

CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Evaluación integral de la calidad del aire urbano y cambio climático

Proyecto AIRTEC-CM (S2018/EMT-
4329)





EVALUACIÓN INTEGRAL DE LA CALIDAD DEL AIRE URBANO Y CAMBIO CLIMÁTICO. PROYECTO AIRTEC-CM (S2018/EMT-4329)

Autor Principal: Rafael Borge (UPM)

Otros autores: Alfonso Saiz (CSIC); Adela Montserrat Gutiérrez (UCM); Ana M. García (UPM); Begoña Artíñano (CIEMAT); Carlos Yagüe (UCM); Dulcenombre Gómez (HCSC); Fernando Martín (CIEMAT); Francisco Javier Gómez (CIEMAT); José María Cordero Díaz (UPM); Adolfo Narros (UPM); Pascual Campoy (UPM)

RESUMEN

AIRTEC-CM (S2018/EMT-4329) aborda el estudio de la problemática de la calidad del aire urbano desde una perspectiva integral, como primer paso para entender las interacciones e interdependencias existentes entre los agentes bióticos (polen, hongos, bacterias), abióticos (contaminantes químicos regulados y no regulados) y factores meteorológicos en un contexto de clima cambiante y poder avanzar en el conocimiento de la exposición de las personas a la contaminación atmosférica en las ciudades. Se trata de un esfuerzo interdisciplinar en la que participan grupos de investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Complutense, CIEMAT, CSIC y el Hospital Clínico San Carlos.

Para ello, se están realizando mediciones basadas en técnicas convencionales y otras más novedosas, tales como sensores de bajo coste, observaciones de la atmósfera en 2D y 3D con instrumentos ópticos de teledetección, muestreos desde vehículos en movimiento o a bordo de drones, tanto en ambientes exteriores como interiores. Las actividades experimentales se complementan con simulaciones que permitan contrastar, explicar y reproducir los fenómenos observados y las hipótesis desarrolladas. A tal efecto, se están utilizando modelos numéricos de última generación para lograr una descripción consistente de los procesos físico-químicos relevantes que condicionan la calidad del aire urbano, desde la escala global a la escala local, a nivel de calle. También, se están realizando simulaciones *indoor* que permitan entender mejor la repercusión de la calidad del aire exterior en los interiores (edificios, transporte público) y proporcionar, por tanto, una visión más completa del ciclo de exposición integral a la contaminación de los ciudadanos.

Finalmente, es de particular interés caracterizar la dinámica atmosférica para entender mejor la respuesta de posibles medidas de reducción de emisiones bajo un nuevo paradigma de calidad del aire. El fin último de la investigación es la de proporcionar a los gestores de la calidad del aire y la salud pública de la tecnología necesaria para una integración de las políticas públicas y una reducción de los impactos negativos asociados a la contaminación atmosférica.

Introducción

La atmósfera es un recurso esencial para la vida en el planeta. Las emisiones antropogénicas contribuyen a alterar sus propiedades y por tanto, deterioran su capacidad como sustento vital para las personas y los ecosistemas. La mejora de la calidad del aire y la lucha contra el cambio climático es una prioridad global que se acentúa en las zonas urbanas, que es donde se concentran las emisiones y la población expuesta a altos niveles de contaminación. Consecuentemente, la calidad del aire en las ciudades es un aspecto directamente relacionado con muchos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible definidos en el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, tales como la salud y bienestar, ciudades y comunidades sostenibles o acción por el clima entre otros.

Se estima que una deficiente calidad del aire (exterior e interior) es responsable de alrededor de 7 millones de muertes prematuras anualmente [1]. Además de los efectos directos de sustancias contaminantes como las partículas finas (PM_{2,5}) o el dióxido de nitrógeno (NO₂), que sólo en Europa dan lugar a medio millón de muertes prematuras al año [2], las ciudades consumen 2/3 de la energía a nivel mundial y generan más del 70% de las emisiones de CO₂

debido, fundamentalmente a las necesidades de movilidad y del consumo energético en edificios. Actualmente, más de la mitad de la población mundial se concentra en ciudades, y se espera que esta fracción crezca hasta llegar a 2/3 en 2050 a nivel mundial [3], provocando un deterioro aun mayor de la calidad del aire [4], [5] y alterando el clima urbano [6] y produciendo por tanto, mayores impactos sobre la salud pública. Diversos estudios indican que la contaminación urbana puede incrementar considerablemente el riesgo de las afecciones respiratorias y mortalidad por trastornos cardiovasculares o cáncer de pulmón [7], [8] así como enfermedades neurodegenerativas y dañar seriamente a salud de la población infantil [9]. No obstante, además de partículas antropogénicas y gases contaminantes, el aire contiene partículas biológicas como bacterias, esporas fúngicas, polen, etc., provenientes en su mayoría del suelo, la cobertura vegetal o fuentes próximas de agua [10], [11]. Aunque algunas de estas entidades biológicas pueden causar importantes daños en el patrimonio histórico de monumentos y edificios [12], el principal interés de su estudio y control viene derivado igualmente por sus efectos sobre la salud humana. Enfermedades como la legionelosis o tuberculosis son causadas por bacterias transmitidas por el aire [13], [14]. Asimismo, las esporas de hongos y el polen son los responsables de los crecientes casos de alergias, estimando una incidencia de unos 500 millones de personas afectadas por síntomas alérgicos a nivel mundial y un 20% de la población europea [15], [16].

Tanto los agentes bióticos como abióticos se ven afectados por la dinámica atmosférica que depende de procesos de muy diversa escala espacial y temporal [17]. La variabilidad espacio-temporal de las emisiones en las ciudades junto con la presencia de edificios y otros obstáculos generan acusados gradientes espaciales [18] que deben considerarse a la hora de evaluar la exposición de la población y diseñar las estrategias de monitorización. Pese a que existen una serie de criterios de ubicación para el control de los contaminantes químicos regulados y hay estudios previos relevantes [19] no hay una metodología consensuada que determinar la representatividad en cuanto a exposición de la población de las mediciones de calidad del aire realizadas de forma rutinaria en las ciudades. En el caso de las partículas biológicas no existe regulación ni siquiera un sistema integral y continuo de monitorización de todas estas partículas [11]. La propuesta de una estrategia de monitorización global, capaz de caracterizar la calidad del aire de forma integral, debe tener en cuenta ambos aspectos. Por un lado, la dispersión y transporte de agentes orgánicos depende de los mismos factores meteorológicos y por otro, su naturaleza y efectos están relacionados [20]. Además, para el caso del polen, se ha descrito que su interacción con los contaminantes inorgánicos puede incrementar su alergenicidad [21], lo que apoya un estudio conjunto de los contaminantes y las entidades biológicas con efectos sobre la salud.

