

SENSORAMIENTO REMOTO DEL NO₂ Y USO DE SUELO EN EL DISTRITO DE PAMPAS

NO₂ remote sensing and land use in the Pampas district

Julio Miguel Ángeles Suazo¹, Esmila Yeime Chavarría Márquez², Charles Frank Saldaña-Chafloque³, Jairo Edson Gutiérrez-Collao⁴, Diana Orellana Reyes⁵, Jack Pérez Hajar⁶, Merly Chávez de la Torre⁷

RESUMEN

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es un contaminante, producto del parque automotor por lo que puede transformarse en ozono troposférico y es uno de los causantes de enfermedades respiratorias. La investigación tiene como objetivo evaluar la variabilidad temporal del dióxido nitrógeno obtenidos con el sensor OMI del satélite AURA durante el periodo 2020-2024. La metodología utilizada son técnicas de teledetección utilizando el sensor OMI con una resolución temporal de un minuto. Se obtuvo que los valores de NO₂ máximos es de 20 umol m⁻²; asimismo el uso de suelo predominante en el distrito de pampas es de cultivos agrícolas y zona urbana. Por ello es de fundamental proponer medidas de mitigación ambiental y contrarrestar los efectos del cambio climático a nivel local, regional. Asimismo, es importante implementar estrategias de gestión de la calidad del aire que se adapten a las variaciones estacionales, en particular la necesidad de fortalecer las medidas de control de la contaminación.

Palabras clave: NO₂, OMI, Pampas, sensoramiento remoto.

ABSTRACT

Nitrogen dioxide (NO₂) is a pollutant produced by the vehicle fleet, which can be transformed into tropospheric ozone and is one of the causes of respiratory diseases. The research aims to evaluate the temporal variability of nitrogen dioxide obtained with the OMI sensor of the AURA satellite during the period 2020-2024. The methodology used is remote sensing techniques using the OMI sensor with a temporal resolution of 1 minute. It was obtained that the maximum NO₂ values are 20 umol m⁻²; also, the predominant land use in the Pampas district is agricultural crops and urban areas. Therefore, it is essential to propose environmental mitigation measures and counteract the effects of climate change at the local and regional levels. Likewise, it is important to implement air quality management strategies that adapt to seasonal variations, in particular the need to strengthen pollution control measures.

Keywords: NO₂, OMI, Pampas, remote sensing.

¹ ✉ Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8327-9032>. julioangeles@unat.edu.pe

² Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1531-2694>. esmilachavarria@unat.edu.pe

³ Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9537-2680>. charlessaldana@unat.edu.pe

⁴ Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8984-6245>. jairo.gutierrez@unat.edu.pe

⁵ Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2078-6392>. 71996021@unat.edu.pe

⁶ Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7907-6934>. 72171728@unat.edu.pe

⁷ Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8543-7644>. 71383529@unat.edu.pe

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire se ha convertido en el mayor desafío para la salud pública mundial; sus impactos también amenazan la integridad de los ecosistemas y los bienes materiales, y alteran el clima (Guan et al., 2023; Ni et al., 2023). En particular, los países en desarrollo enfrentan importantes problemas de contaminación, lo que lleva a niveles de calidad del aire por debajo de los recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), imponiendo así cargas económicas y de salud a los habitantes de estas regiones (Feng et al., 2023).

Los principales contaminantes del aire incluyen monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno (NO y NO₂), ozono (O₃) y partículas con diámetros aerodinámicos inferiores a 10 (PM₁₀) y 2.5 (PM_{2.5}) micras (Seinfeld y Pandis, 1998). Estos contaminantes son emitidos principalmente por el transporte, las industrias, la producción agrícola y la generación de residuos (Sokharavuth et al., 2023). El NO₂ y el O₃ son contaminantes graves y nocivos; el NO₂ causa enfermedades respiratorias e incluso implicaciones cognitivas (Sokharavuth et al., 2023; Wang et al., 2023a) sus concentraciones son fuertemente vinculados a la actividad humana, principalmente por la quema de combustibles provocada por el tráfico vehicular y las actividades industriales (Prunet et al., 2020). Además, el NO₂ es un precursor crucial del O₃ troposférico (Wang et al., 2023b), que, debido a su naturaleza altamente oxidante, puede tener efectos agudos y crónicos sobre la morbilidad pulmonar y cardiovascular, e incluso causar mortalidad prematura (Qi et al., 2023; in 't Veld et al., 2021).

