

Análisis de datos satelitales de NO₂ en entornos urbanos: estudio de caso en la ciudad de Madrid

REVISTA **MAPPING**
Vol.34, 217, 62-72
2025
ISSN: 1131-9100

Analysis of satellite data on NO₂ in urban environments: case study of the city of Madrid

Carlos Morillas López

Resumen

El presente estudio analiza el uso de datos satelitales del sensor TROPOMI a bordo del satélite Sentinel-5P para evaluar los niveles de dióxido de nitrógeno (NO₂) en entornos urbanos, centrándose en la Comunidad de Madrid durante 2023. Se compararon las concentraciones troposféricas medidas por el satélite con datos in situ de estaciones terrestres de calidad del aire, obteniendo una correlación fuerte ($r=0,75$) que se incrementa en zonas exclusivamente urbanas ($r=0,79$). Los resultados revelan patrones estacionales, con mayores concentraciones en invierno debido a fenómenos meteorológicos como la inversión térmica y el uso de calefacción, y una disminución en verano asociada al periodo vacacional. Además, se identificaron diferencias entre días laborables y fines de semana, reflejando la influencia del tráfico como principal fuente de emisiones. Esta equivalencia ha servido, además, para evaluar la efectividad de políticas de mitigación en la ciudad.

Aunque los datos satelitales no sustituyen por completo las mediciones in situ, su integración, junto con técnicas avanzadas como el *machine learning*, ofrece nuevas oportunidades para el monitoreo y gestión de la calidad del aire. Este trabajo destaca la necesidad de continuar desarrollando modelos que combinen ambas fuentes para optimizar su aplicabilidad en diferentes regiones.

Abstract

This study analyzes the use of satellite data from the TROPOMI sensor aboard Sentinel-5P to evaluate nitrogen dioxide (NO₂) levels in urban environments, focusing on the Community of Madrid during 2023. Tropospheric concentrations measured by the satellite were compared with in situ data from ground-based air quality stations, showing a strong correlation ($r=0.75$), which improves in exclusively urban areas ($r=0.79$). The results reveal seasonal patterns, with higher concentrations in winter due to meteorological phenomena such as thermal inversions and heating emissions, and lower levels in summer associated with vacation periods. Differences were also identified between weekdays and weekends, reflecting the influence of traffic as the main emission source. This equivalence has also been used to assess the effectiveness of mitigation policies in the city. Although satellite data cannot fully replace in situ measurements, their integration with advanced techniques such as machine learning offers new opportunities for air quality monitoring and management. This work underscores the need to continue developing models that combine both sources to optimize their applicability in different regions.

Palabras clave: Dióxido de nitrógeno, Calidad del aire, Teledetección, Entornos urbanos, TROPOMI, Madrid

Keywords: Nitrogen Dioxide, Air quality, Remote sensing, Urban environments, TROPOMI, Madrid

PhD, Universidad Politécnica de Madrid
c.morillas@upm.es

Recepción 12/12/2024
Aprobación 16/01/2025

1. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire en las ciudades se ha convertido en una de las principales preocupaciones ambientales y de salud pública del siglo XXI. En 2019, el 99% de la población mundial residía en áreas donde no se respetaban las directrices sobre la calidad del aire establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021). En el último informe mundial sobre la calidad del aire publicado por el *Health Effects Institute* (HEI) en colaboración con Unicef se concluye que la contaminación atmosférica —tanto en exteriores como en interiores— se asoció a 8,1 millones de muertes a nivel global en 2021. Estas cifras colocan a esta causa como el segundo factor de riesgo de mortalidad en el mundo, solo superado por la hipertensión arterial (HEI, 2024). Además, se suma su papel en el desarrollo de millones de casos de enfermedades cardíacas y respiratorias o cánceres, y su efecto agravante sobre otras patologías preexistentes (Buzikov et al., 2017; OMS, 2013; Shaw y Van Heyst, 2022).

En el mismo informe se incluyen, por primera vez, resultados sobre los niveles de exposición al dióxido de nitrógeno (NO₂). Este contaminante representa una grave amenaza en áreas urbanas con alta densidad de población, ya que sus principales fuentes antropogénicas son el tráfico rodado, la generación de energía y, en menor medida, la calefacción doméstica.

En España, la situación es especialmente alarmante. Estudios recientes del Instituto de Salud Global de Barcelona (ISGlobal, Khomenko et al., 2021) sitúan a varias ciudades españolas entre los municipios europeos con mayor número de muertes evitables debido a la exposición a altos niveles de NO₂. En concreto, el área metropolitana de Madrid ocupa la primera posición y Barcelona, la sexta.

La normativa de la Unión Europea (UE) está adoptando medidas graduales para abordar el problema de la contaminación por NO₂. El valor límite anual (VLA) para este contaminante, que refleja su concentración promedio a lo largo de un año, se redujo recientemente de 40 µg/m³ a 20 µg/m³ con la aprobación de la nueva Directiva 2024/2881 sobre la calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia en Europa (UE, 2024). Sin embargo, este nuevo límite solo será de cumplimiento obligatorio a partir de 2030 y, aun así, continuará siendo el doble del nivel recomendado por la OMS, establecido en 10 µg/m³. Desde que comenzaron a publicarse los informes de evaluación de la calidad del aire en España en 2008 (MITERD, 2022), se han registrado violaciones recurrentes del anterior límite de 40 µg/m³ en diversas regiones españolas, lo que evidencia la persistencia del desafío de reducir la contaminación atmosférica para cumplir con los nuevos estándares europeos y las recomendaciones internacionales.