Además de los efectos sobre los patrones de dispersión anteriormente indicados, cabe destacar que la influencia de los factores meteorológicos sobre estas entidades biológicas es muy intensa y permanece todavía poco definida, puesto que la temperatura, la humedad relativa, o la precipitación afectan a las fuentes de origen (plantas, hongos y bacterias del suelo y agua). En el presente no se dispone de modelos integrales que permitan su análisis con perspectivas de predicción y simulación de escenarios. Esto es particularmente relevante si se considera que nos encontramos inmersos en proceso de cambio climático evidente, por lo que resulta de vital importancia analizar conjuntamente todos los elementos implicados en la evolución de la atmósfera. El cambio climático ha sido identificado como la mayor amenaza a la salud pública en el siglo XXI [22]. La calidad del aire y el cambio climático están estrechamente interrelacionados por un conjunto de complejas interacciones atmosféricas [23] así como por el origen común de algunas de las emisiones de los principales contaminantes y gases de efecto

invernadero [24]. El cambio climático influye en la calidad del aire ya que puede modificar los patrones de transporte y depósito, reacciones químicas, niveles de oxidantes atmosféricos, etc. [25]. A su vez, la composición química de la atmósfera tiene implicaciones en los balances radiativos, precipitación y temperatura, lo que se traduce en cambios en el clima a escala regional o local [26]. En relación con las entidades biológicas, las investigaciones recientes muestran que las plantas, como fuente de alérgenos clínicamente importantes (polen), son particularmente sensibles. Esto unido al incremento de las temperaturas, podría ocasionar un aumento en la producción polínica y en la cantidad de alérgenos de los granos de polen, siempre que no se produzcan restricciones en la disponibilidad de agua por el calentamiento y la disminución de las precipitaciones [27]. De forma similar, las variaciones del clima tienen un efecto determinante sobre las emisiones de compuestos orgánicos volátiles biogénicos (BVOC) [28], que juegan un papel muy relevante en la química atmosférica ya que condicionan la formación y destrucción de O₃ [29] y la producción de aerosoles orgánicos secundarios (SOA) [30], que contribuyen a incrementar la concentración de partículas finas (PM_{2,5}), con el consiguiente efecto en los balances radiativos [31]. Además, se prevén cambios en la estacionalidad (inicio y fin) de las estaciones polínicas, su duración total y distribución espacial de las plantas productoras, llevando a la exposición de aeroalérgenos a nuevas zonas [32] e intensificándola en las zonas urbanas [27].

El estudio integral de la dinámica atmosférica permite además identificar opciones para reducir los efectos negativos del cambio climático localmente y mejorar la calidad del aire. En este sentido, es oportuno estudiar con especial detalle la dinámica de los *short-lived climate pollutants* (SLCP) en el contexto de la química atmosférica. Por ejemplo, una reducción de contaminantes atmosféricos como el *black carbon*, fracción del PM_{2,5} muy perjudicial para la salud [33], puede resultar clave para evitar que la temperatura planetaria no supere un incremento de 2 °C sobre los niveles preindustriales [34]. De forma similar, una reducción de los niveles de ozono troposférico (O₃) presenta grandes ventajas localmente debido a sus efectos en la salud [35]. Además de contribuir al estudio de la calidad del aire y cambio climático de forma homogénea y consistente, es preciso dotar a las administraciones y expertos en salud pública de herramientas capaces de mejorar la evaluación de la exposición, combinando nuevas tecnologías [36] y un mejor conocimiento de la composición atmosférica.

En este contexto, el objetivo general del programa “Evaluación integral de la calidad del aire urbano y cambio climático” (AIRTEC-CM) (<https://airtec-cm.es>) es el de establecer un marco de cooperación para incrementar el conocimiento y el desarrollo de nuevas técnicas, capaces de diagnosticar los problemas de calidad del aire, tanto biótica como abiótica, de una manera integral en entornos urbanos, incluyendo su relación con las fuentes emisoras, factores meteorológicos y su evolución en un contexto de cambio climático. La investigación, financiada por la Comunidad de Madrid (Consejería de Educación e Investigación) a través de la convocatoria de ayudas para la realización de Programas de Actividades de I+D entre grupos de investigación de la Comunidad de Madrid en tecnologías 2018 (S2018/EMT-4329), se articula a través de 6 objetivos específicos a desarrollar en el periodo 2018-2022. El planteamiento y principales resultados preliminares se exponen en los siguientes epígrafes.

Objetivo 1

Análisis histórico y realización de medidas para caracterizar las interacciones entre las características biológicas, físicas y químicas de la atmósfera

Este objetivo implica la recopilación y explotación de series de datos de diversas fuentes (calidad del aire, meteorología, bacterias, hongos, polen) para hacer una caracterización preliminar de las interacciones físicas, biológicas y químicas entre los diversos agentes atmosféricos en base a bases de datos históricas.

Para ello, se dispone de una amplia base de datos incluyendo series temporales de mediciones de muy diversa índole: contaminantes atmosféricos, bacterias y hongos en suspensión, granos de polen, meteorología. En primera instancia, es de marcado interés determinar las principales sinergias e interacciones entre todos los componentes del sistema atmosférico que pueden llegar a afectar a las personas. Por ello se consideran los agentes abióticos más relevantes, que serían los contaminantes normalmente medidos en las estaciones de calidad del aire (PM, NO_x, O₃) y los agentes bióticos (bacterias, hongos y polen, fundamentalmente).

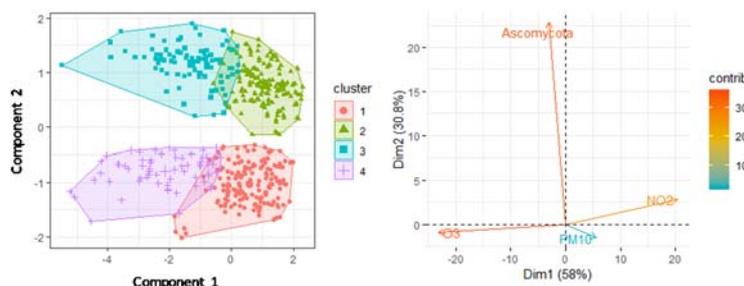


Figura 1. Cluster plot (izquierda) y biplot PCA (derecha) utilizando las abundancias relativas del filo Ascomycota y variables de calidad del aire (concentraciones medias diarias de NO₂, O₃ y PM₁₀) [37]

La aproximación inicial consiste en el desarrollo de un esquema metodológico para detectar, cuantificar y modelar estas relaciones en un lugar cualquiera. El método incluye estadística descriptiva, *clustering k-means*, tests de contraste de hipótesis y modelos aditivos generalizados (GAMs, por sus siglas en inglés). A modo de ejemplo la Figura 1 ilustra el resultado del análisis realizado mediante *k-means* utilizando las variables abióticas para formar 4 clústeres bien separados y sin solapamiento del filo Ascomycota, indicando la existencia de relaciones subyacentes. Los primeros resultados obtenidos en este objetivo indican que estos modelos pueden capturar las relaciones no lineales entre factores meteorológicos, calidad del aire y agentes bióticos en la atmósfera, proporcionando una estimación razonable de su composición relativa [37].

También se ha recurrido a técnicas estadísticas avanzadas para entender la distribución y frecuencia del polen alérgico. Se ha realizado una primera modelización mediante un ensemble de algoritmos de aprendizaje automático utilizando dos pasos de GAM seguidos de una red neuronal artificial y de un LGBM [38], que pertenece a las tecnologías llamadas de *Gradient Boosting*. El primer trabajo estudia la predicción de las concentraciones de polen de Olivo, incluido entre los más problemáticos de la Comunidad de Madrid. La Figura 2 muestra la

comparación de valores predichos y observados en dos localizaciones de la red PalinoCAM para la temporada de polen en 2018. Debe notarse que las predicciones se relacionan con datos que los modelos no habían visto antes (validación externa), y los resultados muestran un ajuste razonable. Esto apunta al potencial de este tipo de modelos para apoyar los métodos de predicción actuales.

