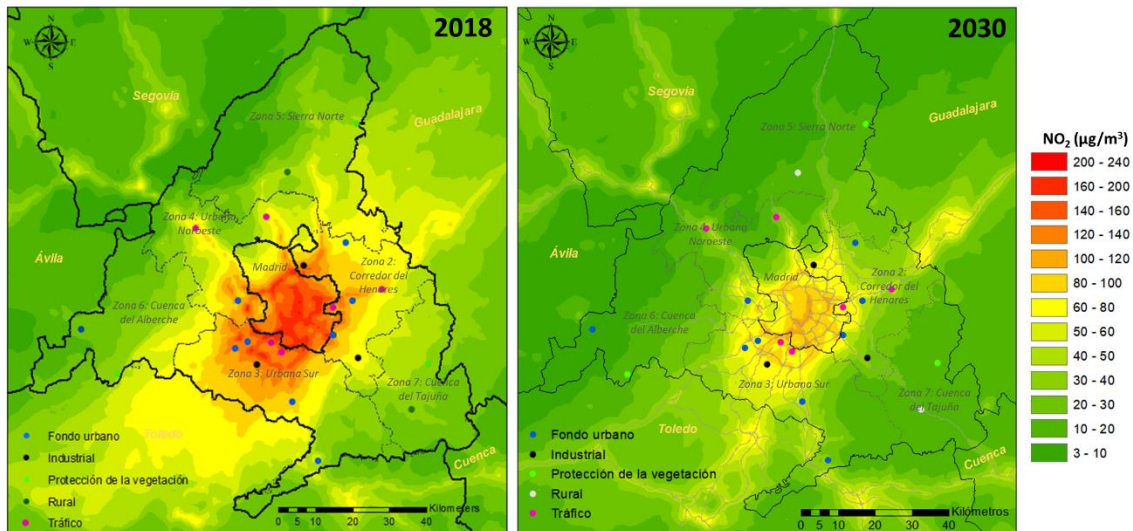


Figura 5. Percentil horario 99,8 de la concentración de NO₂ de la serie anual predicha para el escenario base (izquierda) y 2030 (derecha)

Tabla 5. Resumen de los principales resultados en relación al percentil horario 99,8 de concentración de NO₂ para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio de la zona (escenarios base y 2030), variación absoluta (media y máxima) y variación relativa (media y máxima).

Zonificación calidad del aire	Percentil 99,8 (µg/m ³)		Reducción (Media / Máxima)	
	Base (2018)	2030	Absoluta (µg/m ³)	Relativa (%)
Zona 1: Madrid	123,0	68,9	-54,1/-105,5	-45,9/-69,0
Zona 2: Corredor del Henares	78,0	39,5	-38,5/-66,7	-50,2/-64,4
Zona 3: Urbana Sur	76,6	41,3	-35,3/-86,6	-45,8/-64,1
Zona 4: Urbana Noroeste	54,1	24,0	-30,0/-76,0	-58,1/-71,9
Zona 5: Sierra Norte	30,4	11,2	-19,2/-43,2	-62,4/-73,5
Zona 6: Cuenca del Alberche	32,2	12,0	-20,3/-45,8	-62,9/-70,4
Zona 7: Cuenca del Tajuña	35,3	15,7	-19,7/-33,7	-53,7/-65,0
Comunidad de Madrid	54,8	26,3	-28,4/-105,5	-55,4/-73,5

En las zonas 2 y 3, los promedios en el año base se reducen sustancialmente con respecto a la zona 1, con valores de 78 y 77 µg/m³, y las reducciones obtenidas en 2030 ascienden a 38 y 35 µg/m³, respectivamente. En el caso de la zona 4, los escenarios base y 2030 tienen un promedio del percentil 99,8 igual a 54,1 y 24,0 µg/m³, respectivamente, lo que supone una reducción absoluta entre ellos igual a 30,1 µg/m³ (variación del 58%).

El patrón espacial (Figura 6) muestra que las mayores reducciones porcentuales se producen en la periferia de la ciudad de Madrid. Esto se debe a que los niveles de concentración en estas zonas son más pequeños y la contribución del tráfico, pese a su escasa magnitud, es muy importante, por lo que una pequeña reducción de sus emisiones se traduce en una reducción porcentual importante.

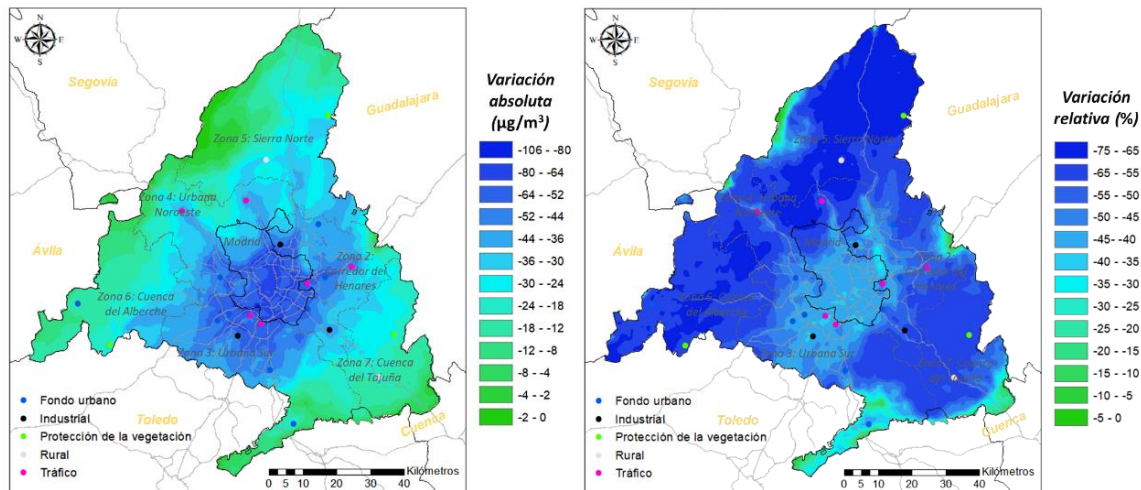


Figura 6. Variación absoluta (izquierda) y relativa (derecha) del percentil horario 99,8 de concentración de NO₂ (19º valor anual más alto)