El NO₂ es uno de los cinco contaminantes atmosféricos contemplados por el Índice de Calidad del Aire (ICA) español. La Ley 7/2021 de cambio climático y transición energética (MPJRC, 2021) estableció que los municipios españoles con más de 50 000 habitantes debían implementar zonas de bajas emisiones (ZBE) y planes de movilidad urbana sostenible antes de 2023. Sin embargo, a punto de llegar a 2025, muchos municipios se encuentran rezagados en el cumplimiento de esta normativa. Además, la mayoría carecen de una infraestructura de monitorización de la calidad del aire para evaluar los posibles progresos. Según datos del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD, 2024), de los 151 municipios afectados por la normativa, 98 cuentan con una sola estación de monitoreo de calidad del aire o ninguna. Y en tales casos, los puntos de muestreo suelen ubicarse cerca de las principales fuentes de emisión, como intersecciones de autopistas, áreas industriales o centros urbanos con alta congestión, donde se espera encontrar mayor contaminación. Aunque los datos proporcionados por estas estaciones son de alta calidad y se actualizan con frecuencia horaria, su alcance se limita al entorno inmediato de cada dispositivo, lo que restringe la visión general sobre la calidad del aire en todo un municipio.

En este contexto, los datos de teledetección satelital adquieren una gran relevancia para ofrecer una cobertura regional completa. La tecnología de teledetección para el análisis de la composición atmosférica ha avanzado significativamente en los últimos años, proporcionando datos con una resolución espacial cada vez mayor. Un hito destacado en este ámbito fue el lanzamiento en 2017 del satélite Sentinel-5P como parte del programa Copernicus de la UE.

Equipado con el avanzado sensor TROPOMI (*Tropospheric Monitoring Instrument*), el Sentinel-5P marcó un progreso significativo respecto a misiones previas como GOME, SCIAMACHY y OMI, ofreciendo una cobertura global diaria con un tamaño de píxel de 5,5 x 3,5 km², lo que permite un nivel de detalle mucho mayor en la monitorización de contaminantes atmosféricos a escala global. Su capacidad para captar datos con alta precisión ha revolucionado la forma en que se identifican fuentes de emisión, fortaleciendo la gestión ambiental y la planificación sostenible.

De entre todas las especies observadas por TROPOMI, precisamente el NO₂ destaca como uno de los más relevantes para el análisis de concentraciones a nivel superficial. La química atmosférica del NO₂ presenta características únicas que lo diferencian de otros gases detectados por el satélite. Su ventana de absorción espectral específica, combinada con su corto tiempo de vida atmosférico —aproximadamente 2 horas en verano y 12 horas en invierno—, permite distinguir con precisión las emisiones

recientes de las concentraciones de fondo. Esta propiedad hace que el NO₂ pueda ser detectado muy cerca de sus fuentes de generación, facilitando la trazabilidad directa de los focos de emisión. En contraste, otros contaminantes no comparten estas características, lo que hace más complejo su seguimiento en tiempo y espacio.

Un aspecto adicional clave en el estudio del NO₂ es su distribución vertical en la atmósfera, que varía significativamente entre regiones contaminadas y no contaminadas. En áreas de baja contaminación, la mayor parte del NO₂ (normalmente más del 90 %) se encuentra en la estratosfera. En contraste, en regiones con altas emisiones, como grandes ciudades, entre el 50 % y el 90 % del NO₂ se concentra en la troposfera, principalmente bajo la capa límite planetaria.

La concentración de NO₂ en la troposfera libre (es decir, la región comprendida entre la capa límite planetaria, y la tropopausa, que separa la troposfera de la estratosfera) es aproximadamente 10 veces menor que bajo una capa límite ligera o moderadamente contaminada. Esto permite interpretar la columna total de NO₂ observada por TROPOMI como la suma de las contribuciones de la capa límite y de la estratosfera. Esta interpretación se facilita aún más por el hecho de que en la tropopausa el intercambio vertical de aire es mínimo. Gracias a esta clara separación, los modelos atmosféricos pueden diferenciar con precisión las componentes troposférica y estratosférica del NO₂, mejorando la interpretación de las mediciones satelitales y su utilidad para monitorear las fuentes de emisión y detectar eventos ocurridos a nivel de suelo. Sin embargo, su utilización como herramienta para evaluar la calidad del aire en ciudades apenas se ha comenzado a explorar, especialmente en municipios de España.

En este artículo se presenta la metodología y los resultados del análisis de las imágenes de NO₂ troposférico de Sentinel-5P en la Comunidad de Madrid durante 2023, con el objetivo de evaluar la correlación entre los datos de columna obtenidos por el satélite y los registros *in situ* de las estaciones terrestres de calidad del aire. Se incluye un análisis de la distribución espaciotemporal de la contaminación. Además, se explora su utilidad como herramienta para medir la efectividad de las políticas de mitigación de emisiones, se identifican los principales factores que limitan su aplicación y se ofrecen perspectivas de futuro para optimizar su uso en estrategias de sostenibilidad y adaptación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describe la metodología común para abordar todos los estudios de caso expuestos en el presente artículo.