Además, el NO₂ es un importante precursor del ozono troposférico (O₃), otro contaminante criterio responsable de efectos dañinos en los pulmones y

mortalidad prematura (Rathore et al. 2023). Las cantidades de NO₂ se miden con analizadores in situ, que generalmente informan en proporciones de mezcla, o mediante instrumentos de detección remota que informan cantidades en columnas.

Los sensores remotos para el NO₂ total de la columna (Peters et al., 2012) incluyen el espectrómetro Pandora (Herman et al., 2009). Los sensores remotos aerotransportados, por ejemplo, el Geo-CAPE Airborne Simulator (GCAS) (Judd et al., 2019) y el Geostationary Trace gas and Aerosol Sensor Optimization (GEO-TASO) (Levelt et al., 2018) miden la cantidad de la columna de NO₂ debajo de la aeronave. Desde el espacio, el NO₂ se mide con sensores satelitales ultravioleta-visible (UV-Vis). Existe un largo registro de NO₂ gracias a una serie de sensores satelitales: el Global Ozone Monitoring Experiment (Richter et al., 2011) y GOME-2 (Munro et al., 2016), el Instrumento de Monitoreo del Ozono (OMI) (Levelt et al., 2006; 2018) y el Instrumento de Monitoreo Troposférico (TROPOMI) lanzado en 2017 (Richter et al., 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

El Instrumento de Monitoreo del Ozono (OMI) está ubicado a bordo de la nave espacial Aura del Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de la NASA que vuela en una órbita polar sincrónica con el sol desde 2004 (Levelt et al., 2006). Este instrumento es un espectrómetro UV/Visible de visualización nadir con una resolución espectral de aproximadamente 0.43 nm para el canal UV (307-383 nm) y aproximadamente 0.63 nm para el canal visible (349-504 nm). Mide la radiación solar (SR) retrodispersada por la atmósfera en el rango de 270-500 nm y una resolución espacial de 13 km x 24 km (nadir) (Parisi et al., 2021). Asimismo, el lugar de estudio es el distrito de Pampas, que pertenece a la provincia de Tayacaja/Perú (Figura 1).

