

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Transición hacia un aire más limpio en España

Proyecto TRANSAIRE



CONAMA 2024

TRANSICIÓN HACIA UN AIRE MÁS LIMPIO EN ESPAÑA (PROYECTO TRANSAIRE)

Autor Principal: Mark Richard Theobald (CIEMAT)

Otros autores: Marta Garcia Vivanco (CIEMAT); Victoria Gil Alfonso (CIEMAT); Juan Luis Garrido (CIEMAT); Yolanda Lechón Pérez (CIEMAT); Ana Gamarra Rodriguez (CIEMAT); Manuel Pujadas Cordero (CIEMAT); Elías Díaz Ramiro (CIEMAT); Ignacio Gonzalez Fernandez (CIEMAT); Rocío Alonso del Amo (CIEMAT); Victoria Bermejo Bermejo (CIEMAT); José Luis Santiago (CIEMAT); Coralina Hernandez Trujillo (CIEMAT); Beatriz Sánchez (CIEMAT); Esther Rivas (CIEMAT); Alberto Martilli (CIEMAT); Alejandro Rodríguez (CIEMAT); Almudena Bailador (CIEMAT); Eugenio Sánchez (CIEMAT); Fernando Martín Llorente (CIEMAT); Isaura Rabago Juan-Aracil (CIEMAT); Francisco Javier Alarcón Luque (CIEMAT); Alberto Sanz Cobeña (Universidad Politécnica de Madrid); Luis Lassaletta (Universidad Politécnica de Madrid); Almudena Muñoz Gallego (Universidad Complutense de Madrid); José Antonio Jiménez de las Heras (Universidad Complutense de Madrid); Ricardo Jimeno Aranda (Universidad Complutense de Madrid)

ÍNDICE

1. Título
2. Resumen
3. Introducción
4. Estudio de impactos de los distintos sectores emisores
5. Diseño y evaluación de medidas de reducción de emisiones
6. Estimación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles procedentes de productos domésticos
7. Próximos pasos
8. Agradecimientos
9. Bibliografía

TITULO: TRANSICIÓN HACIA UN AIRE MÁS LIMPIO EN ESPAÑA (PROYECTO TRANSAIRE)

RESUMEN

A pesar de una mejora generalizada de la calidad del aire en las últimas décadas, en España se registran todavía superaciones frecuentes y generalizadas del valor objetivo de ozono (O₃) troposférico establecido en la legislación vigente, así como elevadas concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂) y material particulado. Con la **nueva Directiva Europea** relativa a la calidad del aire ambiente se harán necesarias medidas adicionales para cumplir con los nuevos y más exigentes estándares de calidad del aire. El proyecto **TRANSAIRE** (Transición hacia un aire más limpio en España) tiene como objetivo el diseño de estrategias a nivel nacional para lograr un aire más limpio en España. El proyecto tiene tres objetivos: 1) Entender cómo contribuyen las emisiones nacionales sectoriales a los niveles de concentración de diferentes contaminantes; 2) Examinar el potencial de mejora de la calidad del aire asociado a diferentes medidas de reducción de emisiones y sus correspondientes efectos en salud y vegetación; y 3) Difundir los resultados del proyecto y facilitar la elaboración de programas de mejora de la calidad del aire.

La herramienta principal empleada en TRANSAIRE es la **modelización de la calidad del aire**; mediante la aplicación de un modelo de química y transporte se busca la identificación de los **sectores emisores con mayor impacto** en los problemas de calidad del aire en España, así como la simulación de estrategias de reducción de las emisiones de los principales sectores de producción de energía, combustión industrial y residencial, disolventes, tráfico y agricultura. A partir de los resultados de la modelización, también se realiza un análisis del **impacto de la**

contaminación atmosférica en la salud y la vegetación, tanto en el escenario actual, como en los escenarios planteados para cada sector. Se incluye también entre los objetivos del proyecto la **estimación de los costes derivados de los impactos en salud**, como son aquellos asociados a la mortalidad por la exposición a la contaminación atmosférica. Los resultados de TRANSAIRE serán difundidos a la comunidad científica, a la sociedad general y a las administraciones públicas, a través de artículos científicos, artículos de divulgación, presentaciones en foros relevantes y la publicación de videos que resuman los principales resultados del proyecto.