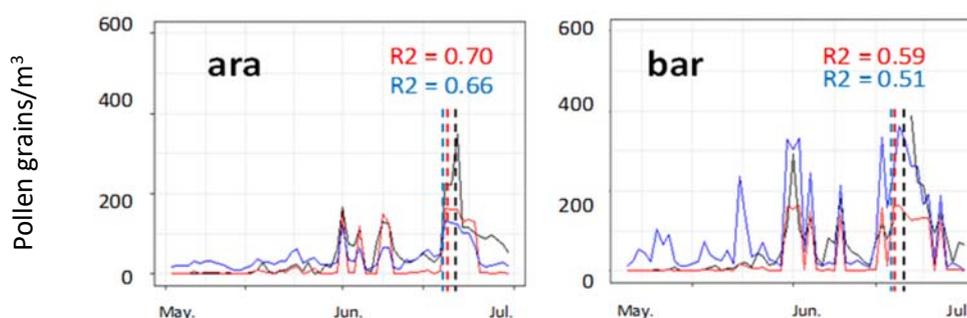


Figura 2. Series temporales de polen de olivo medido (línea negra) y predicciones de los ensembles LightGBM (línea roja) y ANN (línea azul). Los momentos del pico observados y predichos se muestran como líneas discontinuas verticales.

En este contexto, se están realizando también análisis históricos considerando fenómenos particulares de interés tales como la evolución de la isla de calor en Madrid [39] o la de intrusiones Saharianas y su relación con contaminantes locales [40].

Estos análisis pueden ayudar a plantear hipótesis para el estudio posterior de la base físico-química y biológica para tratar de explicar los fenómenos observados. No obstante, dado que los datos no proceden de experimentos específicamente diseñados para este tipo de investigación, se están realizando campañas de muestreo (biológico y físico-químico) específicas dentro de AIRTEC-CM. Con ello, se busca complementar los datos existentes y cubrir huecos de información necesaria para obtener dichas correlaciones.

En este ámbito, se está realizando una monitorización constante de parámetros biológicos en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII-UPM) (Figura 3). Estos muestreos van acompañados de medidas in situ de factores meteorológicos de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento gracias a una estación meteorológica, instalada en la misma ubicación. Además de estas medidas continuas, se han realizado dos campañas de medición puntuales (estáticas) para caracterizar y relacionar la calidad del aire del exterior (*outdoor*) e interior (*indoor*) bajo diversas condiciones meteorológicas y en dos tipologías distintas de edificios (ETSII-UPM y Hospital Clínico San Carlos) y obtener datos para la validación de simulaciones.

Estas campañas combinan mediciones de muy diverso tipo, incluyendo medidas de parámetros micrometeorológicos, incluyendo la turbulencia, uso de tubos pasivos para medición de NO₂ en ambientes interiores y exteriores (diversos puntos de la fachada y alrededores) para obtener mapas de concentración de muy alta resolución, mediciones con métodos de referencia o equivalentes de NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, y *black carbon* y medidas análogas con sensores de bajo

coste. Estas medidas se complementan con las mediciones rutinarias de calidad del aire por parte de la red de vigilancia del Ayuntamiento de Madrid, entidad que también participa en el Programa de investigación. Para futuras campañas, se prevé incluir medidas a bordo de drones para caracterizar mejor los gradientes de concentración a microescala y la relación entre los niveles de concentración dentro y fuera de los edificios.



Figura 3. Estación meteorológica (izquierda) y captador tipo Hirst (derecha) en la azotea de la ETSI Industriales de la UPM.

En cuanto a los sensores de bajo coste, la colaboración con algunas de las empresas asociadas como Automated Devices o Kunak, ha permitido avanzar en el uso de estas tecnologías en aplicaciones de investigación. AIRTEC-CM está aplicando y mejorando las técnicas de aprendizaje automático [41] basadas en redes neuronales (ANN, de sus siglas en inglés) para refinar y obtener las predicciones finales (Figura 4), con resultados preliminares satisfactorios, útiles para su uso en la investigación.

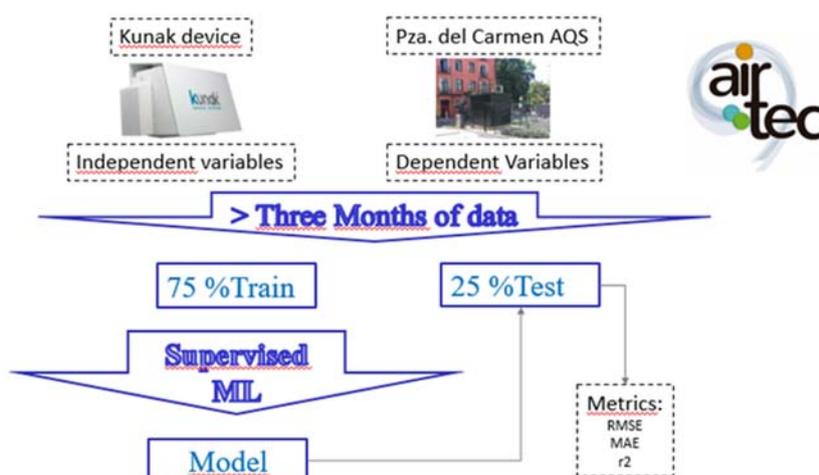


Figura 4. Tratamiento de datos y protocolo de aprendizaje automático para calibración de sensores de bajo coste.

Objetivo 2

Simulación de calidad del aire multiescala

Las técnicas de simulación numérica son una herramienta esencial para entender la dinámica de la contaminación del aire a varios niveles, desde la escala regional (Figura 5) hasta la microescala (Figura 6). AIRTEC-CM está aplicando técnicas de simulación multi-escala desarrolladas por los grupos participantes en proyectos de investigación previos [42] para apoyar la investigación.

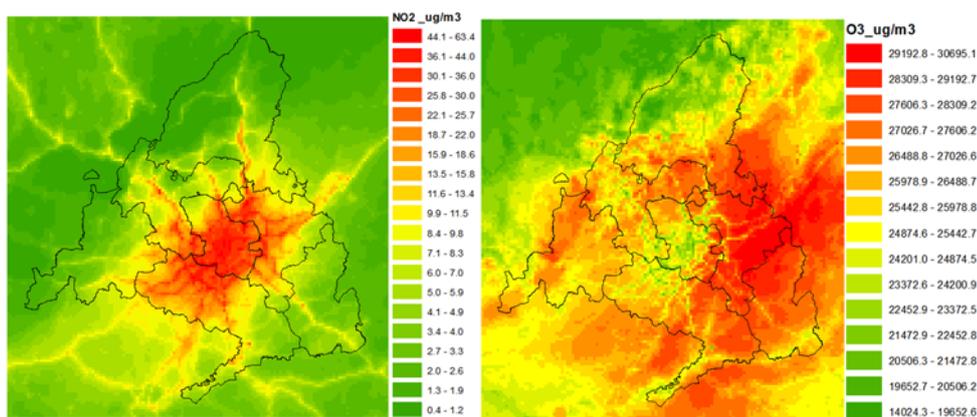


Figura 5. Simulaciones de la concentración media anual de NO₂ (izquierda) y AOT40 de O₃ (derecha)

Se han revisado los inventarios de emisiones disponibles y se han actualizado los perfiles de especiación química, incluyendo la química de los halógenos para la simulación mesoescala [43]. Con respecto a las emisiones biogénicas, usos del suelo y definición de especies vegetales, han sido actualizados para una mejor estimación de VOCs naturales y polen.