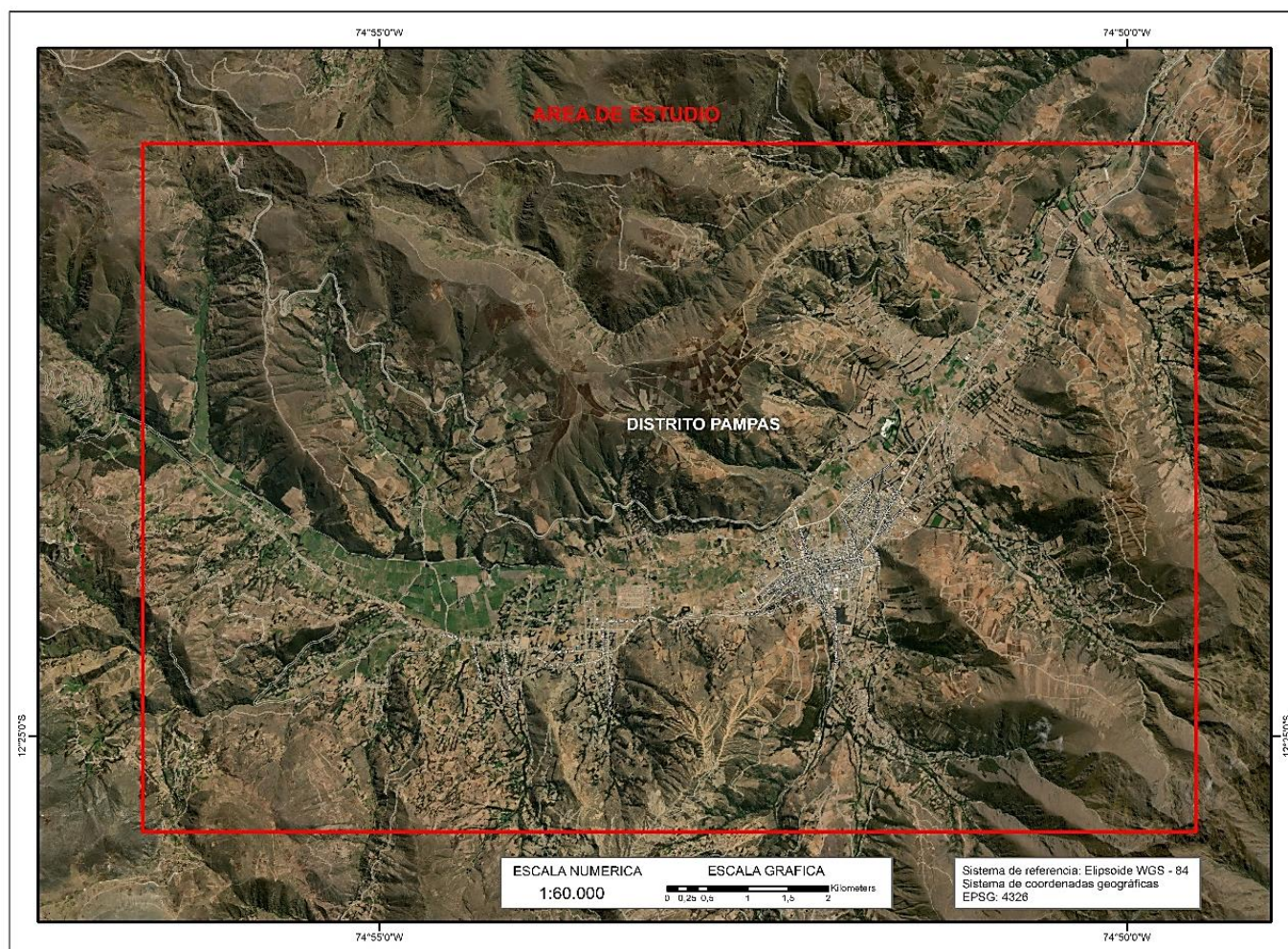


Figura 1. Ubicación del distrito de Pampas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variación temporal de NO₂

La Figura 2A muestra una visión completa de las tendencias del NO₂ y las variaciones estacionales a lo largo del período 2020-2024. El análisis de los datos revela un patrón de cambio estacional, caracterizado por valores de NO₂ más altos en los meses de invierno (junio-agosto) y valores más bajos durante el verano (enero-marzo), lo que sugiere un claro comportamiento cíclico en la calidad del aire que se correlaciona con las actividades estacionales. Este patrón indica que los valores de NO₂ son más altos en invierno debido al aumento de las emisiones como ausencia de precipitación y las inversiones de temperatura que

atrapan los contaminantes. En la Figura 2B, los picos estacionales de las concentraciones de NO₂ se produjeron en invierno, coincidiendo con el aumento de las actividades como el tráfico urbano es otra fuente principal de NO₂, especialmente durante los períodos pico de desplazamiento para transformarse en ozono troposférico (Figura 3). Además, las actividades agrícolas, como la fertilización en primavera, pueden contribuir a aumentos a corto plazo de las concentraciones de NO₂. La tendencia general requiere la atención de los responsables de las políticas para reducir eficazmente las emisiones de NO₂ durante el otoño y el invierno. La concentración de NO₂ varió entre estaciones sin mostrar una tendencia definitiva.