Los resultados del análisis de los impactos sectoriales indican que **el tráfico rodado produce el mayor impacto en las concentraciones de NO₂**, aunque otros sectores como la combustión industrial y residencial, y también la agricultura, contribuyen también a estos impactos. Estos mismos sectores tienen también impactos en las concentraciones de partículas finas (PM_{2.5}), aunque en este caso, el sector residencial es el más importante en las grandes ciudades. En cuanto al ozono (O₃), las estimaciones del modelo indican el mayor peso que tienen las concentraciones de fondo en los valores de ozono, con otras contribuciones, como las de los sectores de tráfico rodado, tratamiento de residuos y transporte marítimo internacional. Los resultados de las simulaciones de las estrategias indican que **las medidas enfocadas en el sector del transporte (mayor uso de vehículos eléctricos) son las que presentan un mayor potencial de reducción de la concentración de NO₂**, incluso teniendo en cuenta el aumento del consumo eléctrico asociado. Los resultados también indican un potencial aumento de la concentración en aire de benzo(a)pireno cuando se considera un mix eléctrico futuro (2030), en el que se prevé un aumento de la combustión de biomasa, aunque existen muchas incertidumbres sobre la localización de instalaciones de quema de biomasa.

INTRODUCCIÓN

El proyecto TRANSAIRE (2022-2024) ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades / Agencia Estatal de Investigación y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR. El proyecto está coordinado por investigadores de la Unidad de Modelización Atmosférica (UNIMA) del Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT). El equipo de investigación cuenta también con investigadores y otro personal de las Unidades de Análisis de Sistemas Energéticos, de Caracterización y Control de la Contaminación Atmosférica, de Ecotoxicología de la Contaminación Atmosférica y de Desarrollo de Aplicaciones y Sistemas Informáticos, y de la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad Complutense de Madrid.

El proyecto se plantea como respuesta a un **reto a la sociedad**, que surge de la necesidad de reducir los niveles de contaminación en el aire, identificados como un factor de **riesgo a la salud pública y conservación de eco- y agrosistemas**. En este contexto, el proyecto presenta los siguientes objetivos generales:

- Entender el impacto de las emisiones nacionales de los distintos sectores emisores en los niveles de concentración de diferentes contaminantes.

- Examinar el potencial de mejora de la calidad del aire asociado a diferentes medidas de reducción de emisiones y sus correspondientes efectos en salud y vegetación, así como sus costes y beneficios económicos asociados.
- Difundir a la comunidad científica, a la sociedad y a las Administraciones Públicas los resultados del proyecto y facilitar la elaboración de programas de mejora de la calidad del aire.

El proyecto está estructurado en tres paquetes de trabajo (PT), abordando cada uno de ellos uno de los objetivos generales, tal y como se ilustra en la Figura 1. En el PT1 se estudian, mediante modelos de química y transporte los impactos de los distintos sectores de actividad en la calidad del aire, de forma que se conozca y pueda preverse el impacto de la reducción de emisiones en cada uno de ellos. En el PT2 se estudia el impacto en la calidad del aire, en salud y en vegetación de diferentes medidas de reducción de emisiones. Por último, el PT3 se enfoca en la difusión y transferencia de los resultados del proyecto.