4.2.3. Media anual de PM₁₀

En la Figura 7 se muestran los valores correspondientes a la media anual de PM₁₀ para el escenario base y el año 2030. Examinando los patrones espaciales de ambos mapas, se observa que los niveles de concentración de PM₁₀ están dominados principalmente por el tráfico rodado. Los máximos de concentración se dan en el centro de la ciudad de Madrid y sobre las principales vías: Calle 30/M30, M40, M50 y algunas de las autovías más importantes (A1, A5 y A6). Así, la zona 1 presenta valores promedio iguales a 14,7 µg/m³ en el escenario base y 13,5 µg/m³ en el año 2030 (Tabla 6). La siguiente zona con mayor concentración es la zona 3, donde los niveles de concentración son de 13,0 y 12,3 µg/m³ (reducción del 5%) en el escenario base y en 2030, respectivamente. Estos niveles se deben en parte a una contribución muy importante del término municipal de Madrid, como consecuencia del transporte de los contaminantes desde la ciudad por efecto de la componente principal de la dirección del viento (NE-SO).

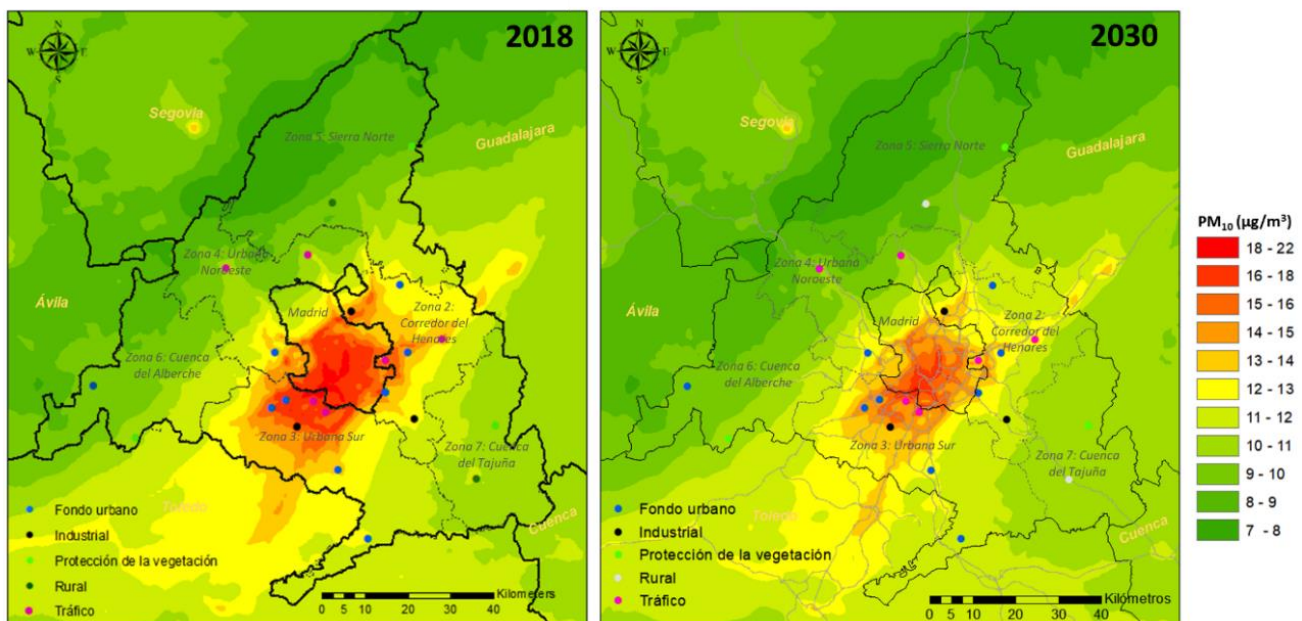


Figura 7. Concentración media anual de PM₁₀ predicha para el escenario base (izquierda) y el año 2030 (derecha)

Tabla 6. Resumen de los principales resultados en relación al promedio anual de concentración de PM₁₀ para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio de la zona (escenarios base y 2030), variación absoluta (media y máxima) y variación relativa (media y máxima).

Zonificación calidad del aire	Media anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Reducción (Media / Máxima)	
	Base (2018)	2030	(Media / Máxima)	
			Absoluta ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Relativa (%)
Zona 1: Madrid	14,7	13,5	-1,2/-2,6	-7,7/-12,7
Zona 2: Corredor del	12,7	11,9	-0,8/-1,7	-6,4/-10,9
Zona 3: Urbana Sur	13,0	12,3	-0,7/-2,4	-5,0/-11,7
Zona 4: Urbana Noroeste	10,3	9,9	-0,4/-1,7	-4,0/-10,0
Zona 5: Sierra Norte	8,9	8,6	-0,3/-0,9	-2,9/-7,2
Zona 6: Cuenca del	9,8	9,6	-0,2/-0,6	-2,3/-4,9
Zona 7: Cuenca del Tajuña	10,9	10,6	-0,3/-0,5	-2,5/-4,5
Comunidad de Madrid	11,0	10,5	-0,5/-2,6	-4,0/-12,7

La Figura 8 muestra las variaciones absolutas y relativas entre ambos escenarios. Se observa como los cambios más importantes se producen en el interior del municipio de Madrid, con una reducción promedio para toda la zona de $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y reducciones máximas de $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en algunos puntos de la Calle 30/M30. En términos relativos, estas variaciones suponen una reducción aproximada del 8% como promedio y reducciones máximas del 13% en algunos puntos del interior del municipio. En las zonas 2, 3 y 4, las reducciones son muy similares, variando entre un 4 y un 6% como promedio en la zona (reducciones máximas del 11,7%). En el resto de las zonas (5, 6 y 7), las reducciones son menores, variando entre un 2,3 y un 4,0%. Para el conjunto de la Comunidad de Madrid, la reducción promedio de los niveles de concentración de PM₁₀ es del 4,0%.