2.1 Datos de satélite

El satélite Sentinel-5P sigue una órbita cuasipolar heliosíncrona, inclinada 8,7° respecto al eje norte-sur, a una altitud de 824 km. Cruza el nodo ascendente ecuatorial a las 13:30 hora solar local (*local solar time*, LST) y completa su ciclo orbital cada 16 días, con un período de 101 minutos que le permite realizar 16 órbitas diarias. El sensor TROPOMI es su única carga útil, y consta de cuatro espectrómetros orientados en dirección nadir, que operan en ocho bandas del espectro electromagnético: UV/visible (270-500 nm), NIR (675-755 nm) y SWIR (2305-2385 nm). Cada segundo, realiza mediciones que abarcan un área de barrido de 2600 km de ancho y 7 km en la dirección de desplazamiento del satélite, permitiendo generar una cobertura global completa cada 24 horas (Nijkerk et al., 2017; Veeffkind et al., 2012). La resolución en nadir de las imágenes en la mayoría de bandas espectrales era originalmente de 7 x 3,5 km², pero, gracias a una revisión de los ajustes de muestreo, fue mejorada hasta 5,5 x 3,5 km². En varias ocasiones, dos órbitas consecutivas se solapan sobre la región de interés, haciendo posible más de una observación en un mismo día (Figura 1).

Los datos de concentración de NO₂ en columna troposférica utilizados en esta investigación fueron obtenidos a través de *Google Earth Engine* (GEE, 2018), una plataforma en la nube de análisis geoespacial desarrollada por Google. Esta herramienta proporciona acceso a productos satelitales precargados de Copernicus y de otras misiones espaciales internacionales y una biblioteca de funciones programables en JavaScript, optimizadas para la manipulación y análisis de grandes volúmenes de datos.

Las imágenes utilizadas, clasificadas como productos de Nivel-3, derivan de un reprocesamiento de los datos originales de Nivel-2 (producto final con las columnas totales georreferenciadas), los cuales se encuentran en formato netCDF y están organizados por tiempo de muestreo en la plataforma oficial de la ESA Copernicus Data

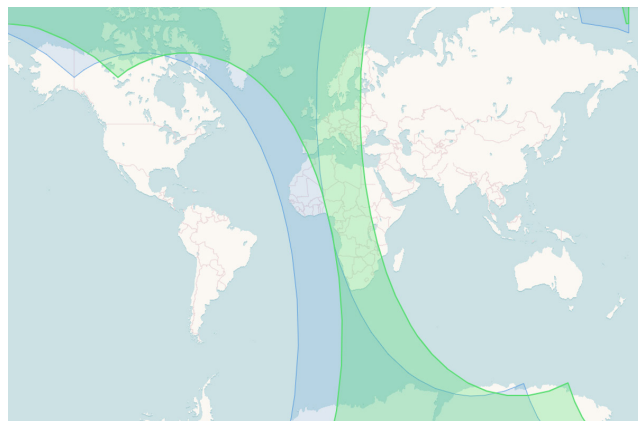


Figura 1. Superposición entre dos órbitas consecutivas de Sentinel-5P sobre la región de estudio.

Space Ecosystem (ESA, 2024). Este reprocesamiento transforma los datos en una representación ráster más compacta y geográficamente alineada en una malla uniforme de 1 x 1 km², lo que facilita su integración en sistemas de información geográfica y su comparación con otras bases de datos e imágenes geoespaciales. Las unidades de concentración en columna se ofrecen en moles/m².

Este enfoque no solo permite una organización más eficiente de la información, sino que también agiliza considerablemente los tiempos de análisis, especialmente en estudios con extensas series temporales. Además, la naturaleza basada en la nube de GEE permite realizar el procesamiento y análisis desde cualquier dispositivo con conexión a Internet, lo que resulta particularmente útil en proyectos de gran envergadura o en contextos colaborativos.

Cada imagen capturada sigue una convención estándar de identificación, que incluye metadatos como la fecha y la hora de inicio de cada órbita. Estos datos se vinculan a las imágenes procesadas de Nivel-3, lo que permitió estimar con precisión las horas de paso del satélite sobre la Península Ibérica para su comparación con los datos de la infraestructura de calidad del aire. Estas horas de paso ocurren regularmente entre las 11:00 y 14:00 UTC (12:00 y 16:00 hora local).

Para garantizar la calidad de los datos empleados, se eliminaron píxeles con valores inferiores a -0,001 mol/m², ya que pueden corresponder a errores de medición o procesamiento. Para facilitar el manejo y la interpretación de los resultados, los datos originales fueron convertidos a unidades Dobson (*Dobson Units*, DU).

El total de imágenes de Nivel-3 empleadas ha sido de 416.

2.2 Datos in situ

La Comunidad de Madrid cuenta con una red de 48 estaciones de calidad del aire, 24 de ellas ubicadas en la ciudad de Madrid y el resto distribuidas por áreas rurales, urbanas y suburbanas (Figura 2). El NO₂ se mide en todas las estaciones mediante analizadores de quimioluminiscencia con frecuencia horaria. Los datos están disponibles públicamente desde 2001 para la ciudad y desde 2005 para el resto de la región, en unidades de concentración (µg/m³), proporcionando una base clave para estudios históricos y de tendencias en calidad del aire (Ayuntamiento de Madrid, 2024).

Entre todos los puntos de muestreo se recogieron 428 535 valores horarios de NO₂, de los cuales 89 054 se encontraron entre las horas de paso de Sentinel-5P.

2.3 Tratamiento de datos

Para garantizar una comparación directa entre los datos satelitales y los datos *in situ*, se seleccionaron valores horarios de las estaciones terrestres correspondientes al intervalo típico de paso del Sentinel-5P (de 12:00 a 16:00 hora local).