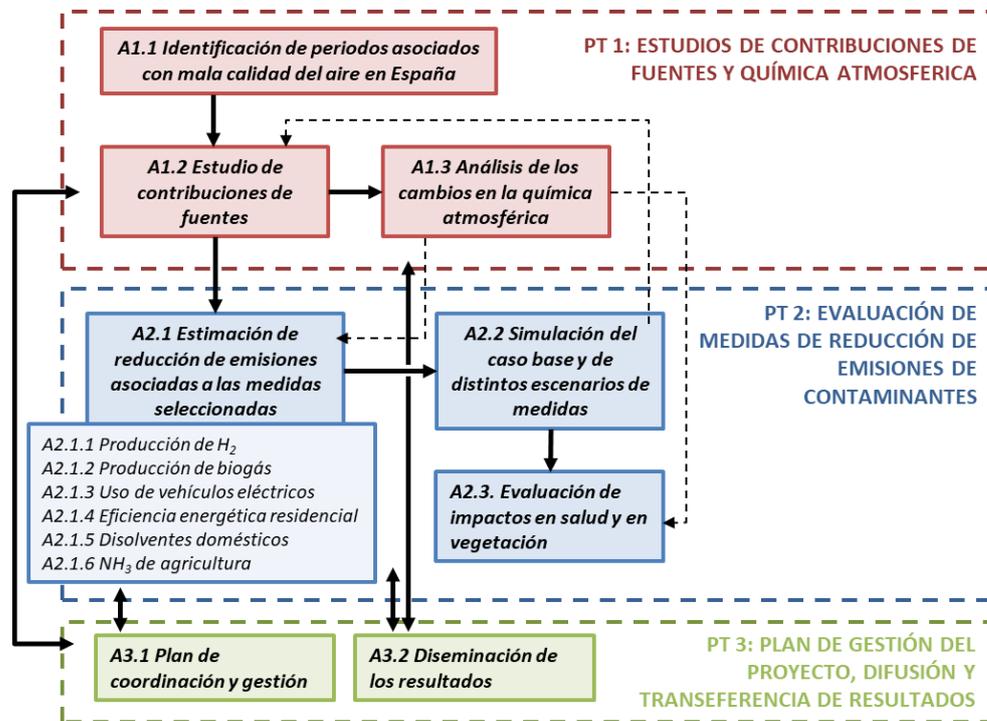


Figura 1. Estructura y actividades del proyecto TRANSAIRE (PT: Paquete de Trabajo)

La herramienta principal empleada en TRANSAIRE es la **modelización de la calidad del aire** mediante la aplicación del modelo de química y transporte CHIMERE [1]. Se han usado **simulaciones de CHIMERE**, tanto para el estudio de los impactos de fuentes en el PT1 como para las simulaciones de medidas de reducción de emisiones de contaminantes en el PT2. Para comunicar los resultados del proyecto a diversas audiencias, en el PT3 se utilizan distintos mecanismos de difusión, tales como, publicaciones científicas, presentaciones en foros nacionales e internacionales, la producción de videos divulgativos cortos con los resultados más importantes, entre ellos, los obtenidos a partir de experimentos novedosos que tienen el objetivo de cuantificar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles procedentes de productos domésticos.

ESTUDIO DE IMPACTOS DE LOS DISTINTOS SECTORES EMISORES

Metodología

En este estudio, se ha utilizado el método conocido como **“fuerza bruta”** para estimar los impactos de distintos sectores de emisiones en las concentraciones de los contaminantes principales y **evaluar la mejora potencial** por reducciones de emisiones en cada sector [2]. El impacto, siguiendo esta metodología, se calcula restando las concentraciones en dos simulaciones, una de ellas con emisiones en la situación base de referencia, y la otra simulación, con las emisiones correspondientes al escenario cuyo impacto se quiere evaluar. En concreto, se han calculado los impactos de una reducción leve (10% o 25%) de emisiones en un sector determinado, a través de una simulación anual realizada con el modelo de química y transporte CHIMERE con una **resolución espacial de aproximadamente 10 km × 10 km** con emisiones y meteorología de 2021. Para obtener el impacto para una reducción del 100% de emisiones, se multiplican los impactos obtenidos a partir de la reducción leve de emisiones (α) por el factor $100/\alpha$ (por ejemplo, $\alpha=10$ si la reducción aplicada fue del 10%). Los sectores considerados han sido el **sector energético, combustión industrial, combustión no industrial, otras emisiones industriales, disolventes, transporte por carretera, otros transportes, tratamientos de residuos y el sector agrícola y ganadero**. También se han hecho estimaciones de los impactos de las emisiones procedentes de otros países, así como del **tráfico marítimo internacional y de las emisiones biogénicas**. Los resultados han sido analizados de manera espacial y temporal para identificar dónde y cuándo los distintos sectores tienen su mayor impacto en las concentraciones, con un enfoque especial en los **periodos con episodios de contaminación alta**.