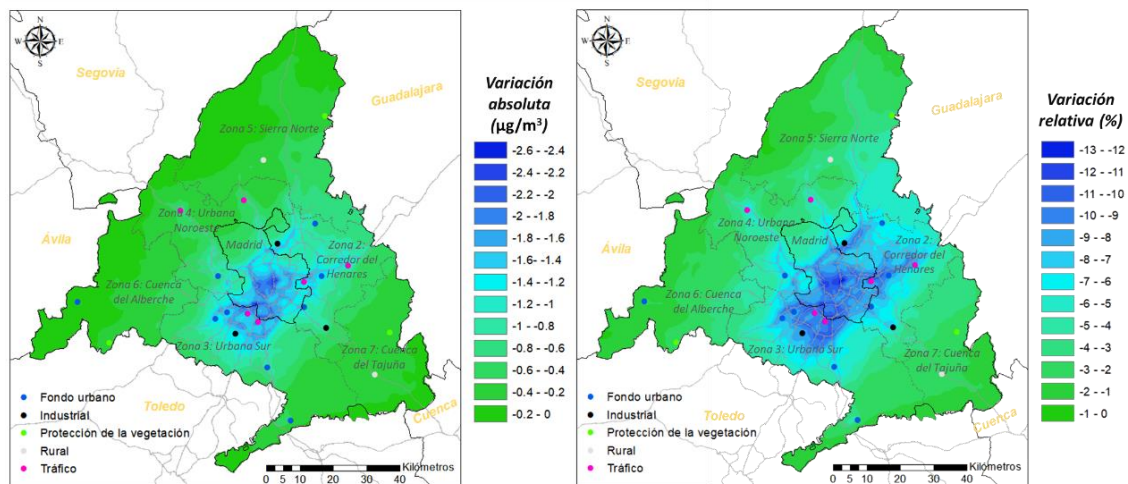


Figura 8. Variación de la concentración media anual de PM₁₀: absoluta (izquierda) y relativa (derecha)

4.2.4. Percentil diario 90,4 de PM₁₀

Para completar el estudio de los niveles de inmisión de PM₁₀, en este apartado se analiza el otro índice propuesto por la legislación en materia de calidad del aire; el valor límite diario de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, del cual tan solo se permiten 35 superaciones en un año civil. Así, la Figura 9 muestra el trigésimo sexto promedio diario más alto, es decir el percentil diario 90,4 de la serie anual. En ambos escenarios (base y 2030) se observa un patrón espacial muy marcado por la influencia del término

municipal de Madrid sobre las áreas adyacentes, como consecuencia de la presencia de la componente principal de la dirección del viento (NE-SO), determinada por la presencia del Sistema Central (Sierra de Guadarrama). Adicionalmente, se suma el efecto provocado por la presencia de importantes zonas urbanas al SO de la ciudad de Madrid, las cuales son importantes focos de emisiones procedentes del tráfico rodado y del sector RCI. Para el conjunto de la Comunidad de Madrid, el percentil 90,4 de concentración para los escenarios base y 2030 son, respectivamente, 21 y 19,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que equivale a una reducción promedio del 5,6%. La concentración en la zona 1 sigue el patrón espacial marcado por el tráfico rodado, con valores promedio situados en 27,9 y 25,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los escenarios base y 2030, respectivamente (una reducción de un 8,2%, y reducciones máximas del 14,7% en algunas localizaciones puntuales). En las zonas 2 y 3, estos percentiles para los escenarios base y 2030 son, respectivamente, 23,3 y 21,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y 24,7 y 23,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para cada una de las dos zonas. Por tanto, se obtienen reducciones porcentuales medias alrededor del 6 - 8%, presentándose en algunas localizaciones, dentro de estas zonas, reducciones máximas del 14% (hasta 4,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de reducción en términos absolutos). Las reducciones en el resto de las zonas se muestran en la Tabla 7.

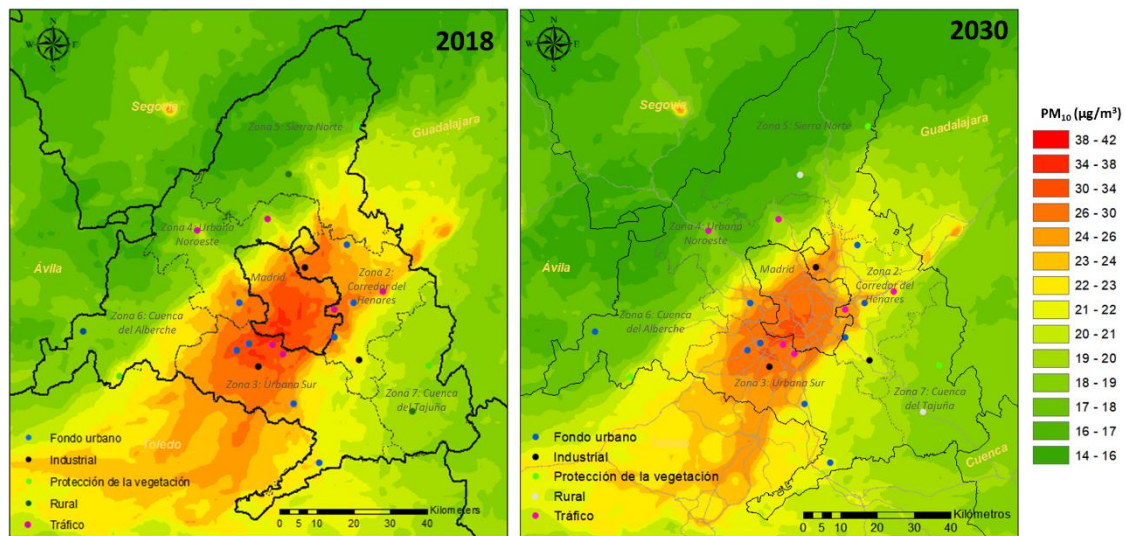


Figura 9. Percentil diario 90,4 de concentración de PM₁₀ de la serie anual predicha para el escenario base (izquierda) y el año 2030 (derecha)

Tabla 7. Resumen de los principales resultados en relación al percentil diario 90,4 de concentración de PM₁₀ para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio en cada zona (escenarios base y 2030), variación absoluta (media y máxima) y variación relativa (media y máxima).