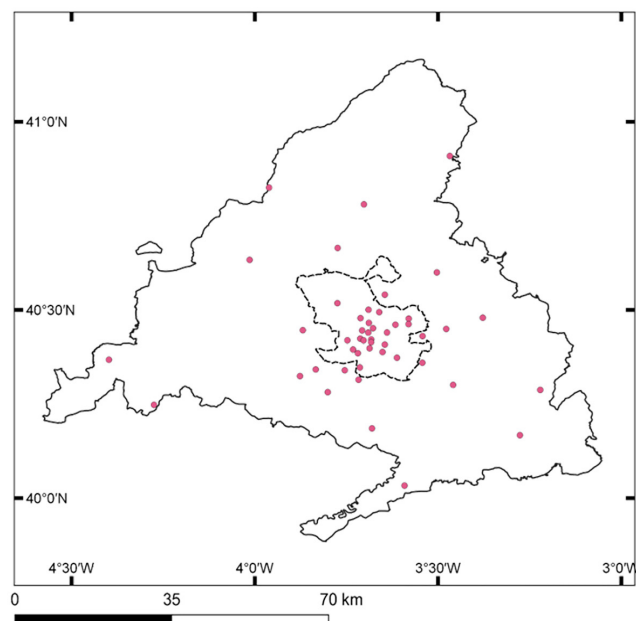


Figura 2. Ubicación de las estaciones de calidad del aire en la Comunidad de Madrid en 2023. La línea discontinua indica los límites del término municipal de Madrid.

Los horarios de las imágenes satelitales, registrados en UTC, se ajustaron al huso horario local de las ciudades estudiadas (UTC+1 en invierno y UTC+2 en verano) para calcular el promedio de las medidas disponibles en ese período. Este enfoque, basado en valores promediados, ha demostrado ser eficaz en estudios previos (Cedeno Jimenez et al., 2023; Cedeno Jimenez y Brovelli, 2023), ofreciendo resultados comparables o superiores a los obtenidos con valores instantáneos, posiblemente debido a errores en la estimación exacta de las horas de paso. Se obtuvieron 17 954 y 13 354 valores promedio diarios para los datos *in situ* y satelitales, respectivamente. Esta diferencia se debe a que la posible presencia de nubes limita la disponibilidad de datos de TROPOMI de forma constante.

Para analizar la evolución temporal de las concentraciones de NO₂, se utilizó la técnica de media móvil, especialmente útil para suavizar las series temporales y destacar tendencias subyacentes. El promedio se calculó generalmente para un intervalo de 30 días, dado que las representaciones gráficas se elaboraron, de igual forma, acumulando datos a nivel mensual. Esta metodología permitió identificar patrones estacionales y variaciones a largo plazo con mayor claridad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El coeficiente de correlación para las 48 estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire durante 2023 fue de $r=0,75$, $p<0,01$ (Figura 3). Se observaron

relaciones lineales más fuertes en el término municipal de Madrid ($r=0,79$) en comparación con el resto de la Comunidad, donde predominan las zonas suburbanas o rurales ($r=0,67$).

La disparidad entre ambos resultados puede atribuirse a dos factores principales: el perfil de emisiones y la influencia de la topografía. El perfil de emisiones define la cantidad de NO_2 liberada a la atmósfera, siendo más abundante en áreas densamente pobladas con actividades más intensivas. Esto aumenta la actividad en las regiones UV/visible del espectro, facilitando su detección por los sensores satelitales. Este fenómeno es común en entornos urbanos, donde la actividad humana es más significativa (Lamsal et al., 2013; Zhu et al., 2019). Hallazgos similares se observaron en Corea del Sur, donde los coeficientes de correlación fueron notablemente más altos dentro del área metropolitana de Seúl en comparación con otras regiones del país (Jeong y Hong, 2021).

Esta alta correlación dentro del término municipal ha permitido evaluar la efectividad de políticas específicas, como la implementación de la ZBE en el Distrito Centro de Madrid en 2018 y el confinamiento por la pandemia de COVID-19 en 2020 (Morillas et al., 2024).

El análisis de la ZBE constituyó el primer estudio de este tipo que empleó datos satelitales, demostrando la utilidad de la teledetección para identificar reducciones significativas en las concentraciones de NO_2 asociadas a restricciones de tráfico vehicular. Los resultados mostraron una evolución consistente en los niveles de contaminación equivalentes a los registrados por las estaciones de calidad del aire, tanto dentro de la ZBE como en áreas circundantes (Figura 4).

Atendiendo a la distribución espaciotemporal de la concentración de NO_2 en la región durante el año de estudio, se observa una marcada variación estacional. Los niveles troposféricos de NO_2 son significativamente

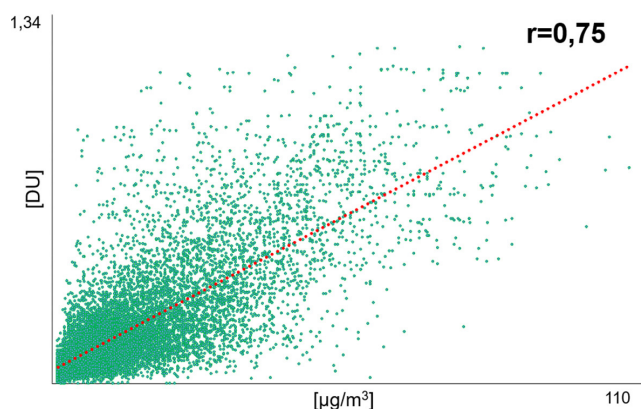


Figura 3. Gráfico de dispersión de datos promedio diarios de NO_2 troposférico de TROPOMI frente a observaciones in situ para las 48 estaciones de la Comunidad de Madrid en 2023 ($p<0.01$).

te más altos en los meses fríos en comparación con los cálidos. Durante los periodos de mayor acumulación, el epicentro de las concentraciones se localiza en el centro de la ciudad de Madrid, mientras que en los meses con menor contaminación, este se desplaza hacia el noreste de la región.