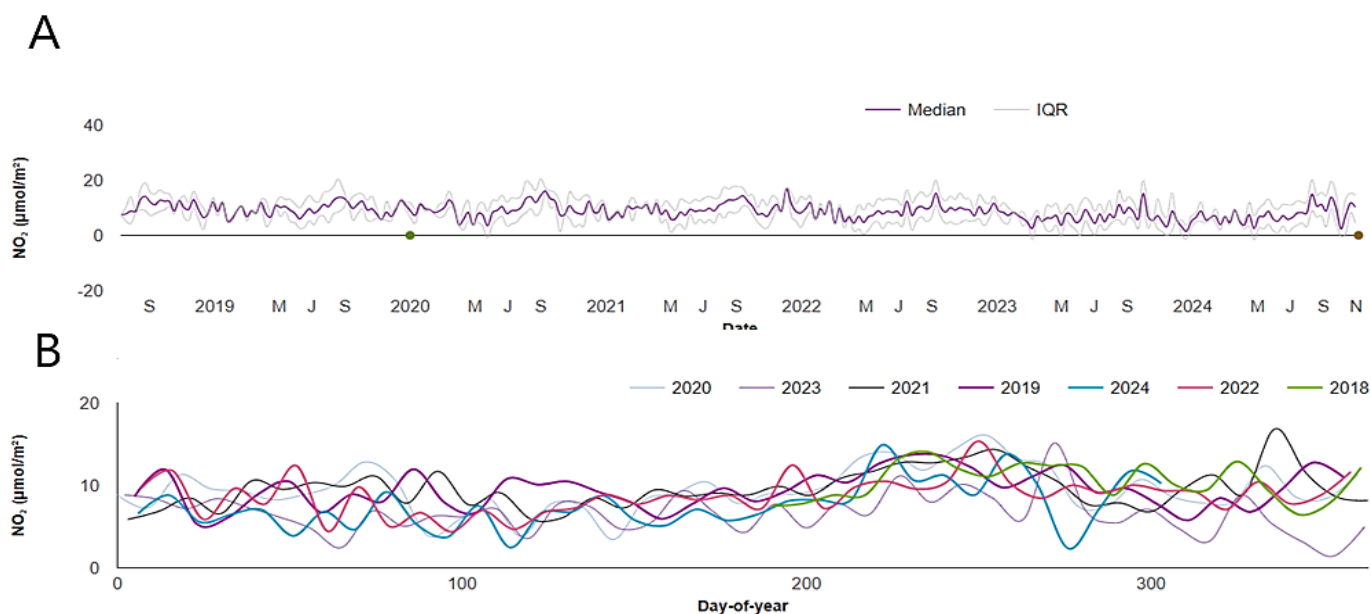


Figura 2. Variación mensual de NO₂ (A) y comportamiento anual en el distrito de Pampas durante 2019-2024 (B).

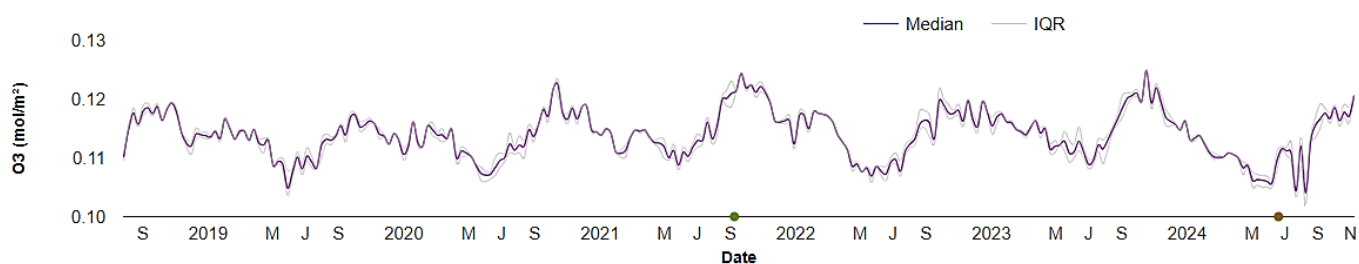


Figura 3. Variación mensual de ozono troposférico en el distrito de pampas durante 2019-2024.

En la Figura 4A, se evidencia las concentraciones de NO₂ en la troposfera sobre Perú en el mes de enero. Donde predominan los colores amarillos, indicando niveles bajos de NO₂ entre 0.413 y 0.825×10^{16} mol cm⁻². Esto sugiere, una baja contaminación del aire relacionada con actividades industriales o vehiculares. Las áreas más claras reflejan una dispersión rápida de los contaminantes o poca actividad emisora. En la Figura 4B, se evidencia que algunas áreas de Perú muestran principalmente colores amarillentos, lo que indica concentraciones bajas a moderadas de dióxido de nitrógeno (NO₂) en la atmósfera, con valores que oscilan entre 0.413 a 0.825×10^{16} mol cm⁻². Esto sugiere que, en las zonas monitorizadas de Perú, la contaminación por NO₂ es relativamente baja, especialmente en comparación con algunas áreas vecinas que tienen concentraciones más altas (tonalidades más rojizas). Las áreas más claras pueden indicar poca presencia de NO₂ o la influencia de la cobertura de nubes, que dificulta la medición precisa.

En la Figura 4C, se evidencia nuevamente un mapa de columnas troposféricas de NO₂ en Perú. En comparación con febrero, los colores predominantes en Perú siguen siendo mayormente amarillos, lo que indica concentraciones bajas a moderadas de NO₂ (0.413 a 0.825×10^{16} mol cm⁻²). Sin embargo, parece haber una ligera reducción en la cantidad de áreas con concentraciones más altas (naranjas o rojizas), lo que podría sugerir una disminución de la contaminación en marzo o la variación de las mediciones debido a condiciones atmosféricas diferentes, como una mejor dispersión de contaminantes. En la Figura 4D, se evidencia que las áreas de Perú muestran un aumento notable de las concentraciones de NO₂ en comparación con febrero y marzo. Se observan más regiones con tonalidades anaranjadas y rojas, especialmente a lo largo de la costa central y sur de Perú, lo que indica niveles más altos de NO₂ (entre 1.238 a 2.001×10^{16} mol cm⁻²). Esto sugiere un incremento en la contaminación atmosférica por dióxido de nitrógeno en abril, posiblemente debido a un mayor tráfico vehicular,

actividades industriales, o factores meteorológicos que han retenido más contaminantes en la atmósfera durante este mes.