Zonificación calidad del aire	Percentil 90,4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Reducción	
	Base (2018)	2030	(Media / Máxima)	
			Absoluta ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Relativa (%)
Zona 1: Madrid	27,9	25,5	-2,4/-4,9	-8,2/-14,7
Zona 2: Corredor del Henares	23,3	21,5	-1,9/-4,2	-7,8/-14,0
Zona 3: Urbana Sur	24,7	23,1	-1,6/-4,7	-6,0/-13,9
Zona 4: Urbana Noroeste	19,9	18,7	-1,2/-3,1	-6,0/-12,7
Zona 5: Sierra Norte	17,5	16,6	-1,0/-3,1	-5,2/-13,5
Zona 6: Cuenca del Alberche	18,9	18,1	-0,8/-2,7	-4,3/-11,5
Zona 7: Cuenca del Tajuña	19,4	18,7	-0,7/-1,6	-3,5/-7,8
Comunidad de Madrid	21,0	19,7	-1,3/-4,9	-5,6/-14,7

La Figura 10 recoge las variaciones entre los escenarios evaluados y permite observar como su distribución espacial viene determinada por la influencia del tráfico rodado y por el transporte de los contaminantes hacia el suroeste desde el centro de la ciudad.

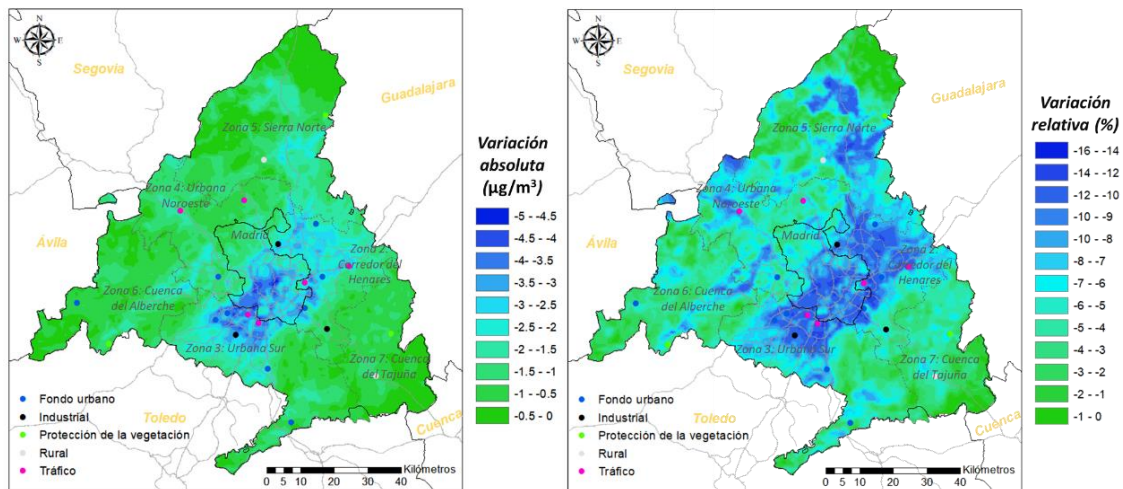


Figura 10. Variación absoluta (izquierda) y relativa (derecha) del percentil diario 90,4 de concentración de PM₁₀ (36º valor anual más alto)

4.2.5. Media anual de PM_{2,5}

En cuanto a los resultados obtenidos para PM_{2,5}, la simulación pronostica un descenso en 2030 en todo el dominio de simulación y especialmente en el centro de las aglomeraciones urbanas y en el entorno de las principales vías de comunicación de la Comunidad de Madrid. Como se muestra en la Figura 11, el patrón espacial de los niveles de concentración en ambos escenarios (base y 2030) es muy parecido al promedio anual de PM₁₀, dado que las principales fuentes de emisión son las mismas, el tráfico rodado y el sector RCI. Como sucede con el resto de los contaminantes, la presencia del Sistema Central determina el patrón de vientos de acuerdo a un eje NE-SO, produciendo una franja con niveles de concentración más altos según esta dirección. Para el conjunto de la Comunidad de Madrid, la reducción promedio de los niveles de concentración de PM_{2,5} es de 0,4 µg/m³ (un 6%). El promedio anual de concentración de PM_{2,5} en la zona 1 se reduce de 8,1 µg/m³ para el escenario base, a 7,2 µg/m³ para el año 2030, suponiendo una reducción promedio en la zona del 11% (reducciones máximas en algún punto de la zona del 17,8%). Las reducciones absolutas promedio en las zonas 2, 3 y 4 varían entre 0,3 - 0,6 µg/m³, con una reducción puntual máxima en la zona 3 de 2 µg/m³ (un 16% en términos relativos). En el resto de las zonas, la reducción media en términos absolutos es muy pequeña para el total de cada zona (Tabla 8).

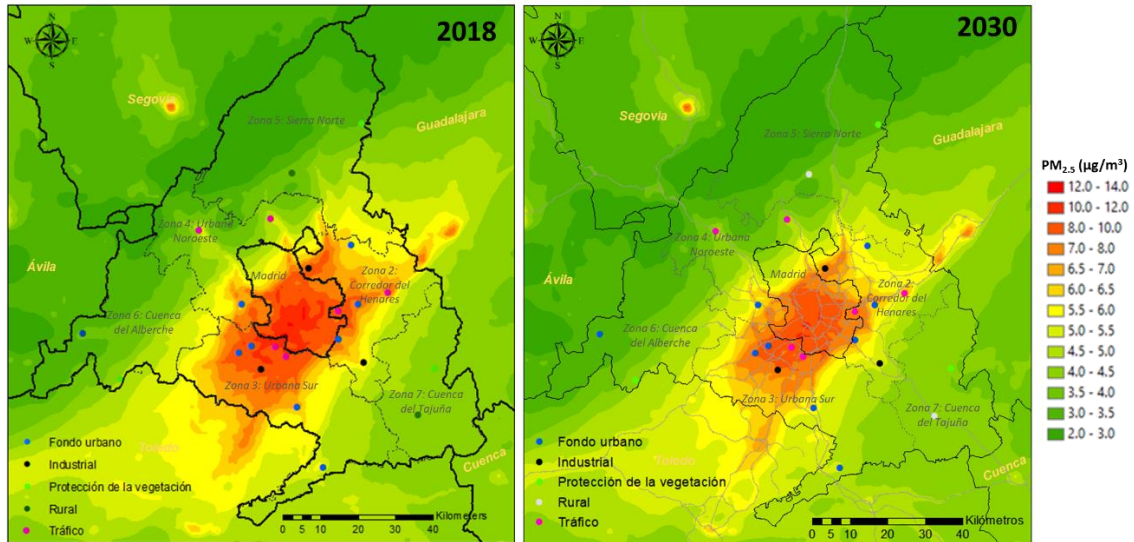


Figura 11. Concentración media anual de PM_{2,5} predicha para el escenario base (izquierda) y el año 2030 (derecha)

Tabla 8. Resumen de los principales resultados en relación al promedio anual de concentración de PM_{2,5} para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio para cada zona (escenario base y 2030), variación absoluta (media y máxima) y variación relativa (media y máxima).