Estas diferencias están influenciadas por varios factores. En invierno, el periodo de vida medio del NO_2 es mayor debido a la menor intensidad de la radiación solar, que limita los procesos de fotólisis responsables de su eliminación. Este efecto se intensifica en Madrid por las frecuentes inversiones térmicas nocturnas, que atrapan los contaminantes cerca de la superficie. Además, los inventarios de emisiones indican que, durante esta estación, el uso de calefacción en áreas densamente pobladas contribuye de manera significativa a las emisiones, superando incluso las del transporte por carretera en ciertos momentos (McDuffie et al., 2020).

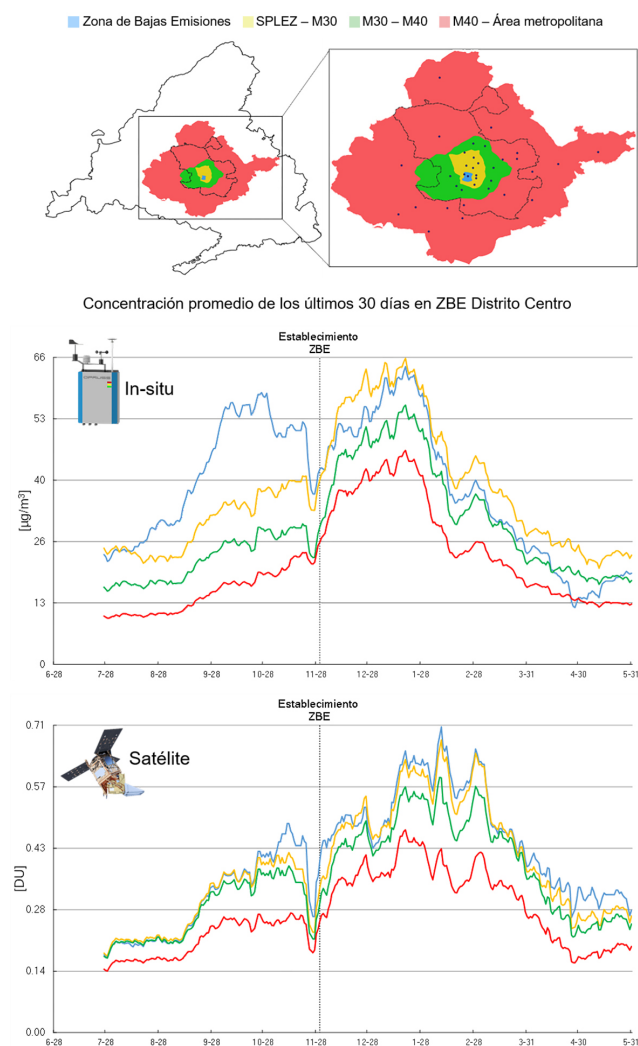


Figura 4. Resultados del estudio comparativo entre los datos de NO_2 troposférico de TROPOMI frente a observaciones in situ antes y después de la implementación de la ZBE de Distrito Centro de Madrid. Fuente: Morillas et al., 2024.

En contraste, durante los meses de verano, las emisiones antropogénicas disminuyen notablemente debido al periodo vacacional, acentuando la disminución. Estos patrones destacan la influencia combinada de factores meteorológicos y humanos en la dinámica espacio-temporal de NO₂ (Figura 5).

De hecho, al analizar las imágenes promedio mensuales por separado, es posible identificar focos de emisión específicos. Por ejemplo, en agosto se observa claramente que la concentración máxima de NO₂ se localiza sobre el aeropuerto, reflejando su papel como fuente intensiva de emisiones (Figura 6).

Los datos satelitales también permiten analizar las variaciones en la concentración de NO₂ según el día de la semana. Durante un período de 8 semanas entre marzo y mayo de 2023, se elaboraron imágenes promedio correspondientes a miércoles y jueves, y se compararon con las de sábados y domingos. Este enfoque excluye el impacto de las emisiones por calefacción, permitiendo centrarse en otras fuentes, como el transporte.

Los resultados muestran que los niveles de NO₂ son consistentemente más elevados durante los días laborales, mientras que en los fines de semana se registra una reducción general. Entre semana, las concentraciones más altas podrían asociarse al incremento en el

número de desplazamientos en vehículo privado entre la ciudad de Madrid y los municipios hacia el noreste (San Sebastián de los Reyes, Alcobendas o Alcalá de Henares, Figura 7).

Cabe destacar que la alta correlación que se encuentra en el presente caso de estudio puede no ser equivalente en otras localizaciones. Esto se debe principalmente a que la ciudad de Madrid se sitúa en la base de una cuenca montañosa (el Sistema Central), que condiciona el régimen de vientos y favorece la aparición de fenómenos de inversión térmica, especialmente en invierno. Esto limita la renovación e intercambio de masas de aire, por lo que la concentración de la contaminación atmosférica es más persistente que en otros lugares (Cersosimo et al., 2020; Goldberg et al., 2021; Griffin et al., 2019; Ialongo et al., 2020; Rudke et al., 2023). Es decir, que los datos de teledetección por sí solos no permiten estimar directamente la calidad del aire respirado por la población de la ciudad que se desee sin considerar antes los factores que afectan la distribución de los contaminantes. El principal factor limitante es la meteorología, especialmente la velocidad y dirección del viento.