Primeros resultados

El análisis, como se ha comentado anteriormente, se ha centrado en los impactos de distintos sectores (incluyendo también emisiones de otros países, del tráfico marítimo internacional, emisiones biogénicas y el impacto del fondo global) en las concentraciones de NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ y O_3 . Para NO_2 , los resultados indican que **la reducción de las emisiones del transporte por carretera produciría la mayor reducción de las concentraciones de NO_2** (muy importante en las ciudades), aunque otros sectores, como la combustión industrial y residencial, la agricultura y el tráfico marítimo internacional, también tienen impactos (Figura 2). Varios de estos sectores contribuyen también a las concentraciones de partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$), aunque en este caso, es el sector residencial (combustión no industrial) el que tiene más importancia en las grandes ciudades (Figura 3). **El fondo global presenta el mayor impacto en las concentraciones de O_3** , junto con otras contribuciones, como las de los sectores de tráfico rodado, tratamiento de residuos y transporte marítimo internacional, así como también de emisiones biogénicas y de países vecinos (Figura 4). Un análisis de la actividad emisora del sector de residuos que tiene la mayor influencia en las concentraciones de O_3 en el sur de España, señala **la relevancia de las emisiones de NO_x de la quema de restos de poda**, aunque hay

mucha incertidumbre sobre las tasas de emisiones y su distribución espacial y temporal. El análisis de los episodios indica que hay mucha variabilidad espacial y temporal en la influencia de los distintos sectores. Por ejemplo, para Bilbao los resultados indican que las emisiones de partículas del sector residencial son las mayores responsables de las altas concentraciones de $PM_{2.5}$ en la ciudad durante los episodios, pero, en cambio, en Madrid, las emisiones de partículas del tráfico también contribuyen significativamente a los episodios invernales de mala calidad del aire. Esto significa que **las medidas para reducir los episodios de contaminación deberían fundamentarse según las circunstancias a nivel local**, no siendo las más eficaces las medidas aplicadas de forma homogénea en todo el territorio nacional.

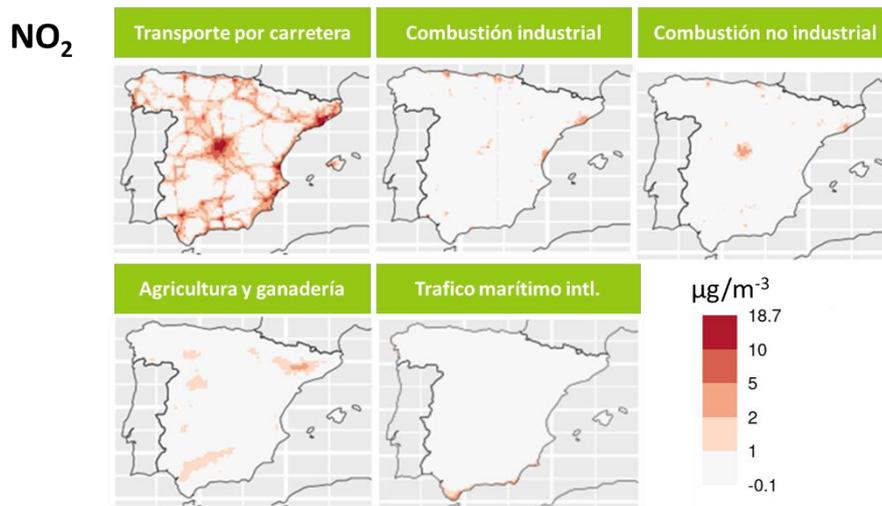


Figura 2. Estimación de la reducción en la concentración media anual de NO_2 con una hipotética reducción de emisiones del 100% en los sectores principales.

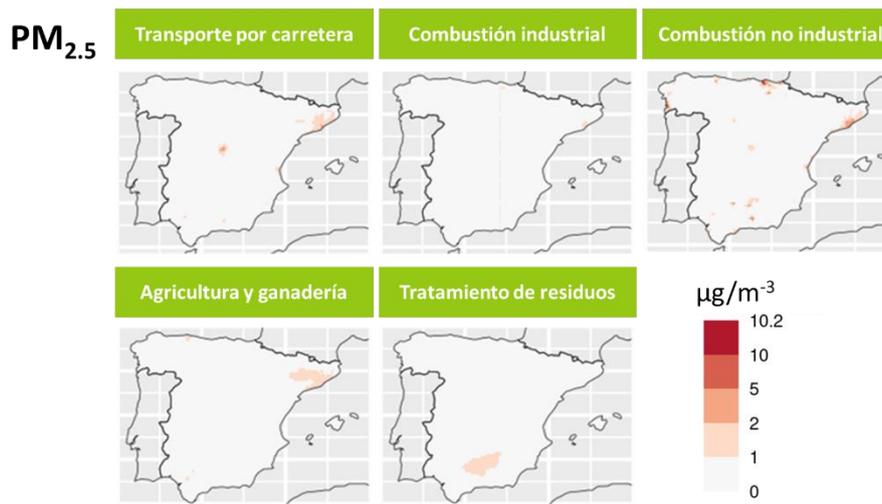


Figura 3. Estimación de la reducción en la concentración media anual de $PM_{2.5}$ con una hipotética reducción de emisiones del 100% en los sectores principales.