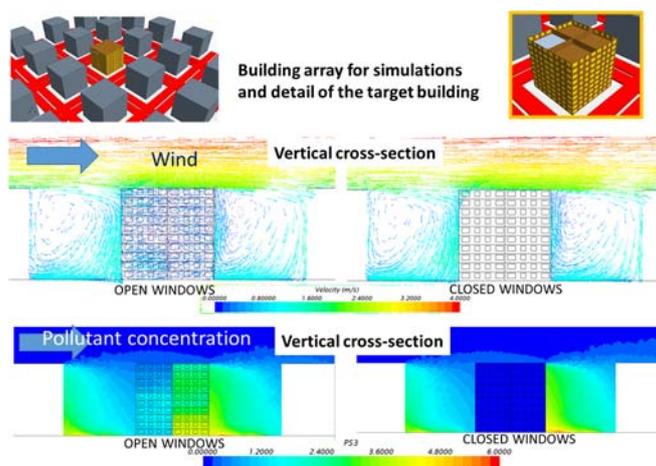


Figura 6. Simulaciones del flujo de viento y distribución de contaminantes en un edificio bajo distintos supuestos de ventilación.

El modelo desarrollado para integración del polen en el sistema de simulación a mesoescala (WRF-SMOKE/MEGAN-CMAQ) [42], [43], considera la distribución de las principales especies de interés (oleáceas, platanáceas, cupresáceas y poáceas) así como sus características fenológicas en función de la meteorología específica (con resolución temporal horaria y espacial de 1 km²). Este modelo, aún está en fase de pruebas pero los resultados preliminares indican que podría ser una aproximación válida para integrar la simulación del polen con la de los contaminantes químicos, incluyendo las especies de tipo secundario.

Objetivo 3

Evaluación: integración de datos para la evaluación de las simulaciones. Evaluación de las estrategias de monitorización de la calidad del aire para contribuir a su armonización y mejora teniendo cuenta componentes bióticos y abióticos.

El primer bloque de actividad se relaciona con la evaluación convencional de cualquier ejercicio de modelización frente a los datos experimentales disponibles, especialmente los obtenidos específicamente en AIRTEC-CM. Todas las simulaciones a mesoescala reseñadas en el punto anterior, tanto de calidad del aire como meteorológicas, cuentan con sus respectivas evaluaciones con resultados satisfactorios. Dada la naturaleza multi-escala de la contaminación atmosférica, este objetivo también incluye la integración de medidas no convencionales basadas en observaciones remotas de la atmósfera urbana [44].

Así pues se ha utilizado un equipo MAXDOAS-2D para medir los perfiles verticales de diferentes contaminantes (NO₂, O₃, etc) dado un ángulo de visión azimutal. Se basa en el análisis de las absorciones espectrales producidas en el espectro solar debidas a la presencia de gases traza. La Figura 7 muestra un ejemplo de un análisis concreto.

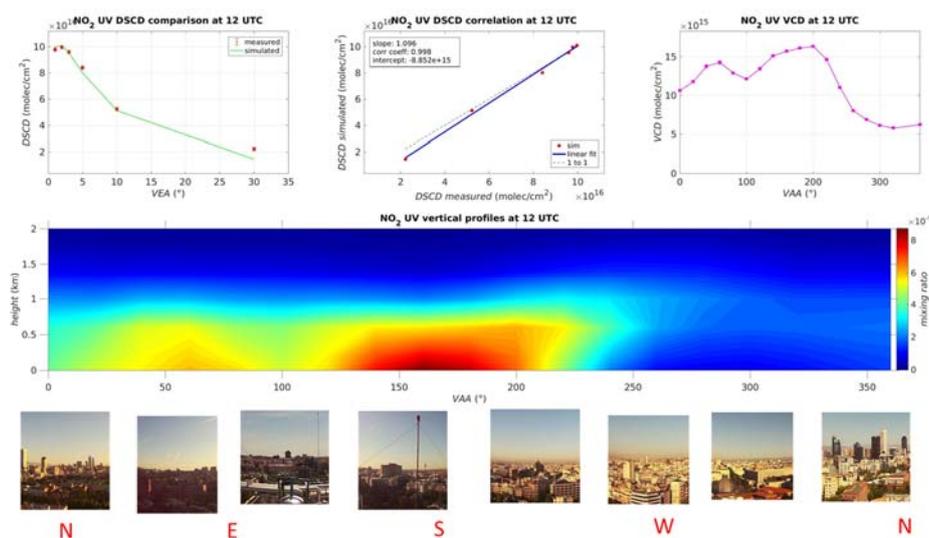


Figura 7. Ejemplo de concentración de NO₂ medida en Madrid (360°) con el instrumento MAXDOAS-2D a las 12 UTC.

En cuanto a la mejora de la estrategia de monitorización y gestión de la calidad del aire, AIRTEC-CM ha desarrollado junto con la Consejería de Medio Ambiente Comunidad de Madrid (entidad asociada al programa) una nueva metodología para definir zonas de control de la calidad del aire, según la legislación actual (Directiva 2008/50/CE). Esta metodología aplica un análisis de cluster a las simulaciones de alta resolución realizadas en el proyecto (Figura 5). La Figura 8 muestra un ejemplo de zonificación para diferentes contaminantes.

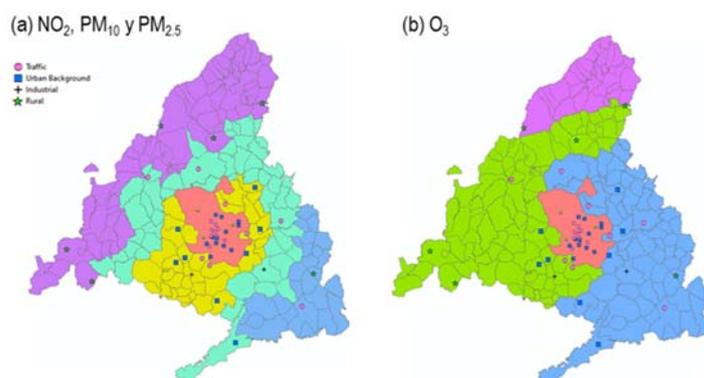


Figura 8. Ejemplo de zonificación teniendo en cuenta NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} (izquierda) y el O_3 (derecha) [45].

Esta técnica permite optimizar la definición de zonas homogéneas y mejorar el uso de los datos ofrecidos por las redes de vigilancia [45] y podría servir para revisar la zonificación no sólo en la Comunidad de Madrid sino en cualquier región de Europa.

Objetivo 4

Medidas para la mejora de la calidad del aire y la mitigación del cambio climático: generación de información relevante para el desarrollo de planes para áreas urbanas de la Comunidad de Madrid, integrando y armonizando los objetivos de calidad del aire y del cambio climático.

La actividad dentro de este objetivo en la primera parte del programa se ha centrado en el estudio de los contaminantes de vida corta (SLCP, de sus siglas en inglés), que son de extrema importancia para integrar las políticas de calidad del aire y del cambio climático. En primera instancia, se han analizado las tendencias e influencia de la meteorología en el O_3 [46]. Se trata de un contaminante secundario cuya tendencia creciente no guarda relación con las reducciones en las emisiones de sus principales precursores (NO_x y COVs) (Figura 9).