Para abordar este desafío, en los últimos años se han empleado modelos atmosféricos tradicionales, aunque investigaciones recientes han explorado métodos más ágiles como modelos de regresión y técnicas de *machine learning*, que ofrecen mayor inmediatez y menor complejidad en su aplicación, obteniendo resultados prometedores (Chan et al., 2021; Kang et al., 2021).

El desafío principal radica en la falta de un modelo universal que funcione con éxito en todos los contextos. Dado que el viento es el principal agente de transporte atmosférico, pero la generación y eliminación de NO₂ responden a múltiples factores (como la radiación solar o la concentración de otras especies como el O₃), es esencial realizar un análisis detallado del contexto específico de cada región para obtener estimaciones más precisas.

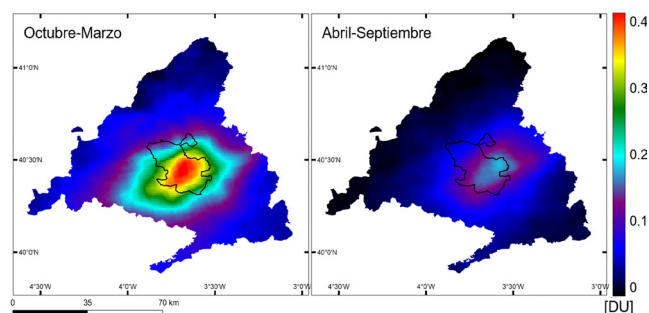


Figura 5. Concentración promedio de NO₂ troposférico observada por TROPOMI entre los meses de octubre y marzo (fríos) y abril y septiembre (cálidos) de 2023 en la Comunidad de Madrid. La línea negra indica los límites del término municipal de Madrid.

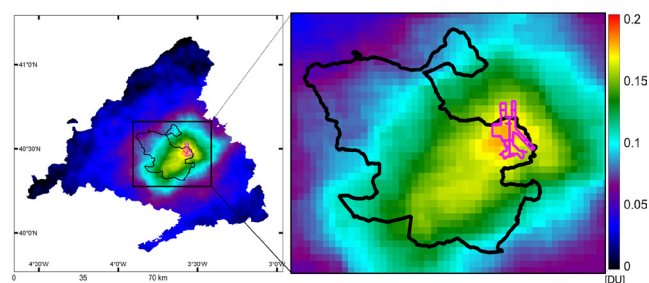


Figura 6. Concentración promedio de NO₂ troposférico observada por TROPOMI en el mes de agosto de 2023 en la Comunidad de Madrid. La línea negra indica los límites del término municipal de Madrid, y la línea morada los límites del aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid-Barajas.

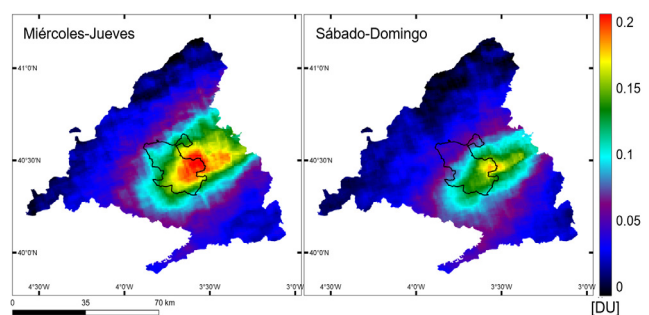


Figura 7. Concentración promedio de NO₂ troposférico observada por TROPOMI en días entre semana (miércoles-jueves) y fines de semana (sábado-domingo) en la Comunidad de Madrid. La línea negra indica los límites del término municipal de Madrid.

4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Existe una aplicabilidad prometedora en los datos satelitales de NO₂ proporcionados por el sensor TROPOMI a bordo del Sentinel-5P para complementar y expandir el alcance de las mediciones *in situ* de calidad del aire. En el caso de la Comunidad de Madrid, los resultados destacan una correlación significativa ($r=0,75$) entre las observaciones de columna troposférica obtenidas por el sensor TROPOMI y las mediciones *in situ* de las estaciones terrestres de calidad del aire durante 2023. En áreas urbanas como el término municipal de Madrid, esta correlación es aún más alta ($r=0,79$), lo que pone de manifiesto la capacidad del satélite para capturar dinámicas urbanas específicas, como las asociadas al tráfico vehicular. La comparación entre ambas bases de datos se realizó tomando exclusivamente el promedio de las mediciones registradas entre las horas de paso del satélite sobre la región.

Además, el análisis espaciotemporal muestra claras variaciones estacionales, con concentraciones de NO₂ más altas en invierno debido a fenómenos meteorológicos como la inversión térmica y las emisiones relacionadas con la calefacción, y niveles más bajos en verano, asociados a la reducción generalizada del tráfico. La propia naturaleza del gas, cuya vida media es mayor en invierno que en verano, acentúa esta tendencia. También se observó una diferenciación en los patrones de distribución semanal, con niveles más altos durante los días laborables que en los fines de semana, mostrando la influencia del transporte como fuente principal de emisiones. Además, es posible destacar focos de emisión específicos, como el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, especialmente en el mes de agosto.

Una contribución clave del enfoque expuesto fue la demostración de cómo los datos satelitales pueden evaluar la efectividad de políticas públicas. El caso de estudio ZBE de Madrid Central es el más destacado, mostrando datos equivalentes con las medidas *in situ* dentro y alrededor de la zona restringida.

Los resultados también destacan las limitaciones inherentes a la resolución espacial y temporal de los datos satelitales, lo que impide que estos puedan reemplazar por completo las mediciones *in situ*. Aspectos como la topografía, los patrones de viento y las dinámicas meteorológicas locales representan desafíos importantes para lograr una interpretación precisa y directa de las observaciones satelitales.