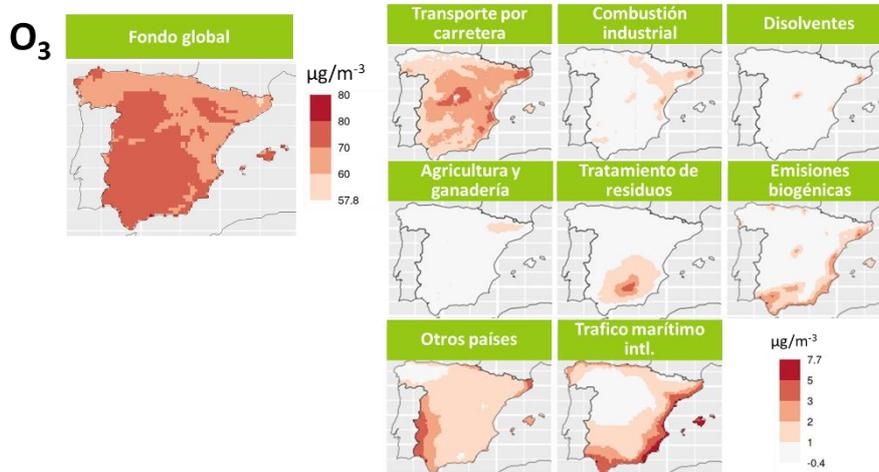


Figura 4. Estimación de la reducción en el promedio de las máximas diarias de las medias móviles octohorarias de O₃ (en el periodo de abril a septiembre) con una hipotética reducción del 100% de las emisiones de las fuentes/sectores principales. Nótese que la escala de colores de la imagen a la izquierda (fondo global) es diferente a la escala del resto de imágenes.

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

Metodología

El paquete de trabajo PT2 está dedicado al **diseño y evaluación de medidas que permitan reducir las emisiones de los sectores de emisiones con el mayor impacto en la calidad del aire en España** (Cuadro 1). Puesto que las emisiones del consumo eléctrico dependen del mix de producción de electricidad, para los escenarios que suponen cambios importantes en el consumo (los sectores residencial y de transporte) se ha considerado también **el mix de producción de electricidad previsto para 2030**, que es un mix con mayor contribución renovable y más limpio que el actual, aunque con mayor uso de biomasa [3].

Cuadro 1. Resumen de las medidas y escenarios de reducción de emisiones evaluados

Sector	Medida	Escenario	Mix eléctrico
Residencial	Aumento de la eficiencia energética de los edificios	Mejora de la envolvente de los edificios	Actual/2030
		Sustitución de calderas por otras más eficientes	Actual
		Sustitución de calderas de combustibles fósiles por bombas de calor eléctricas	Actual/2030

CONAMA 2024

TRANSICIÓN HACIA UN AIRE MÁS LIMPIO EN ESPAÑA (PROYECTO TRANSAIRE)

Sector	Medida	Escenario	Mix eléctrico
			
Transporte por carretera	Uso de vehículos eléctricos 	Escenario A: sustitución de 5.500.000 turismos alimentados con combustibles fósiles	Actual/2030
		Escenario B: Sustitución de 11.000.000 de turismos alimentados con combustibles fósiles	Actual/2030
		Escenario C: Sustitución de 22.000.000 de turismos alimentados con combustibles fósiles	Actual/2030
Industrial/ Transporte/ Residencial	Empleo de excedentes de renovables para producción de H ₂ (hidrogeno verde) 	Uso de H ₂ como materia prima en la industria química	Actual
		Uso de H ₂ como combustible en la industria del hierro y acero	Actual
		Uso de H ₂ como combustible en la industria cementera	Actual
		Uso de H ₂ como combustible en la industria de refinerías y petroquímica	Actual
		Introducción de un 5% Hidrógeno en red de gas natural industrial	Actual
		Introducción de un 5% Hidrógeno en red de gas natural domestica	Actual
		5000 vehículos de transporte pesado diésel sustituidos por vehículos eléctricos con pilas de combustible	Actual
Agricultura y ganadería	Uso de purines para la producción de biogás 	Uso de purines del sector porcino blanco para la producción de biogás	Actual
		Mejora /más eficiente uso de fertilizantes 	Eliminación de urea sin sustitución; Paso a 100% de nitrato amónico cálcico (NAC); Incorporación rápida del estiércol
	Reducción de aportes sintéticos de nitrógeno en un 50%		Actual
Reducción de aportes sintéticos de nitrógeno en un 50%; 100% de NAC; incorporación rápida de estiércol	Actual		