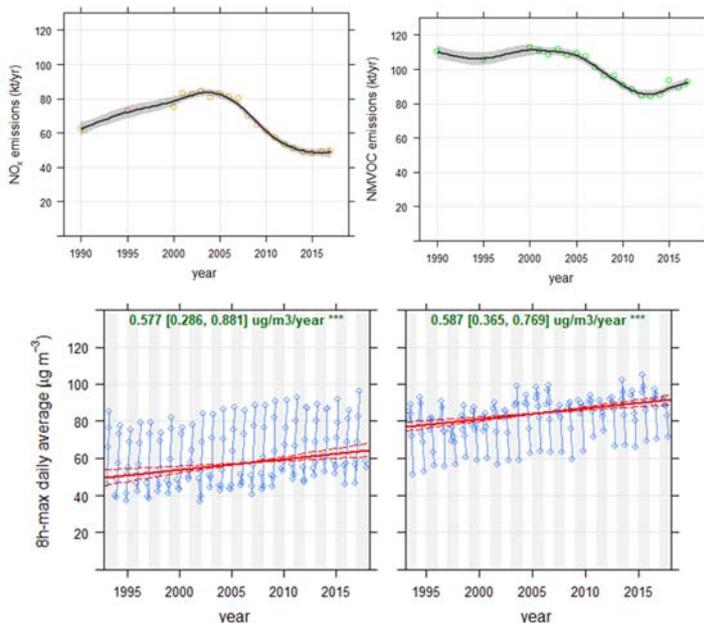


Figura 9. Contraste de las series de emisión histórica de NO_x y COVs (arriba) con la tendencia ascendente en el O₃ troposférico en la Comunidad de Madrid (abajo), tanto en invierno (izquierda) y en verano (derecha) [46].

Para intentar indagar en la posible solución de este problema, se ha realizado un primer estudio de la dinámica estival típica del O₃ en la región [47]. Como primer paso, se ha aplicado un modelo de contribución de fuentes integrada en el modelo CMAQ, capaz de trazar el origen de este contaminante secundario a las fuentes de NO_x y COVs que lo originan [48].

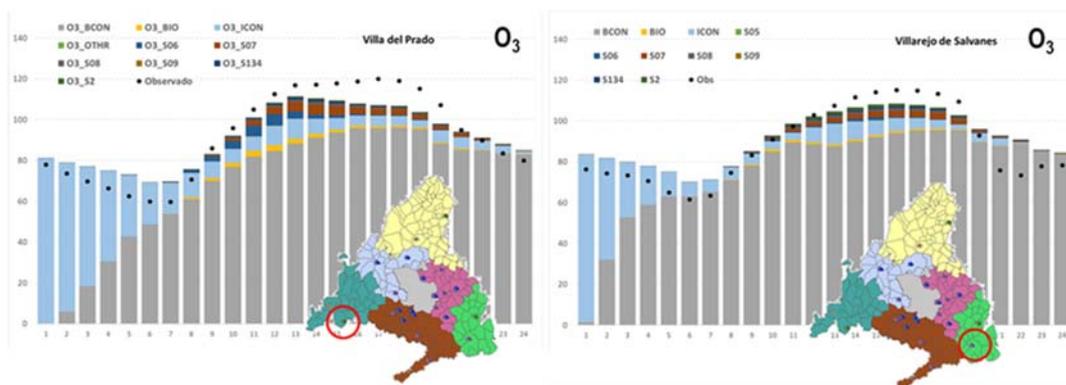


Figura 10. Contraste de las series de emisión histórica de NO_x y COVs (arriba) con la tendencia ascendente en el O₃ troposférico en la Comunidad de Madrid (abajo), tanto en invierno (izquierda) y en verano (derecha) [46].

Los resultados preliminares indican que la contribución de las fuentes locales, el tráfico fundamentalmente, son especialmente importantes bajo condiciones de estabilidad, cuando las concentraciones son más altas [49]. Aunque la gran mayoría de ozono en superficie procede de otras regiones (condiciones de contorno) (Figura 10), actuar sobre esta fuente contribuiría a

reducir los niveles máximos en episodios de alta concentración, lo que podría ayudar a evitar excedencias y reducir los efectos negativos de este compuesto en la salud y la vegetación. Estudios más específicos permitirán definir las pautas óptimas de reducción de emisiones considerando las características concretas de la región.

Objetivo 5

Desarrollo de nuevos métodos para evaluar la exposición de la población y proporcionar una visión eficaz de los riesgos para la salud.

La investigación dentro de este objetivo se encamina a la obtención de nuevos métodos para evaluar la exposición a la población, lo que resulta determinante para la valoración de efectos en salud. AIRTEC-CM busca mejorar la visión de la exposición global a la contaminación atmosférica a distintas escalas espaciales y temporales. Por ejemplo, se ha abordado la cuantificación detallada de la exposición de los peatones a los contaminantes atmosféricos (NOx) en un *hot-spot* de tráfico urbano. Para ello, se han combinado mapas de concentración realizados con modelos CFD muy alta resolución [50] con los flujos de peatones estimados mediante simulación microescala con VISSIM-VISWALK [51]. La Figura 11 muestra un esquema del proceso y los resultados.

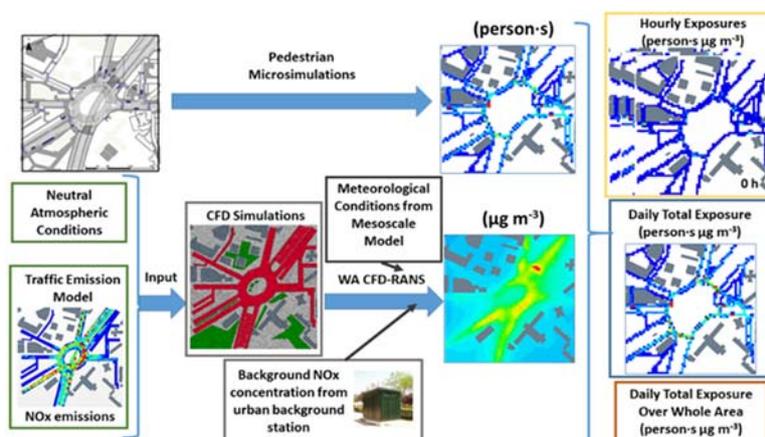


Figura 11. Esquema de la metodología de evaluación de la exposición a muy alta resolución [52].

Esta novedosa técnica para ayudar a resolver el reto de evaluar los impactos sobre la salud de la contaminación del aire y también a determinar la ubicación de estaciones de vigilancia de la calidad del aire, ya que las simulaciones preliminares indican que su micro-ubicación puede dar visiones muy distintas de los niveles de contaminación a los que están sometidos los ciudadanos en zonas urbanas [52].

Para entender la exposición en una escala espacial y temporal más amplia (escala de ciudad y uno o varios años), se está trabajando en la aplicación de modelos lineales de efectos mixtos alimentados con variables relevantes en superficie (población, distribución de emisiones, meteorología, topografía, etc.) e información satelital de muy alta resolución [53]. La Figura 12 ofrece un mapa con la media anual de concentración de PM_{2,5} sobre Madrid resultante de aplicar este procedimiento.

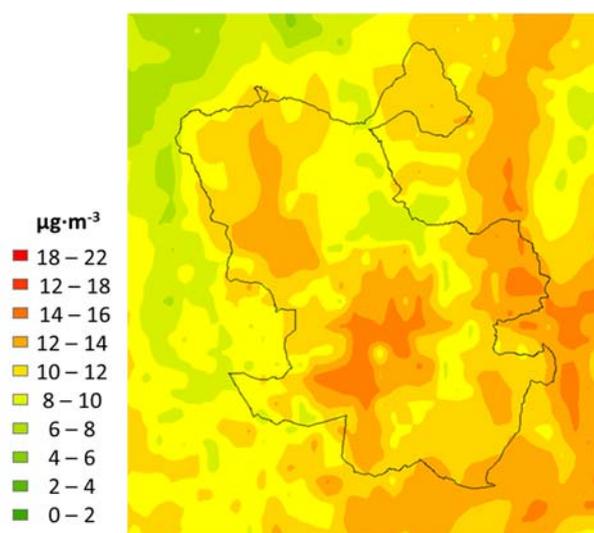


Figura 12. Concentración media anual de PM_{2.5} utilizando datos de satélite de muy alta resolución.