Para mejorar la correspondencia entre las mediciones *in situ* y los datos satelitales, resulta fundamental desa-

rollar modelos ajustados a las características específicas de cada región. Esto implica incorporar patrones locales de circulación atmosférica y las variaciones estacionales en las emisiones. Métodos avanzados, como modelos de regresión personalizados y técnicas de *machine learning*, representan una solución prometedora al ofrecer mayor flexibilidad y capacidad de adaptación a las complejidades propias de cada entorno. Estos enfoques no solo tienen el potencial de optimizar la correlación entre ambas fuentes de datos, sino también de ampliar las posibilidades de aplicación de los datos satelitales en la gestión precisa y específica de la calidad del aire. Actualmente, la investigación se centra en analizar los factores meteorológicos en Madrid y otras grandes ciudades de España, con el objetivo de superar estas limitaciones y perfeccio-



Figura 8. Sensores de NO₂ de bajo coste instalados en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid.

nar la integración de los datos satelitales e *in situ*.

Para mejorar esta equivalencia, desde la Universidad Politécnica de Madrid se está trabajando, al mismo tiempo, en integrar los datos procedentes de sensores de bajo coste para apoyar las medidas de satélite en la estimación de la calidad del aire superficial (Figura 8).

Las mejoras en la resolución temporal se apoyarán en los datos ofrecidos por los futuros satélites Sentinel-5 y Sentinel-4, diseñados para ofrecer observaciones más frecuentes y con mayor precisión que la misión Sentinel-5P preliminar. Sentinel-4, con su órbita geoestacionaria, proporcionará datos horarios sobre Europa, lo que permitirá capturar variaciones diurnas en los contaminantes atmosféricos, un aspecto crítico para evaluar dinámicas rápidas como los picos de tráfico o eventos industriales. Por su parte, Sentinel-5, como sucesor del Sentinel-5P, combinará una mayor resolución espacial con una cobertura global diaria, lo que mejorará significativamente el monitoreo a gran escala.

Estas capacidades avanzadas complementarán las mediciones *in situ* y los datos de Sentinel-5P, permitiendo no solo un monitoreo más detallado y en tiempo casi real, sino también una evaluación más efectiva de las políticas públicas y la identificación de tendencias a largo plazo en la calidad del aire. En conjunto, estas herramientas serán fundamentales para abordar los retos emergentes en la gestión de la contaminación atmosférica y avanzar hacia ciudades más sostenibles y saludables.

REFERENCIAS

- Ayuntamiento de Madrid, 2024. Datos de calidad del aire desde 2001 [WWW Document]. URL <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9f8e4b2e4b284f1a5a0/?vgnnextoid=aecb88a7e2b73410VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM-100000171f5a0aRCRD>
- Buzikov, S. V, Matushkin, O.P., Jonson, J.E., Borken-Kleeefeld, J., Simpson, D., Nyíri, A., Posch, M., Heyes, C., 2017. LETTER • OPEN ACCESS Impact of doping alumina nanoparticles on spray characteristics of diesel-biodiesel fuel blends Mukul Tomar and Naveen Kumar-Development of a bi-fuel power supply system for a diesel engine Impact of excess NO_x emissions from diesel cars on air quality, public health and eutrophication in Europe. *Environ. Res. Lett.* 12, 94017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8850>
- Cedeno Jimenez, J.R., Brovelli, M.A., 2023. NO₂ Concentration Estimation at Urban Ground Level by Integrating Sentinel 5P Data and ERA5 Using Machine Learning: The Milan (Italy) Case Study. *Remote Sens.* 15. <https://doi.org/10.3390/RS15225400>
- Cedeno Jimenez, J.R., Pugliese Vilorio, A. de J., Brovelli, M.A., 2023. Estimating Daily NO₂ Ground Level Concentrations Using Sentinel-5P and Ground Sensor Meteorological Measurements. *ISPRS Int. J. Geo-Information* 2023, Vol. 12, Page 107 12, 107. <https://doi.org/10.3390/IJGI12030107>
- Cersosimo, A., Serio, C., Masiello, G., 2020. TROPOMI NO₂ Tropospheric Column Data: Regridding to 1 km Grid-Resolution and Assessment of their Consistency with In Situ Surface Observations. *Remote Sens.* 2020, Vol. 12, Page 2212 12, 2212. <https://doi.org/10.3390/RS12142212>
- Chan, K.L., Khorsandi, E., Liu, S., Baier, F., Valks, P., 2021. Estimation of Surface NO₂ Concentrations over Germany from TROPOMI Satellite Observations Using a Machine Learning Method. *Remote Sens.* 2021, Vol. 13, Page 969 13, 969. <https://doi.org/10.3390/RS13050969>
- European Space Agency (ESA), 2024. Copernicus Data Space Ecosystem [WWW Document]. URL <https://dataspace.copernicus.eu/>
- Goldberg, D.L., Anenberg, S.C., Kerr, G.H., Mohegh, A., Lu, Z., Streets, D.G., 2021. TROPOMI NO₂ in the United States: A Detailed Look at the Annual Averages, Weekly Cycles, Effects of Temperature, and Correlation With Surface NO₂ Concentrations. *Earth's Futur.* 9, e2020EF001665. <https://doi.org/10.1029/2020EF001665>
- Google Earth Engine (GEE), 2018. Sentinel-5P OFFL NO₂: Offline Nitrogen Dioxide. URL https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_NO2
- Griffin, D., Zhao, X., McLinden, C.A., Boersma, F., Bourassa, A., Dammers, E., Degenstein, D., Eskes, H., Fehr, L., Fioletov, V., Hayden, K., Kharol, S.K., Li, S.M., Makar, P., Martin, R. V., Mihele, C., Mittermeier, R.L., Krotkov, N., Snee, M., Lamsal, L.N., Linden, M. ter, Geffen, J. van, Veefkind, P., Wolde, M., 2019. High-Resolution Mapping of Nitrogen Dioxide With TROPOMI: First Results and Validation Over the Canadian Oil Sands. *Geophys. Res. Lett.* 46, 1049–1060. <https://doi.org/10.1029/2018GL081095>
- Health Effects Institute, 2024. State of Global Air Report 2024. URL <https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2024>
- Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., Douros, J., 2020. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO₂ observations with ground-based measurements in Helsinki. *Atmos. Meas. Tech.* 13, 205–218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>