Se han simulado todas las medidas individualmente con el modelo CHIMERE con meteorología de 2021 para estimar los cambios en la calidad del aire con respecto al escenario de referencia (emisiones y meteorología de 2021). Además, para los escenarios con un aumento de vehículos eléctricos, se han hecho **simulaciones a mayor resolución espacial** (aprox. 1 km × 1 km) para algunas de las principales ciudades de España para proporcionar concentraciones de fondo para simulaciones a escala de calle (con una resolución espacial de aprox. 1-10 m) en zonas urbanas utilizando un **modelo de dinámica de fluidos computacional** (CFD por sus siglas en inglés). Una de estas zonas pertenece a Madrid y cubre una zona 600 m × 500 m (Figura 6a). Para calcular las concentraciones promedio a largo plazo, se aplica una metodología numérica llamada WA CFD-RANS [4,5] que permite obtener las concentraciones promedio anuales de NO₂ a nivel de calle en función de las condiciones meteorológicas, la concentración de fondo tomada del modelo CHIMERE y la relación NO₂/NO_x.

Los **impactos en la salud** de los escenarios y sus cambios con respecto a la simulación de referencia están siendo estimados a partir de las concentraciones simuladas y considerando las funciones de concentración-respuesta propuestas por la Organización Mundial de la Salud [6]. Estas funciones relacionan el nivel de exposición de la población a una determinada concentración de un contaminante a un impacto en la salud. **Los impactos de las concentraciones de O₃ en la vegetación** (cultivos y vegetación natural) se están estimando mediante el índice de exposición AOT40 y la dosis de O₃ absorbido o fitotóxico, llamado POD por sus siglas en inglés (Phytotoxic Ozone Dose) [7]. Los **impactos a la vegetación natural debido al depósito de nitrógeno** están siendo calculados considerando las cargas críticas de nitrógeno empíricas [8].

Primeros resultados

Los escenarios con un aumento del uso del coche eléctrico son los que presentan el mayor potencial de reducción de emisiones de NO_x, CO, SO_x y PM_{2.5}. Por ejemplo, en los escenarios A, B, y C se estima una **reducción de emisiones totales de NO_x del 6%, 9% y 10%**, respectivamente. Se estima que estas reducciones bajarán las concentraciones medias anuales de NO₂ en más del 10%, con el mayor impacto en las ciudades y a lo largo de las carreteras principales (Figura 5). La modelización a escala de calle en zonas urbanas utilizando el modelo CFD indica que con estas medidas **no se podría cumplir con el valor límite anual de concentraciones** de NO₂ (20 µg m⁻³) que establece la nueva Directiva Europea en zonas urbanas, tal y como indica la Figura 6b, a pesar de las reducciones de emisiones de NO_x con el aumento del uso de coche eléctrico. De los escenarios diseñados para aumentar la eficiencia energética de los edificios, la medida estratégica que más reduce las emisiones de CO, NO_x y material particulado (PM) es la mejora de la envolvente de los edificios, aunque las reducciones son pequeñas (0.5%–2% con respecto a las emisiones en 2021). Estas reducciones aumentan ligeramente hasta el 3% cuando se tiene en cuenta el cambio al mix eléctrico de 2030. En este escenario energético 2030, la medida que conlleva una mayor reducción de las emisiones de NO_x y SO_x es la sustitución de calderas por bombas de calor eléctricas, con reducciones del 3% y 4%, respectivamente. Una de las consecuencias potenciales del cambio al mix eléctrico de 2030 es un **aumento de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVNM), PM, benzo(a)pireno (BaP) y algunos metales pesados**, debido al mayor uso de biomasa como combustible. Esto podría empeorar ligeramente la calidad del aire cerca de las plantas de biomasa, sobre todo en el caso del BaP, puesto que **las emisiones de este compuesto en el sector energético podrían duplicarse con el mix de generación de electricidad de 2030 y el aumento del consumo eléctrico por los**