Zonificación calidad del aire	Media anual (µg/m ³)		Reducción (Media / Máxima)	
	Base (2018)	2030	Absoluta (µg/m ³)	Relativa (%)
	Zona 1: Madrid	8,1	7,2	-0,9/-2,2
Zona 2: Corredor del	6,2	5,6	-0,6/-1,4	-10,1/-15,9
Zona 3: Urbana Sur	6,3	5,8	-0,5/-2,0	-7,9/-16,2
Zona 4: Urbana Noroeste	4,5	4,2	-0,3/-1,4	-5,9/-13,9
Zona 5: Sierra Norte	3,4	3,3	-0,2/-0,7	-4,2/-11,2
Zona 6: Cuenca del	3,9	3,7	-0,1/-0,4	-3,2/-7,7
Zona 7: Cuenca del Tajuña	4,4	4,2	-0,2/-0,4	-4,3/-7,9
Comunidad de Madrid	4,9	4,6	-0,4/-2,2	-6,1/-17,8

La Figura 12 muestra las variaciones entre los dos escenarios evaluados y permite observar como los cambios más importantes, tanto en términos absolutos como relativos, se producen en el interior del municipio de Madrid y sobre las principales vías de comunicación.

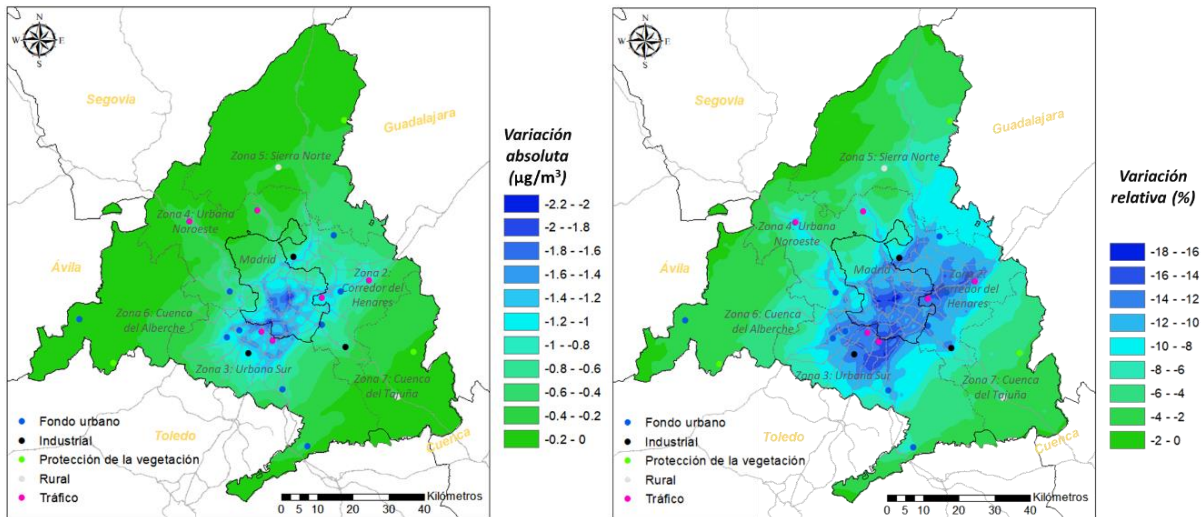


Figura 12. Variación de la concentración media anual de PM_{2,5}: absoluta (izquierda) y relativa (derecha)

4.2.6. Percentil diario 93,2 de O₃

El valor objetivo para la protección de la salud humana para este contaminante (O₃) se representa mediante la máxima diaria de las medias móviles octohorarias, parámetro que no puede superar en más de 25 ocasiones el valor de 120 µg/m³, representado mediante el percentil 93,2 de la serie diaria. En la Figura 13 se muestran los mapas para ambos escenarios. El patrón espacial de este índice, indica que los máximos de concentración de O₃ (>120 µg/m³) se localizan principalmente alejados de las principales fuentes de emisión (tráfico y residencial) fuera del municipio de Madrid. En cuanto a los resultados obtenidos, la simulación pronostica un descenso muy moderado en 2030 de 1,4 µg/m³ como promedio en la Comunidad de Madrid, y reducciones máximas de 4,6 µg/m³. Estas reducciones se dan principalmente en las zonas periféricas de la ciudad. No obstante, por la propia dinámica fotoquímica del ozono, y a pesar de la reducción de emisiones de sus precursores, existe un aumento de la concentración promedio en la zona 1 (Madrid) de 0,4 µg/m³ y máximos de hasta 6,5 µg/m³. La literatura científica ha estudiado los posibles factores implicados, atribuyéndoselo al decrecimiento de las emisiones de NO_x (NO₂ + NO), el cual ha ido acompañado por una disminución mayor del NO (descenso en la relación NO/NO₂), provocando menos consumo de O₃ por parte del NO para oxidarse a NO₂. Este proceso se muestra en las cuatro primeras zonas, de carácter claramente urbano, en donde existen puntos en los que se reducen las concentraciones de O₃ (3,0 – 4,6 µg/m³) y otros lugares donde aumentan (4,0 – 7,5 µg/m³), especialmente en las principales vías de comunicación donde las emisiones de NO_x son mayores.