Actualmente, se está siguiendo a una pequeña cohorte de pacientes del Hospital Clínico San Carlos para analizar su microbioma intestinal. Esta población de control ofrece la posibilidad de analizar la posible influencia de los efectos conjuntos de exposición a factores bióticos y abióticos a través del análisis estadístico que consideren los niveles de calidad del aire a través de una o varias variables independientes, incluyendo la exposición a partículas (Figura 12). Los resultados de muestras de microbioma intestinal se combinarán con los datos de exposición físico-química y factores meteorológicos para analizarán las correlaciones derivadas de las observaciones y de los modelos diseñados en los objetivos anteriores para extraer conclusiones.

Objetivo 6

Evaluación en un contexto de cambio climático.

El objetivo final, a desarrollar durante la segunda mitad del proyecto consiste en evaluar los resultados y conclusiones de todos los objetivos anteriores en un contexto de clima cambiante. En este objetivo, los grupos de AIRTEC-CM estudiarán los efectos del cambio climático sobre la calidad biológica y físico-química del aire urbano para entender la evolución previsible y dependencias de la calidad del aire integral en el futuro. Para ello, la metodología más apropiada es la de anidamiento dinámico o downscaling [54], utilizada en el pasado con éxito para evaluar los impactos del cambio climático en la meteorología y la calidad del aire a nivel regional/local [55]. Esta aproximación permitirá entender los forzamientos del clima en los patrones meteorológicos generales que afectan tanto a la dinámica de los compuestos biológicos como químicos. Para el análisis se utilizarán como referencia las simulaciones globales de los principales escenarios de IPPC que consideran evoluciones alternativas en términos de forzamiento neto (*Representative Concentration Pathways*, RCP) [56].

Antes de acometer estas simulaciones y, de forma análoga a las tareas iniciales planteadas para otros objetivos, se ha realizado una recopilación exhaustiva de datos para analizar específicamente las relaciones entre variables meteorológicas y niveles de calidad del aire. La

aplicación de modelos aditivos generalizados ha permitido identificar el efecto de los cambios en la meteorología en los últimos 25 años sobre los niveles de calidad del aire en España [57].

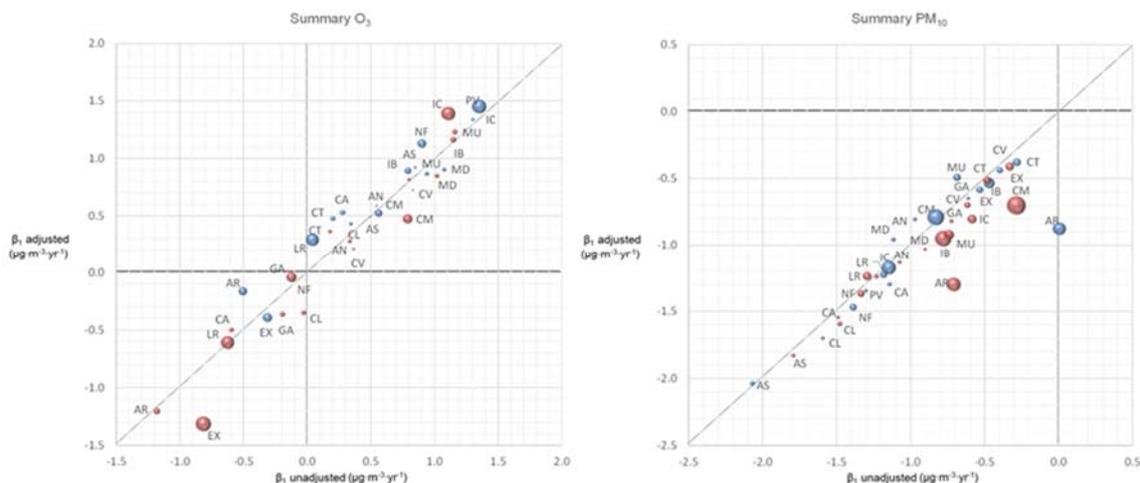


Figura 13. Efecto de la meteorología en los niveles de O₃ (izquierda) y PM₁₀ (derecha) en diferentes regiones de España en el periodo 1993-2017 [57].

Un estudio en colaboración con la escuela de Salud Pública de la Universidad de Harvard [57], apunta a que los incrementos de temperatura observados junto con los cambios en la humedad y viento, en general han mermado la eficacia de las políticas de reducción de emisiones y, por tanto, sus efectos positivos en la salud. Por ejemplo, la mortalidad asociada a los niveles de concentración de partículas (PM₁₀) en España entre 1993 y 2017 se hubiese reducido un 10% más si la meteorología no hubiese variado en dicho periodo. Estos resultados permiten concluir que es preciso intensificar los esfuerzos de reducción de emisiones contaminantes en un contexto de cambio climático. Esto es necesario no sólo para alcanzar los objetivos climáticos sino para minimizar el efecto negativo de la contaminación atmosférica en la salud pública.

BIBLIOGRAFIA

- [1] World Health Organization (WHO), 2016. Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease. ISBN 978 92 4 151135 3. [Available online at: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1061179/retrieve>]
- [2] European Environment Agency (EEA), 2019. Air quality in Europe - 2019 report. EEA Report No 527 10/2019. [Available online at: https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-528-2019/at_download/file]
- [3] United Nations (UN), 2015. World Urbanization Prospects. [Available online at: <https://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Report.pdf>]
- [4] Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global

- Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570–574.
<https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- [5] Wang, T., Dessler, A., Schoeberl, M., Randel, W., & Kim, J.-E. (2015). The impact of temperature vertical structure on trajectory modeling of stratospheric water vapor. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 3517–3526. <https://doi.org/10.5194/acp-15-3517-2015>
- [6] Kalnay, E., & Cai, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 423(6939), 528–531. <https://doi.org/10.1038/nature01675>
- [7] Chen, H., Goldberg, M. S., & Villeneuve, P. J. (2008). A systematic review of the relation between long-term exposure to ambient air pollution and chronic diseases. *Reviews on Environmental Health*, 23(4), 243–297. <https://doi.org/10.1515/reveh.2008.23.4.243>
- [8] Zhang, Q., Streets, D., Carmichael, G., He, K., Huo, H., Kannari, A., Klimont, Z., Park, I., Reddy, E. S., Fu, J., Chen, D., Duan, L., Lei, Y., Wang, L., & Yao, Z. (2009). Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5131–5153, <https://doi.org/10.5194/acp-9-5131-2009>
- [9] Sunyer, J., Suades-González, E., García-Esteban, R., Rivas, I., Pujol, J., Alvarez-Pedrerol, M., Forns, J., Querol, X., & Basagaña, X. (2017). Traffic-related Air Pollution and Attention in Primary School Children: Short-term Association. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 28(2), 181–189. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000603>
- [10] Fröhlich-Nowoisky, J., Kampf, C. J., Weber, B., Huffman, J. A., Pöhlker, C., Andreae, M. O., Lang-Yona, N., Burrows, S. M., Gunthe, S. S., Elbert, W., Su, H., Hoor, P., Thines, E., Hoffmann, T., Després, V. R., & Pöschl, U. (2016). Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research*, 182, 346–376. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.018>
- [11] Nunez, A., de Paz, G., Rastrojo, A., Garcia, A., Alcamí, A., Adela M., G.-B., & Moreno, D. (2016). Monitoring of airborne biological particles in outdoor atmosphere. Part 1: Importance, variability and ratios. *International Microbiology : The Official Journal of the Spanish Society for Microbiology*, 19, 1–13. <https://doi.org/10.2436/20.1501.01.258>
- [12] Saiz-Jimenez, C. (1995). Deposition of anthropogenic compounds on monuments and their effect on airborne microorganisms. *Aerobiologia*, 11(3), 161–175. <https://doi.org/10.1007/BF02450035>
- [13] van Heijnsbergen, E., Schalk, J. A. C., Euser, S. M., Brandsema, P. S., den Boer, J. W., & de Roda Husman, A. M. (2015). Confirmed and Potential Sources of Legionella Reviewed. *Environmental Science & Technology*, 49(8), 4797–4815. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00142>
- [14] Fernstrom, A., & Goldblatt, M. (2013). Aerobiology and Its Role in the Transmission of Infectious Diseases. *Journal of Pathogens*, 2013, 493960. <https://doi.org/10.1155/2013/493960>
- [15] Bousquet, J., Khaltaev, N., Cruz, A. A., Denburg, J., Fokkens, W. J., Togias, A., Zuberbier, T.,