coches eléctricos. Sin embargo, hay mucha incertidumbre sobre la localización de las futuras plantas de biomasa y las técnicas de mitigación de emisiones que se utilizarían. Los escenarios diseñados para el sector de agricultura y ganadería podrían reducir, sobre todo, las emisiones de amoníaco (NH_3), con reducciones de hasta el 2% de las emisiones totales para el escenario de producción de biogás. Los análisis preliminares de los escenarios de utilización de H_2 verde indican efectos muy pequeños en la calidad del aire, y en cambio podría producirse **cierto aumento de las emisiones de NO_x en la industria siderúrgica** (y consecuentemente las concentraciones de NO_2 locales), aunque existe mucha incertidumbre en los factores de emisión de la quema de H_2 . En cuanto a la influencia en las concentraciones de O_3 de todos los escenarios estudiados, los resultados indican que ninguno tendría un efecto significativo, aunque se estiman pequeñas reducciones en los indicadores de impactos en la salud humana (indicador SOMO35) y en la vegetación (indicador AOT40). A pesar de que las medidas evaluadas conllevan por sí solas modestas reducciones en las emisiones totales y en las concentraciones atmosféricas, muchas de las medidas podrían ser aplicadas conjuntamente **para lograr mejoras tangibles de la calidad del aire.**

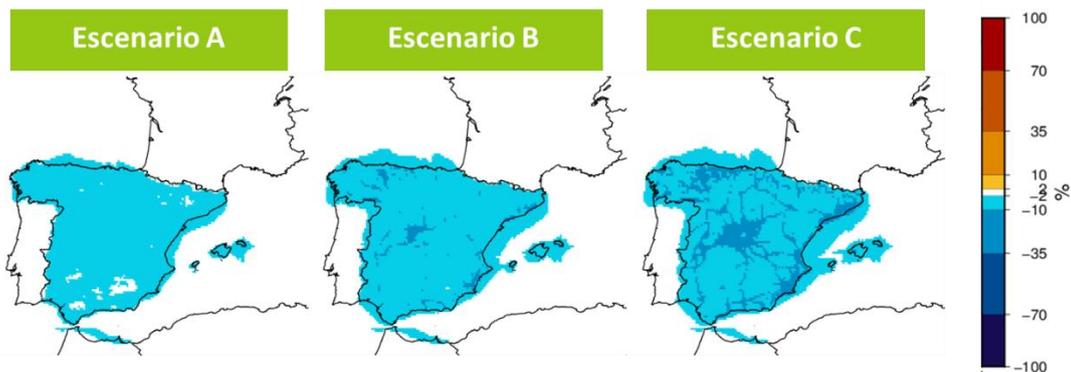


Figura 5. Reducciones estimadas (%) en la concentración media anual de NO_2 para los escenarios de vehículos eléctricos con respecto a la simulación de referencia (2021).

Escenario A: Sustitución de 5.500.000 turismos alimentados con combustibles fósiles
Escenario B: Sustitución de 11.000.000 turismos alimentados con combustibles fósiles
Escenario C: Sustitución de 22.000.000 turismos alimentados con combustibles fósiles

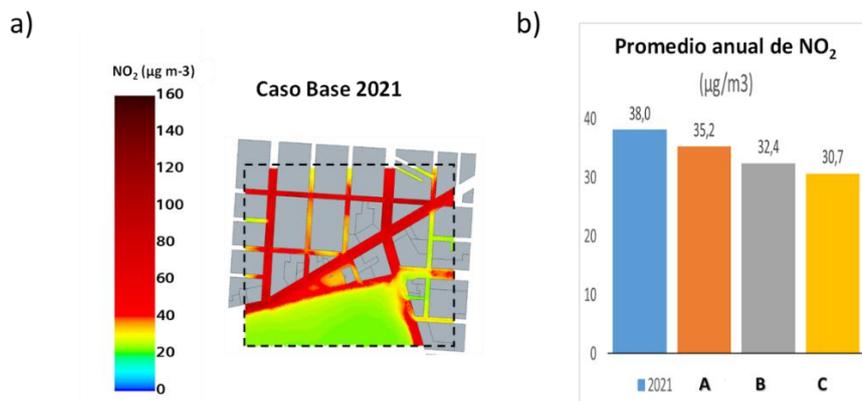


Figura 6. a) Zona urbana de Escuela Aguirre (Madrid): Mapa promedio anual de NO_2 para la simulación de referencia (2021). b) Valores promedio anuales para la simulación de referencia y los escenarios A, B, y C.

ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES PROCEDENTES DE PRODUCTOS DOMÉSTICOS

Los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) son precursores claves en la **formación fotoquímica de ozono** y en muchos casos también pueden tener incidencia adversa directa sobre la salud humana, especialmente en espacios interiores en donde se pueden encontrar en concentraciones elevadas. Puesto que una proporción significativa de las emisiones de los COVNM en España viene del **uso de productos domésticos**, como los cosméticos y productos de limpieza (23% de todas las emisiones del sector de disolventes según el inventario nacional), para su mitigación hace falta una combinación de regulación y de **concienciación ciudadana**. Para contribuir a la concienciación, en TRANSAIRE se han puesto en marcha una serie de ensayos experimentales para cuantificar y comparar las tasas de emisiones de algunos COVNM procedentes de diversos productos domésticos.

PROXIMOS PASOS

Durante el tiempo restante del proyecto se continuará el análisis de las simulaciones de los escenarios, incluyendo la evaluación de los impactos en la salud humana y la vegetación. También seguirán las actividades de difusión del proyecto, incluyendo la divulgación sobre los resultados de las mediciones experimentales de emisiones de los COVNM y los videos cortos resumiendo los resultados del proyecto así como la publicación de la página web, actualmente en desarrollo (<https://projects.ciemat.es/es/web/transaire>).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico por proporcionar el inventario nacional de emisiones. También agradecemos al European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), por la provisión de datos meteorológicos, con agradecimiento a la AEMET por facilitar el acceso a esta información. Este estudio se ha realizado en el marco del Proyecto TED2021-132431B-I00 (TRANSAIRE: Transición hacia un aire más limpio en España) financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.



BIBLIOGRAFIA

- [1] Menut, L., Bessagnet, B., Khvorostyanov, D., Beekmann, M., Blond, N., Colette, A., ... & Vivanco, M. C. (2013). a model for regional atmospheric composition modelling. *Geosci. Model Dev.* 2013; 6: 981–1028. 10.5194.
- [2] Thunis, P., Clappier, A., Tarrasón, L., Cuvelier, C., Monteiro, A., Pisoni, E., ... & Peduzzi, E. (2019). Source apportionment to support air quality planning: Strengths and weaknesses of existing approaches. *Environment International*, 130, 104825.
- [3] Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC, 2018) 2021-2030 | IDAE. Disponible en: <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/plan-nacional-integrado-de-energia-y-clima-pniec-2021-2030>
- [4] Santiago, J. L., Rivas, E., Sanchez, B., Vivanco, M. G., Theobald, M. R., Garrido, J. L., Gil, V., Buccolieri, R., Martilli, A., Rodriguez-Sánchez, A. & Martín, F. (2024). How do emission reductions of individual national and local measures impact street-level air quality in a neighbourhood of Madrid, Spain? *Air Quality, Atmosphere & Health*, 17(4), 813-826.
- [5] Martín, F., Janssen, S., Rodrigues, V., Sousa, J., Santiago, J. L., Rivas, E., Stocker, J., Jackson, R., Russo, F., Villani, M.G., Tinarelli, G., Barbero, D., San José, R., Pérez-Camanyo, J. L., G. Sousa Santos, G, Bartzis, J., Sakellaris, I., Horváth, Z., Környei, L., Liskai, B., Kovács, A., Jurado, X., Reiminger, N., Thunis, P. & Cuvelier, C. (2024). Using dispersion models at microscale to assess long-term air pollution in urban hot spots: A FAIRMODE joint intercomparison exercise for a case study in Antwerp. *Science of the Total Environment*, 925, 171761.
- [6] WHO (2013). Health Risks of Air Pollution in Europe—HRAPIE Project. WHO: Geneva, Switzerland.
- [7] CLRTAP, 2017. Mapping Critical Levels For Vegetation, Chapter III. Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Disponible en: <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/mapping-manual>
- [8] Bobbink, R., Loran, C., & Tomassen, H. (2022). Review and revision of empirical critical loads of nitrogen for Europe. Umweltbundesamt/German Environment Agency: Dessau-Roßlau, Germany.