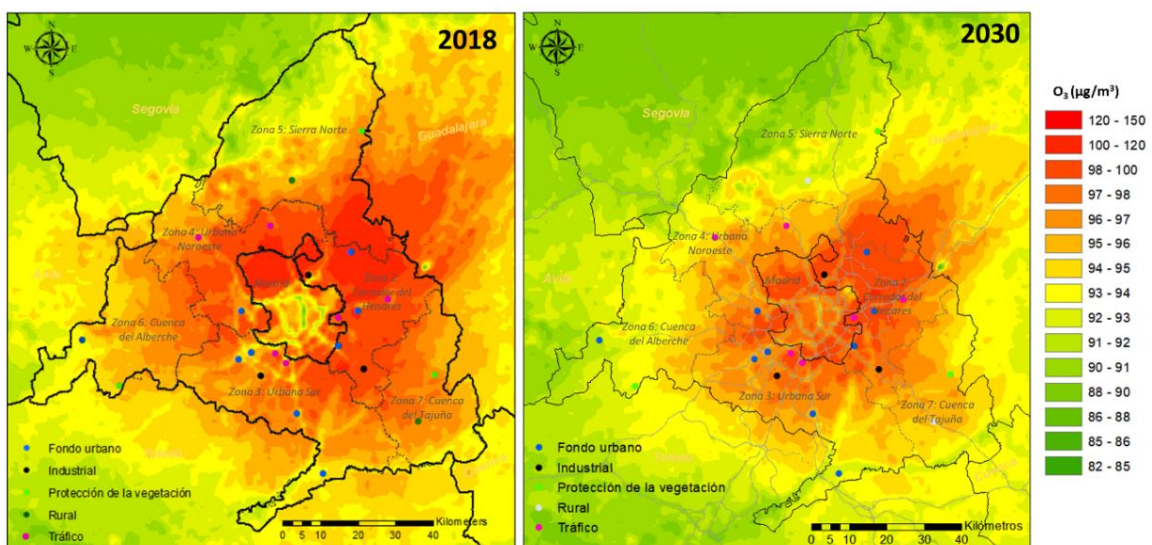


Figura 13. Percentil diario 93,2 de concentración de O₃ predicha para el escenario base (izquierda) y el año 2030 (derecha)

Tabla 9. Resumen de los principales resultados en relación al percentil diario 93,2 de concentración de O₃ para cada zona y para el conjunto de la Comunidad de Madrid: promedio para cada zona (escenario base y 2030), variación absoluta (media / mínima y máxima) y variación relativa (media / mínima y máxima).

Zonificación calidad del aire	Percentil 93,2 (µg/m ³)		Variación (Media / Mínima/ Máxima)	
	Base (2018)	2030	Absoluta (µg/m ³)	Relativa (%)
Zona 1: Madrid	97,0	97,5	0,4/-4,6/6,5	0,5/-4,5/7,5
Zona 2: Corredor del	99,1	97,9	-1,2/-3,5/3,8	-1,2/-3,4/4,1
Zona 3: Urbana Sur	96,0	95,5	-0,6/-3,0/6,0	-0,6/-3,1/6,7
Zona 4: Urbana Noroeste	97,3	95,2	-2,1/-4,4/4,1	-2,1/-4,3/4,5
Zona 5: Sierra Norte	94,9	92,8	-2,1/-4,1/-0,5	-2,3/-4,2/-0,5
Zona 6: Cuenca del	95,4	93,6	-1,8/-3,5/-0,1	-1,9/-3,6/-0,1
Zona 7: Cuenca del Tajuña	96,2	94,9	-1,3/-2,6/-0,1	-1,3/-2,6/-0,1
Comunidad de Madrid	96,3	94,9	-1,4/-4,6/6,5	-1,4/-4,5/7,5

* Los valores en rojo indican incremento de las concentraciones de ozono y en negro, reducción

La Figura 14 muestra las variaciones entre ambos escenarios. Se observan claramente los incrementos en los niveles de ozono en el centro de la ciudad y en las principales vías de comunicación y una reducción generalizada en la periferia.

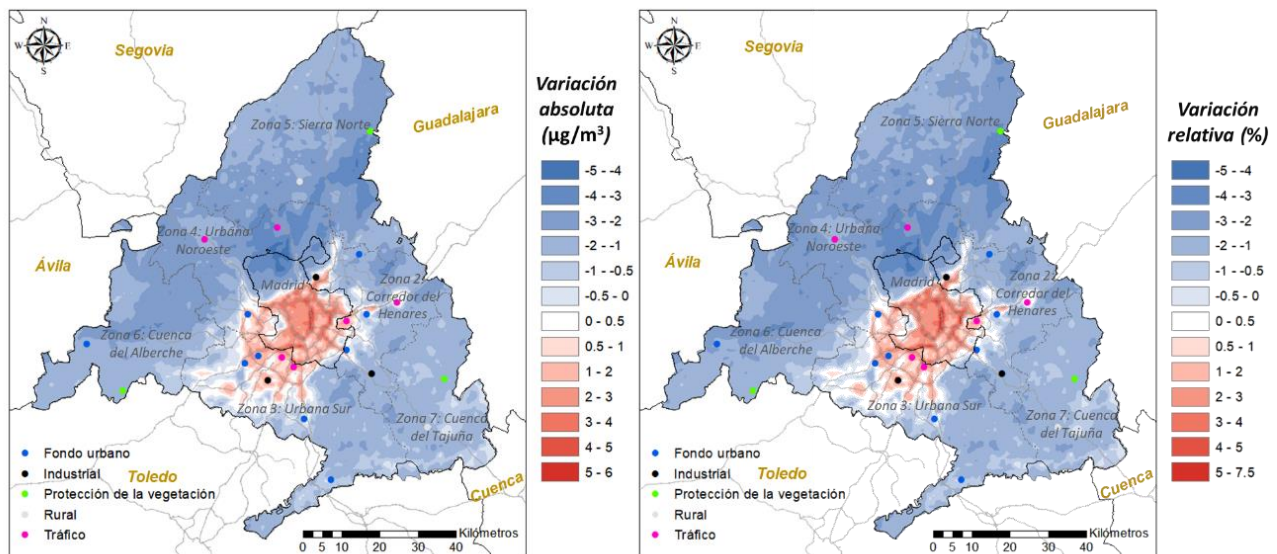


Figura 14. Variación de la concentración del percentil 93,2 de O₃: absoluta (izquierda) y relativa (derecha)

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente estudio se sintetizan dos aspectos fundamentales inherentes a la aplicación de las medidas definidas en la Estrategia. Por un lado, el impacto en la reducción de emisiones y, por otro, el impacto que tendría sobre la calidad del aire y más concretamente sobre los niveles de concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}) y ozono (O₃).