- Baena-Cagnani, C. E., Canonica, G. W., van Weel, C., Agache, I., Ait-Khaled, N., Bachert, C., Blaiss, M. S., Bonini, S., Boulet, L.-P., Bousquet, P.-J., Camargos, P., Carlsen, K.-H., ... Williams, D. (2008). Allergic Rhinitis and its Impact on Asthma (ARIA) 2008 update (in collaboration with the World Health Organization, GA(2)LEN and AllerGen). *Allergy*, 63 Suppl 86, 8–160. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2007.01620.x>
- [16] Cramer, R., Garbani, M., Rhyner, C., & Huitema, C. (2014). Fungi: the neglected allergenic sources. *Allergy*, 69(2), 176–185. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/all.12325>
- [17] Holton, J. R., & Hakim, G. J. (Eds.). (2013). In *An Introduction to Dynamic Meteorology (Fifth Edition)* (Fifth Edition, p. v). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384866-6.00039-8>
- [18] Borge, R., Narros, A., Artíñano, B., Yagüe, C., Gómez-Moreno, F. J., de la Paz, D., Román-Cascón, C., Díaz, E., Maqueda, G., Sastre, M., Quaassdorff, C., Dimitroulopoulou, C., & Vardoulakis, S. (2016). Assessment of microscale spatio-temporal variation of air pollution at an urban hotspot in Madrid (Spain) through an extensive field campaign. *Atmospheric Environment*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.020>
- [19] Santiago, J.L., Martín, F., Martilli, A. (2013). A computational fluid dynamic modelling approach to assess the representativeness of urban monitoring stations. *Science of The Total Environment* 454–455 (1) 61-72
- [20] Loomis, D., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., Guha, N., Baan, R., Mattock, H., & Straif, K. (2013). The carcinogenicity of outdoor air pollution. In *The Lancet. Oncology* (Vol. 14, Issue 13, pp. 1262–1263). [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(13\)70487-x](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(13)70487-x)
- [21] Reinmuth-Selzle, K., Kampf, C. J., Lucas, K., Lang-Yona, N., Fröhlich-Nowoisky, J., Shiraiwa, M., Lakey, P. S. J., Lai, S., Liu, F., Kunert, A. T., Ziegler, K., Shen, F., Sgarbanti, R., Weber, B., Bellinghausen, I., Saloga, J., Weller, M. G., Duschl, A., Schuppan, D., & Pöschl, U. (2017). Air Pollution and Climate Change Effects on Allergies in the Anthropocene: Abundance, Interaction, and Modification of Allergens and Adjuvants. *Environmental Science & Technology*, 51(8), 4119–4141. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04908>
- [22] Watts, N., Adger, W. N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., Chaytor, S., Colbourn, T., Collins, M., Cooper, A., Cox, P. M., Depledge, J., Drummond, P., Ekins, P., Galaz, V., Grace, D., Graham, H., Grubb, M., Haines, A., ... Costello, A. (2015). Health and climate change: policy responses to protect public health. *Lancet* (London, England), 386(10006), 1861–1914. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60854-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60854-6)
- [23] Jacob, D. J., & Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43(1), 51–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>
- [24] Engardt, M., Bergström, R., & Andersson, C. (2009). Climate and Emission Changes Contributing to Changes in Near-surface Ozone in Europe over the Coming Decades: Results from Model Studies. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 38(8), 452–458. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-38.8.452>

- [25] Monks, P. S., Granier, C., Fuzzi, S., Stohl, A., Williams, M. L., Akimoto, H., Amann, M., Baklanov, A., Baltensperger, U., Bey, I., Blake, N., Blake, R. S., Carslaw, K., Cooper, O. R., Dentener, F., Fowler, D., Fragkou, E., Frost, G. J., Generoso, S., ... von Glasow, R. (2009). Atmospheric composition change – global and regional air quality. *Atmospheric Environment*, 43(33), 5268–5350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.021>
- [26] Forkel, R., Balzarini, A., Baró, R., Bianconi, R., Curci, G., Jiménez-Guerrero, P., Hirtl, M., Honzak, L., Lorenz, C., Im, U., Pérez, J. L., Pirovano, G., San José, R., Tuccella, P., Werhahn, J., & Žabkar, R. (2015). Analysis of the WRF-Chem contributions to AQMEII phase2 with respect to aerosol radiative feedbacks on meteorology and pollutant distributions. *Atmospheric Environment*, 115, 630–645. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.056>
- [27] Ziello, C., Sparks, T. H., Estrella, N., Belmonte, J., Bergmann, K. C., Bucher, E., Brighetti, M. A., Damialis, A., Detandt, M., Galán, C., Gehrig, R., Grewling, L., Gutiérrez Bustillo, A. M., Hallsdóttir, M., Kockhans-Bieda, M.-C., De Linares, C., Myszkowska, D., Pàldy, A., Sánchez, A., ... Menzel, A. (2012). Changes to Airborne Pollen Counts across Europe. *PLOS ONE*, 7(4), 1–8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034076>
- [28] Guenther, A. B., Jiang, X., Heald, C. L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L. K., & Wang, X. (2012). The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1471–1492. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>
- [29] Hogrefe, C., Isukapalli, S. S., Tang, X., Georgopoulos, P. G., He, S., Zalewsky, E. E., Hao, W., Ku, J.-Y., Key, T., & Sistla, G. (2011). Impact of biogenic emission uncertainties on the simulated response of ozone and fine particulate matter to anthropogenic emission reductions. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 61(1), 92–108. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.61.1.92>
- [30] Andersson-Sköld, Y., & Simpson, D. (2001). Secondary organic aerosol formation in northern Europe: A model study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7357–7374. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2000JD900656>
- [31] Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Wiedinmyer, C., Helmig, D., Matsunaga, S., Potosnak, M., Milford, J., & Guenther, A. (2008). Monoterpene and Sesquiterpene Emission Estimates for the United States. *Environmental Science & Technology*, 42(5), 1623–1629. <https://doi.org/10.1021/es702274e>
- [32] Beggs, P. J. (2014). *Climate change and global health*. Wallingford: CAB International, 105–213.
- [33] Vivanco-Hidalgo, R. M., Wellenius, G. A., Basagaña, X., Cirach, M., González, A. G., Ceballos, P. de, Zabalza, A., Jiménez-Conde, J., Soriano-Tarraga, C., Giralte-Steinhauer, E., Alastuey, A., Querol, X., Sunyer, J., & Roquer, J. (2018). Short-term exposure to traffic-related air pollution and ischemic stroke onset in Barcelona, Spain. *Environmental Research*, 162, 160–165. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.12.024>