En la Figura 4E, se evidencia el dióxido de nitrógeno (NO₂) acumulado en la troposfera sobre el territorio del Perú durante el mes de mayo, con valores que oscilan entre 0.413 a más de 2.001×10^{16} mol cm⁻². Los colores, que varían entre el amarillo claro y el rojo oscuro, representan la concentración de NO₂ en moléculas por centímetro cuadrado (mol cm⁻²). Las zonas cercanas a la costa norte del Perú (Lima y parte de Piura) muestran mayores concentraciones de NO₂, probablemente debido a la actividad industrial y vehicular, típicos emisores de este contaminante. Las áreas más alejadas de las grandes ciudades, como la región andina y amazónica, presentan concentraciones menores, lo que es coherente con una menor actividad humana y emisiones. Además, las variaciones observadas permiten inferir la distribución espacial de fuentes de emisión de NO₂, siendo un indicador clave de la contaminación del aire y un factor importante en la evaluación de la calidad del aire. En la Figura 4F, se evidencia el mapa de Perú con una escala de colores que representan las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂) en la troposfera del mes de junio, donde la escala de colores va del amarillo (baja concentración) al rojo (alta concentración), con valores que oscilan entre 0.413 hasta 2.001×10^{16} mol cm⁻².

La Figura 4 muestra que las mayores concentraciones de NO₂ se encuentran en las regiones costeras de Perú, particularmente alrededor de las ciudades de Lima y Callao, esto probablemente se deba a los altos niveles de tráfico y actividad industrial en estas áreas. También muestra que la concentración de NO₂ disminuye a medida que se avanza hacia la región andina del Perú, esto probablemente se deba al hecho de que la calidad del aire es generalmente mejor. En la Figura 4G se evidencia la concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂) en la troposfera en el mes de julio, con valores que oscilan entre 0.413 hasta más de 2.001×10^{16} mol cm⁻². Se observa que las zonas rojas o con concentraciones más altas se encuentran en partes de la costa, lo cual podría sugerir la presencia de ciudades o zonas industriales y se destacan algunos puntos específicos en la parte sur-central y noreste de la

figura. Las zonas con menores concentraciones son las áreas más rurales o menos habitadas, como la Amazonía y parte de los Andes, que muestran niveles mucho más bajos de este contaminante.

En la Figura 4H se evidencia, la distribución acumulada del dióxido de nitrógeno (NO₂) en la troposfera sobre el Perú durante el mes de agosto, con valores que oscilan entre 0.413 hasta más de 2.001×10^{16} mol cm⁻². Las áreas con mayores concentraciones de NO₂ están resaltadas en rojo, lo que indica focos de actividad humana o industrial intensa, ello se observa en partes de la costa peruana, probablemente en torno a ciudades como Lima y otras zonas urbanas costeras o industriales y las zonas con menores concentraciones son más prevalentes en las áreas rurales y zonas montañosas del país, como la región andina o amazónica, donde hay menos actividad humana e industrial que genere estos contaminantes. En la Figura 4I se observa, la distribución acumulada del dióxido de nitrógeno (NO₂) en la troposfera sobre el Perú durante el mes de agosto, con valores que oscilan entre 0.413 hasta más de 2.001×10^{16} mol cm⁻². Se evidencia que las áreas con mayores concentraciones de NO₂ de color rojo y naranja, las cuales en estos focos hay actividades humanas como industriales con mayor intensidad, esto observándose en la parte Sur del Perú, probablemente en ciudades como Arequipa y otras zonas urbanas industriales, donde las zonas con menores concentraciones en su mayoría son zonas rurales y montañosas como la región andina o amazónica, donde hay menos actividades industriales. En la Figura 4I, se evidencia el mapa de Perú con una escala de colores que representa la concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂) en la troposfera del mes de octubre, donde la escala de colores va del amarillo (baja concentración) al rojo (alta concentración), con valores que oscilan entre 0.413 hasta 2.001×10^{16} mol cm⁻². El mapa muestra que las mayores concentraciones de NO₂ se encuentran en las regiones costeras de Perú, particularmente alrededor de las ciudades de Lima y Callao, como también en ciudades como Arequipa que esto probablemente se deba a los altos niveles de tráfico y actividad industrial en estas áreas. El mapa también muestra que la concentración de NO₂ disminuye a medida que se avanza hacia el interior, esto probablemente se deba al hecho de que la calidad del aire es generalmente mejor en las áreas rurales.