En primer lugar, en la Tabla 10 se resumen las emisiones del escenario planteado (año 2030) y las reducciones con respecto al año base 2018. El escenario planteado considera reducciones sustanciales en las emisiones en los sectores del tráfico rodado y RCI, que son los mayores contribuyentes a las emisiones atmosféricas en la Comunidad de Madrid, tanto para la emisión de GEI como de compuestos relevantes para la calidad del aire. En conjunto, las emisiones de GEI en 2030 serían aproximadamente la mitad que las de 2018, lo que sería compatible con una repercusión proporcional de los objetivos a nivel nacional y también consistente con la planificación en materia de mitigación del cambio climático del Ayuntamiento de Madrid. La reducción de emisiones de NO_x tendría un orden de magnitud similar, mientras que el impacto para el resto de los contaminantes sería en general inferior al 20%.

Tabla 10. Resumen de emisiones bajo el escenario planteado

Sector	Reducción de emisiones anuales y total estimado para 2030 (t, excepto GEI en kt de CO ₂ -equivalente)							
	SO ₂	NO _x	COVNM	CO	NH ₃	PM _{2,5}	PM ₁₀	GEI
Transporte Rodado	27	16171	626	7481	247	478	558	5975
RCI	679	4918	1494	2569	-	303	304	4139
Otros	2	239	95	111	821	35	35	824
Total	709	21327	2215	10161	1068	816	897	10938
Emisiones en 2030	6185	20117	48246	42124	3972	4014	5871	10922
Variación (en % respecto a 2018)	-10,3	-51,5	-4,4	-19,4	-21,2	-16,9	-13,3	-50,0

La fila total difiere en algunos casos de la suma de las cifras indicadas para cada sector porque no se muestran decimales.

En segundo lugar, el estudio ha evaluado la mejora esperable en relación con la calidad del aire como consecuencia de la aplicación de todas las medidas cuantificables de la Estrategia. Este análisis se ha llevado a cabo mediante el uso de un sistema de simulación de la calidad del aire (multi-escala y multi-contaminante), que ha permitido analizar la variación de los niveles de concentración de NO₂, de material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}) y O₃) como consecuencia de la aplicación de las medidas contempladas. Para ello se han simulado dos escenarios: un escenario base (año 2018) que representa el estado previo a la aplicación de las medidas contempladas en la Estrategia, y un escenario 2030, que incluye su implementación. Es importante señalar que las variaciones de concentración predichas se asocian al efecto de la Estrategia, que se aplica

solamente en la Comunidad de Madrid, de tal manera que para tener una estimación más realista de los cumplimientos de los valores límite sería necesario considerar reducciones en otros ámbitos geográficos.

En lo que respecta al NO_2 , los resultados más relevantes muestran una reducción de la concentración media anual del 40% como promedio en la Comunidad de Madrid y reducciones máximas de hasta el 58%. En el caso de los valores altos (percentil horario 99,8) la reducción promedio en la Comunidad de Madrid es del 55% con máximos de 73%. Esto tiene implicaciones importantes para las zonas y estaciones donde pueden producirse superaciones de los valores límite anuales y horarios y más aun teniendo en cuenta los valores límite más restrictivos de la propuesta de futura directiva de calidad del aire, así como de los valores guía propuestos por la OMS. Por ejemplo, la Figura 15a muestra la concentración de excedencia (expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sobre el valor actualmente recogido en la propuesta de futura directiva, que fija en $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en nuevo valor para la media anual. Se observa que en las zonas con altas concentraciones (centro de ciudad y vías de comunicación) los resultados son perfectamente compatibles con los valores límite actuales y que están muy próximos al cumplimiento de la nueva propuesta. En el caso de valores más restrictivos como los recomendados por la OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), el escenario 2030 los excedería en más de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para algunas localizaciones, tal y como se muestra en la Figura 15b.