- [34] Shindell, D., J.C.I. Kuylenstierna, E. Vignati, R. van Dingenen, M. Amann, Z. Klimont, S.C. Anenberg, N. Muller, G. Janssens-Maenhout, F. Raes, J. Schwartz, G. Faluvegi, L. Pozzoli, K. Kupiainen, L. Höglund-Isaksson, L. Emberson, D. Streets, V. Ramanathan, K. Hicks, N.T.K. Oanh, G. Milly, M. Williams, V. Demkine, and D. Fowler (2012). Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security. *Science*, 335, 183-189, doi:10.1126/science.1210026
- [35] West, J.J., Fiore, A.M. & Horowitz, L.W. (2012). Scenarios of methane emission reductions to 2030: abatement costs and co-benefits to ozone air quality and human mortality. *Climatic Change* 114, 441–461. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0426-4>
- [36] Picornell, M., Ruiz, T., Borge, R., García, P., de la Paz, D., Lumbreras, J. (2019). Population dynamics based on mobile phone data to improve air pollution exposure assessment. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 29(2), 278-291.
- [37] Cordero, J.M., Núñez, A., García, A. M., & Borge, R. (2020). Assessment and statistical modelling of airborne microorganisms in Madrid. *Environmental Pollution*, In Press.
- [38] Cordero, Jose Maria, Rojo, J., Gutiérrez-Bustillo, A. M., Narros, A., & Borge, R. (2020). Predicting the Olea pollen concentration with a machine learning algorithm ensemble. *International Journal of Biometeorology*, In press.
- [39] Yagüe, C., Zurita, E., Martínez, A. (1991). Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(3), 327–332. doi:10.1016/0957-1272(91)90004-X
- [40] Coz, E., Gómez-Moreno, F.J., Casuccio, G.S., Artífano, B., 2010. Variations on morphology and elemental composition of mineral dust particles from local, regional, and long-range transport meteorological scenarios. *J. Geophys. Res.* 2010; 115: D12204
- [41] Cordero, J. M., Borge, R., & Narros, A. (2018). Using statistical methods to carry out in field calibrations of low cost air quality sensors. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 267, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.04.021>
- [42] Borge, R., Santiago, J.L., de la Paz, D., Martín, F., Domingo, J., Valdés, C., Sánchez, B., Rivas, E., Rozas, M.T., Lázaro, S., Pérez, J., Fernández, A. (2018). Application of a short term air quality action plan in Madrid (Spain) under a high-pollution episode - Part II: Assessment from multi-scale modelling. *Science of the Total Environment* 635, 1574-1584.
- [43] Li, Q., Borge, R., Sarwar, G., de la Paz, D., Gantt, B., Domingo, J., Cuevas, C.A., Saiz-Lopez, A. (2019). Impact of halogen chemistry on air quality in coastal and continental Europe: application of CMAQ model and implication for regulation. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, 15321–15337. <https://doi.org/10.5194/acp-19-15321-2019>
- [44] Garcia-Nieto, D., Benavent, N., Borge, R., Saiz-Lopez, A. (2020). Two-dimensional monitoring of air pollution in Madrid using a MAXDOAS-2D instrument. *Atmospheric Measuring Techniques*. <https://amt.copernicus.org/preprints/amt-2020-239/>
- [45] Jung, D., de la Paz, D., Cordero, J.M., Borge, R. (2020). Assessment of the Madrid region air quality zoning based on mesoscale modelling and k-means clustering. *Proceedings of*

Abstracts 12th International Conference on Air Quality Science and Application. Online Conference (Interactive Sessions 18-22 May 2020). P41.

- [46] de la Paz, D., Borge, R., Perez, J., de Andrés, J.M. (2020). Contributions to summer ground-level O₃ in Madrid region Proceedings of Abstracts 12th International Conference on Air Quality Science and Application. Online Conference (Interactive Sessions 18-22 May 2020). P153.
- [47] Escudero M., Arjo Segers A., Richard Kranenburg R., Querol X., Alastuey A., Borge R., de la Paz D., Gangoiti G., and Schaap M. (2019). Analysis of summer O₃ in the Madrid air basin with the LOTOS-EUROS chemical transport model. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 14211–14232, <https://doi.org/10.5194/acp-19-14211-2019>
- [48] Kwok R, Baker K, Napelenok S, Tonnesen G. (2015). Photochemical grid model implementation and application of VOC, NO_x, and O₃ source apportionment. *Geoscientific Model Development*; 8: 99-114
- [49] Querol X, Gangoiti G, Mantilla E, Alastuey A, Minguillón MC, Amato F, et al. (2017). Phenomenology of high-ozone episodes in NE Spain. *Atmospheric Chemistry and Physics*; 17: 2817-2838.
- [50] B. Sanchez, J.L. Santiago, A. Martilli, F. Martin, R. Borge, C. Quaassdorff, D. de la Paz (2017). Modelling NO_x concentrations through CFD-RANS in an urban hot-spot using high resolution traffic emissions and meteorology from a mesoscale model. *Atmos. Environ.*, 163, 155-165, 10.1016/j.atmosenv.2017.05.022
- [51] C. Quaassdorff, R. Borge, J. Perez, J. Lumbreras, D. de la Paz, J.M. de Andres (2016). Microscale traffic simulation and emission estimation in a heavily trafficked roundabout in Madrid (Spain). *Sci. Total Environ.*, 566, 416-427, 10.1016/j.scitotenv.2016.05.051
- [52] Santiago, J.L., Borge, R., Sanchez, B., Quaassdorff, C., de la Paz, D., Martilli, A., Rivas, E., Martin, F., 2021. Estimates of Pedestrian Exposure to Atmospheric Pollution using High-Resolution Modelling in a Real Traffic Hot-spot. *Science of the Total Environment* 755, Part 1, 142475. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142475>
- [53] Kloog, I., A. Chudnovsky, Allan C. Just, Francesco Nordio, Petros Koutrakis, Brent A. Coull, Alexei Lyapustin, Yujie Wang, Joel Schwartz (2014). A new hybrid spatio-temporal model for estimating daily multi-year PM_{2.5} concentrations across northeastern USA using high resolution aerosol optical depth data. *Atmospheric Environment* 95, 581-590. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.07.014>
- [54] Gao, Y., Fu, J.S., Drake, J.B., Liu, Y., Lamarque, J-F. (2012). Projected changes of extreme weather events in the eastern United States based on a high resolution climate modeling system. *Environ Res Lett* 7, 044025. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044025>
- [55] Borge, R., Arrizabalaga, J., de la Paz, D. (2016). Influence of climate change on future air quality in the Iberian Peninsula. *International Conference on Urban Risks (ICUR 2016) Proceedings*, pp. 591-598. ISBN: 978-989-95094-1-2.
- [56] van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. et al. (2011). The representative concentration

pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

[57] Borge, R., Weeberb, J.R., Yagüe, C., Jhun, I., Koutrakis, P. (2019). Impact of weather changes on air quality and related mortality in Spain over a 25 year period [1993–2017]. *Environment International* 133, 105272. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105272>