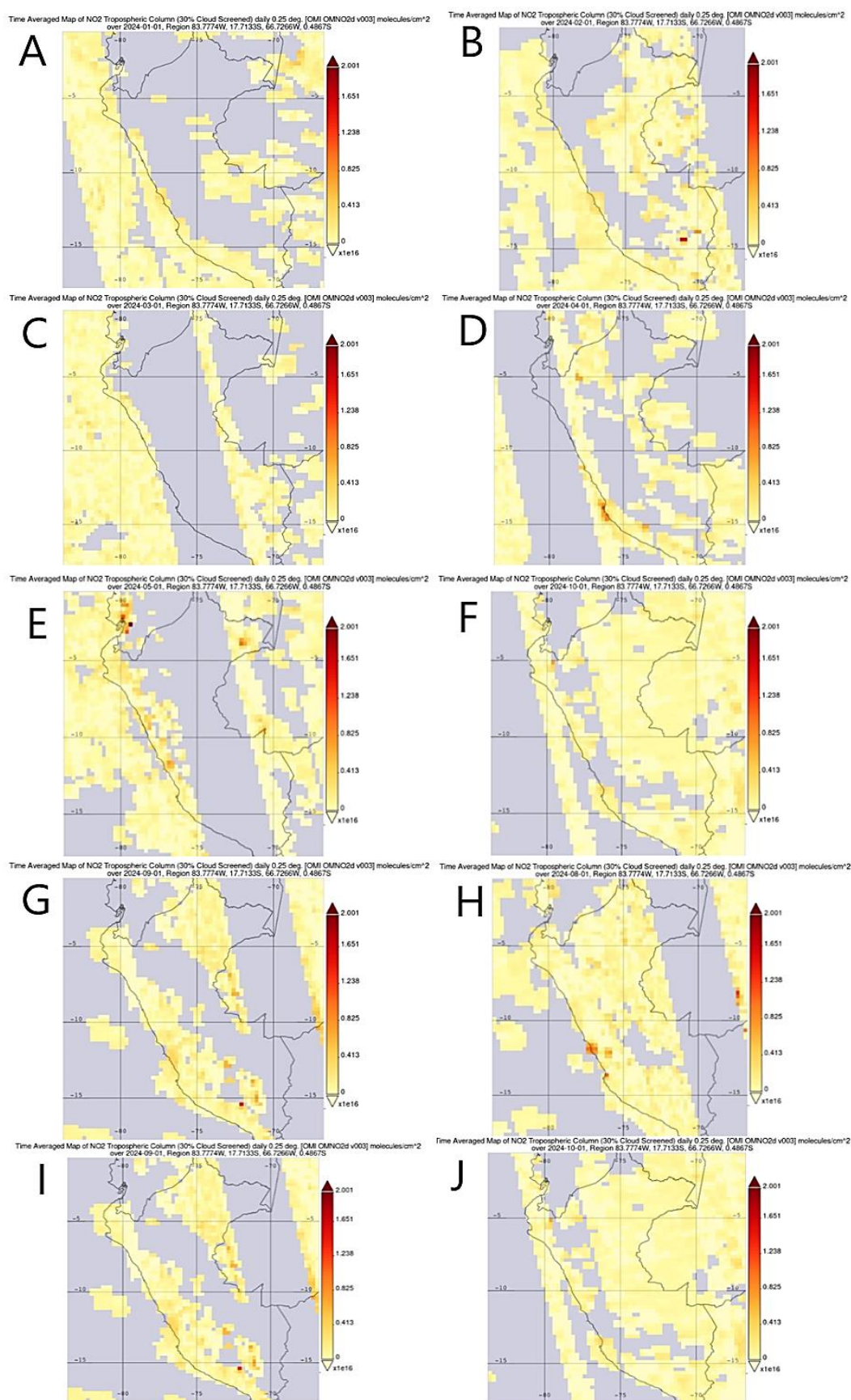


Figura 4. Dióxido de nitrógeno (NO₂) acumulado en la tropósfera del Perú, en el mes de A. enero, B. Febrero, C. Marzo, D. Abril, E. Mayo, F. Junio, G. Julio, H. Agosto, I. Setiembre y J. Octubre utilizando datos de Giovanni.