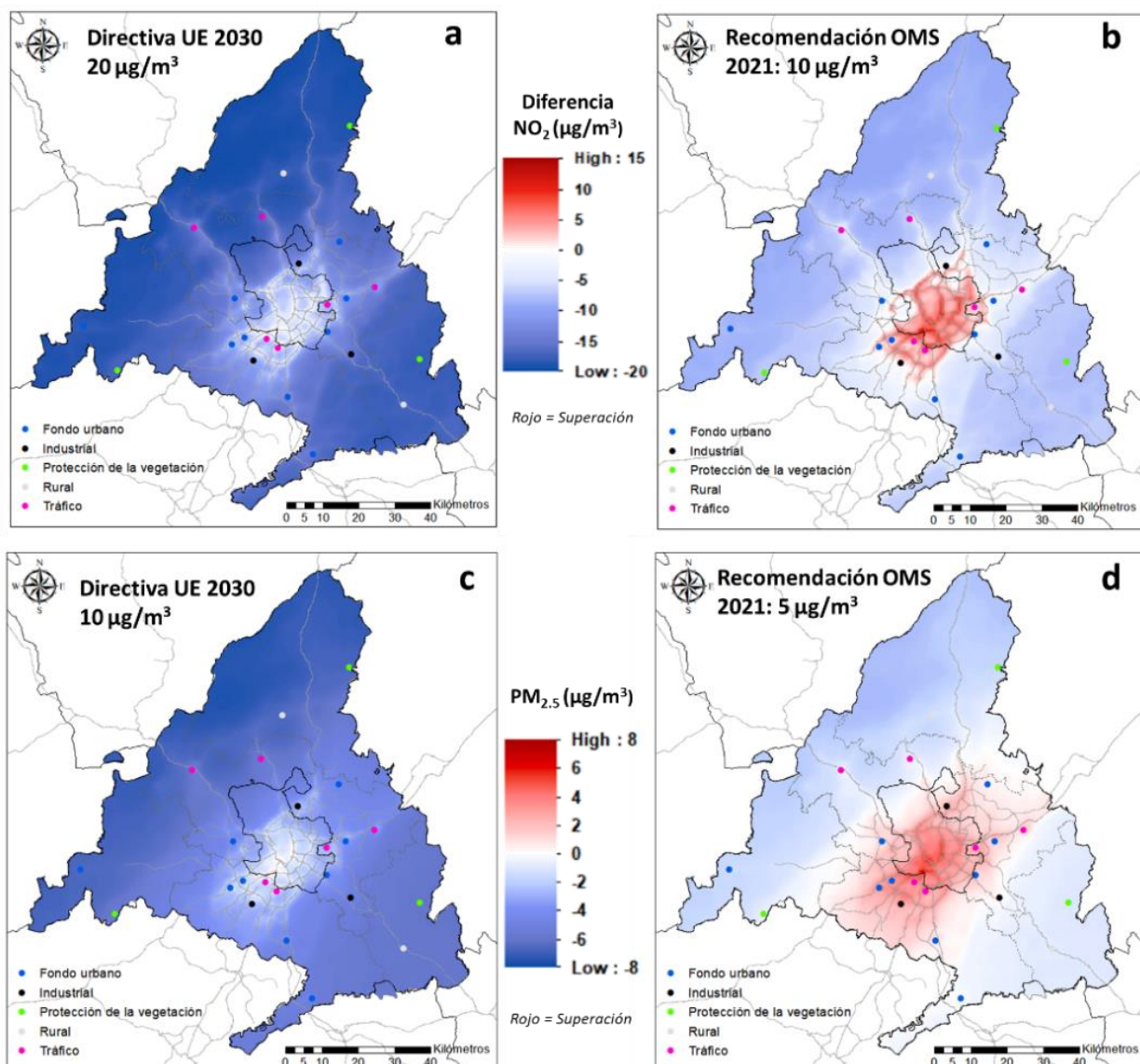


Figura 15. Superación de los valores límite del escenario 2030 establecidos por la propuesta de nueva Directiva 2030 (a) y por las recomendaciones de la OMS (b) para la media anual de NO_2 y para la media anual de $\text{PM}_{2,5}$ (c) y (d)

En el caso del material particulado, la reducción de los niveles de concentración de PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ como consecuencia de la aplicación de las medidas también es evidente. En el caso de fracción PM_{10} , la reducción promedio de los niveles de concentración es del 4% para el conjunto de la Comunidad de Madrid. No obstante, se producen mayores reducciones,



entorno a un 13%, en aquellas zonas donde los niveles de concentración son más altos, lo que supone disminuciones en la concentración de hasta $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como media anual. En lo que respecta al percentil 90,4 de concentración de PM_{10} , la reducción promedio en la Comunidad de Madrid es del 5,6%, con máximos del 15%. En cuanto a la fracción $\text{PM}_{2,5}$, la mejora es ligeramente mayor que en el caso de la fracción PM_{10} , alcanzándose una reducción media para el conjunto de la Comunidad de Madrid de un 6,1% y reducciones máximas del 18%, lo que supone hasta $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como media anual en algunos puntos de la región. Estas reducciones permiten que se registren en las zonas con concentración más elevadas (centro ciudad y principales vías de comunicación) valores muy próximos a los valores límite propuestos por la propuesta de nueva directiva, que fija el valor límite en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 15c). Si este mismo análisis se realiza considerando los valores recomendados por la OMS ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), las concentraciones predichas por el modelo lo excederían hasta en $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para algunas localizaciones (Figura 15d), alejando a la región de su cumplimiento.

En cuanto a la superación del número de días con medias octohorarias mayores de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el O_3 , la variación entre simulaciones es poco significativa. El impacto de la Estrategia se traduce en una reducción como promedio en la Comunidad de Madrid del 1,5% y reducciones máximas del 4,6%. Estas reducciones se producen principalmente en lugares donde los niveles de concentración de O_3 son altos (periferia de ciudad y zonas rurales). Cabe señalar que el estudio de contribución de fuentes realizado en el marco de este convenio concluye que la mayor contribución se debe a las condiciones de contorno, entorno al 59%, lo que quiere decir que las concentraciones de O_3 se deben en gran parte al transporte de este contaminante desde áreas fuera del dominio de simulación, lo que supone una limitación importante para el planteamiento de medidas locales eficaces para reducir los niveles de este compuesto. Por el contrario, se podrían producir ligeros aumentos de concentración en el centro de la ciudad de Madrid; no obstante, a pesar de este ligero aumento, es descartable a priori cualquier tipo de superación en estas zonas.

Teniendo en cuenta las reducciones previstas para los indicadores analizados, se puede concluir que la implementación efectiva de la Estrategia es compatible con el cumplimiento de los valores de calidad del aire en todas las zonas gestionadas por la Comunidad de Madrid y permitiría aproximarse a los valores límite de la actual propuesta de futura Directiva europea de calidad del aire a 2030. No obstante, es importante señalar que para tener una estimación más realista de los cumplimientos sería necesario considerar reducciones en otros ámbitos geográficos.

En el caso del ozono y dadas sus particularidades, el análisis de posibles medidas debe basarse en estudios específicos del efecto de reducciones de emisiones concretas bajo las condiciones meteorológicas que típicamente se asocian a los picos de concentración de este compuesto.



REFERENCIAS

- Borge R, López J, Lumbreras J, Narros A, Rodríguez ME., 2010. Influence of boundary conditions on CMAQ simulations over the Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment* 44, 2681-2695.
- Byun, D.W., Ching, J.K.S., 1999. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA/600/R-99/030, US EPA National Exposure Research Laboratory, Research Triangle Park, NC.
- Byun, D.W., Schere, K.L., 2006. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 community.
- Grell, G.A., Dudhia, J., Stauffer, D.R., 1994. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model. NCAR Technical Note NCAR/TN-398+STR, 122pp.
- Institute for the Environment. SMOKE v2.7 user's manual. Chapel Hill, NC: University of North Carolina; 2009 [Available online at: <http://www.smoke-model.org/version2.7/html/cho1.html>].
- Institute for the Environment. SMOKE v3.6.5 user's manual. Chapel Hill, NC: University of North Carolina; 2015.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., 2008. A time-split nonhydrostatic atmospheric model. *Journal of Computational Physics* 227, 3465-3485.