- org/10.5194/AMT-13-205-2020
- Jeong, U., Hong, H., 2021. Assessment of Tropospheric Concentrations of NO₂ from the TROPOMI/Sentinel-5 Precursor for the Estimation of Long-Term Exposure to Surface NO₂ over South Korea. *Remote Sens.* 2021, Vol. 13, Page 1877 13, 1877. <https://doi.org/10.3390/RS13101877>
- Kang, Y., Choi, H., Im, J., Park, S., Shin, M., Song, C.K., Kim, S., 2021. Estimation of surface-level NO₂ and O₃ concentrations using TROPOMI data and machine learning over East Asia. *Environ. Pollut.* 288. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.117711>
- Khomenko, S., Cirach, M., Pereira-Barboza, E., Mueller, N., Barrera-Gómez, J., Rojas-Rueda, D., de Hoogh, K., Hoek, G., Nieuwenhuijsen, M., 2021. Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. *Lancet Planet. Heal.* 5, e121–e134. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30272-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30272-2)
- Lamsal, L.N., Martin, R. V., Parrish, D.D., Krotkov, N.A., 2013. Scaling relationship for NO₂ pollution and urban population size: A satellite perspective. *Environ. Sci. Technol.* 47, 7855–7861. https://doi.org/10.1021/ES400744G/ASSET/IMAGES/MEDIUM/ES-2013-00744G_0003.GIF
- McDuffie, E.E., Smith, S.J., O'Rourke, P., Tibrewal, K., Venkataraman, C., Marais, E.A., Zheng, B., Crippa, M., Brauer, M., Martin, R. V., 2020. A global anthropogenic emission inventory of atmospheric pollutants from sector- And fuel-specific sources (1970-2017): An application of the Community Emissions Data System (CEDS). *Earth Syst. Sci. Data* 12, 3413–3442. <https://doi.org/10.5194/ESSD-12-3413-2020>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024. Estaciones de calidad del aire. URL <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/calidad-y-evaluacion-ambiental/estaciones-de-calidad-del-aire.html>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2022. Evaluación de la calidad del aire en España.
- Ministerios de la Presidencia Justicia y Relaciones con las Cortes (MPJRC), 2021. Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética.
- Morillas, C., Alvarez, S., Pires, J.C.M., Garcia, A.J., Martinez, S., 2024. Impact of the implementation of Madrid's low emission zone on NO₂ concentration using Sentinel-5P/TROPOMI data. *Atmos. Environ.* 320, 120326. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2024.120326>
- Nijkerk, D., Van, B., Peter, V., Doorn, V., Henselmans, R., Van Venrooy, B., Van Doorn, P., Draaisma, F., Hoogstrate, A., 2017. The TROPOMI Telescope. <https://doi.org/10.1117/12.2309035> 10564, 272–278. <https://doi.org/10.1117/12.2309035>
- Organización Mundial de la Salud, 2021. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. URL <https://iris.who.int/handle/10665/345329>.
- Organización Mundial de la Salud, 2013. Review of evidence on health aspects of air pollution-REVIHAAP Project Technical Report.
- Rudke, A.P., Martins, J.A., Hallak, R., Martins, L.D., de Almeida, D.S., Beal, A., Freitas, E.D., Andrade, M.F., Koutrakis, P., Albuquerque, T.T.A., 2023. Evaluating TROPOMI and MODIS performance to capture the dynamic of air pollution in São Paulo state: A case study during the COVID-19 outbreak. *Remote Sens. Environ.* 289, 113514. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2023.113514>
- Shaw, S., Van Heyst, B., 2022. An Evaluation of Risk Ratios on Physical and Mental Health Correlations due to Increases in Ambient Nitrogen Oxide (NO_x) Concentrations. *Atmos.* 2022, Vol. 13, Page 967 13, 967. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13060967>
- Unión Europea, 2024. Directive (EU) 2024/2881. URL <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj>
- Veefkind, J.P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H.J., de Haan, J.F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., Vink, R., Visser, H., Levelt, P.F., 2012. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sens. Environ.* 120, 70–83. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2011.09.027>
- Zhu, Y., Zhan, Y., Wang, B., Li, Z., Qin, Y., Zhang, K., 2019. Spatiotemporally mapping of the relationship between NO₂ pollution and urbanization for a megacity in Southwest China during 2005–2016. *Chemosphere* 220, 155–162. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.12.095>

Sobre el autor

Carlos Morillas López

Ingeniero de la Energía por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y estudiante de doctorado en Ingeniería Geomática desde marzo de 2023. Experto en huella de carbono e inventarios de gases de efecto invernadero. Colaborador del Observatorio de Acción Climática.