Fuente: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

Clasificación de uso de suelo

En la Figura 5 se muestra el comportamiento del uso de suelo en el distrito de Pampas, donde se visualiza

el crecimiento urbano (píxeles de color rojo), como de cultivos agrícolas (color morado). Asimismo, se observa un crecimiento urbano y agrícola con poca predominancia de floresta.

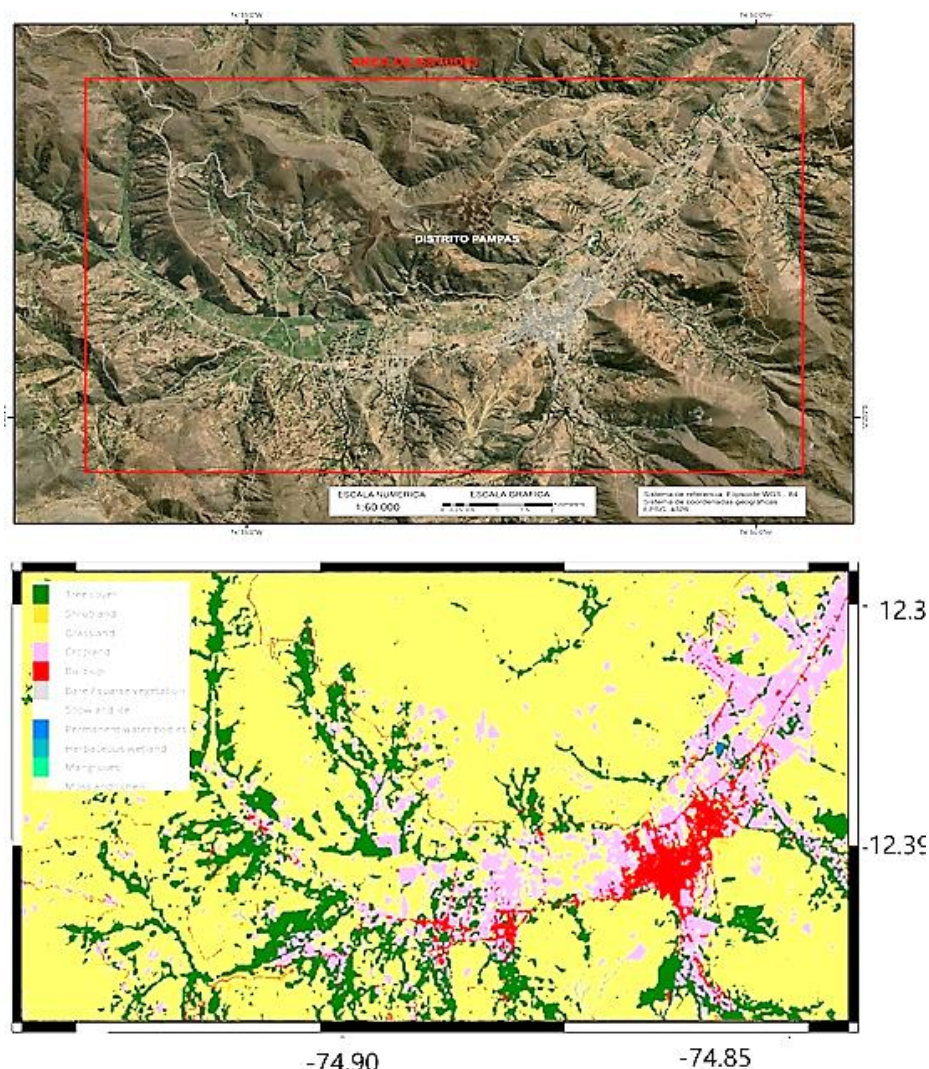


Figura 5. Clasificación de uso de suelo en el distrito de Pampas, durante el 2020.

Trabajos similares como la concentración de contaminantes en la atmósfera ambiental depende de la dispersión, la concentración de fondo, los procesos químicos, la advección, la turbulencia y la deposición (Mayer, 1999). Todos estos procesos están influenciados por parámetros meteorológicos como la radiación, la estabilidad, el viento, la temperatura, la turbulencia, la lluvia y la humedad. La dispersión atmosférica, especialmente en relación con el transporte de contaminantes, es un tema crucial (Dosio et al. 2005). La velocidad y la dirección del viento, y las condiciones de turbulencia atmosférica cerca de la superficie, son los principales factores que influyen en el patrón de dispersión y la distribución de los contaminantes emitidos al aire. La turbulencia, al ser el

principal impulsor del transporte de humedad, calor y contaminación en dirección vertical, conduce a la mezcla y dilución de contaminantes en el lugar de emisión o a su acumulación (Jia et al. 2021). La deposición de óxidos de nitrógeno NO_x (NO, NO₂, HNO₃ y NO₃) representa la mitad de la deposición de nitrógeno en la superficie de la Tierra (Geddes y Martin, 2017). Aparte de la degradación de la calidad del aire, el daño al ecosistema es una de las principales preocupaciones de las emisiones de dióxido de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno juega un papel importante en el ciclo biogeoquímico. El transporte y la deposición de compuestos de nitrógeno son dos de los procesos más importantes en el ciclo biogeoquímico (Gruber y Galloway 2008). El aumento de la deposición

de nitrógeno en el suelo, el agua y las plantas provoca eutrofización y acidificación (Bobbink et al. 2010).

CONCLUSIONES

Los valores de NO₂ revelan un patrón de cambio estacional, caracterizado por valores de NO₂ más altos en los meses de invierno (junio-agosto) y valores más bajos durante el verano (enero-marzo), además los valores máximos de NO₂ es de 20 $\mu\text{mol m}^{-2}$; asimismo el uso de suelo predominante en el distrito de Pampas es de cultivos agrícolas y zona urbana. En consecuencia, es importante que para futuras investigaciones futuras deben centrarse en la identificación de fuentes de contaminación, asimismo, medidas como mejora en los procesos de las actividades industriales sobre sus emisiones, y la mejora de la gestión del tránsito del parque automotor. También es importante implementar a futuro el uso de energías renovables o tecnologías limpias para mitigar las emisiones de contaminantes atmosféricos.

BIBLIOGRAFÍA

- Bobbink, R; Hicks, K; Galloway, J; Spranger, T; Alkemade, R; Ashmore, M; Bustamante, M; Cinderby, S; Davidson, E; Dentener, F; Emmett, B; Erismán, JW; Fenn, M; Gilliam, F; Nordin, A; Pardo, L; De Vries, W. 2010. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis (en línea). *Ecological Applications* 20(1):30-59. Disponible en <https://doi.org/10.1890/08-1140.1>
- Dosio, A; De Arellano, JVG; Holtzlag, AAM; Builtjes, PJ. 2005. Relating Eulerian and Lagrangian statistics for the turbulent dispersion in the atmospheric convective boundary layer (en línea). *Journal of the Atmospheric Sciences* 62(4):1175-1191. Disponible en <https://doi.org/10.1175/JAS3393.1>
- Feng, T; Chen, X; Ma, J; Sun, Y; Du, H; Yao, Y; Chen, Z; Wang, S; Mi, Z. 2023. Air pollution control or economic development? Empirical evidence from enterprises with production restrictions (en línea). *Journal of Environmental Management* 336:117611. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117611>
- Geddes, JA; Martin, RV. 2017. Global deposition of total reactive nitrogen oxides from 1996 to 2014 constrained with satellite observations of NO₂ columns (en línea). *Atmospheric Chemistry and Physics* 17(16):10071-10091. Disponible en <https://doi.org/10.5194/acp-17-10071-2017>
- Gruber, N; Galloway, JN. 2008. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle (en línea). *Nature* 451:293-296. Disponible en <https://doi.org/10.1038/nature06592>
- Guan, Y; Liu, X; Zheng, Z; Dai, Y; Du, G; Han, J; Hou, L; Duan, E. 2023. Summer O₃ pollution cycle characteristics and VOCs sources in a central city of Beijing-Tianjin-Hebei area, China (en línea). *Environmental Pollution* 323:121293. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121293>
- Herman, J; Cede, A; Spinei, E; Mount, G; Tzortziou, M; Abuhassan, N. 2009. NO₂ column amounts from ground-based Pandora and MFDOAS spectrometers using the direct-sun DOAS technique: Intercomparisons and application to OMI validation (en línea). *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 114(13). Disponible en <https://doi.org/10.1029/2009jd011848>
- in 't Veld, M; Carnerero, C; Massagué, J; Alastuey, A; de la Rosa, JD; Sánchez de la Campa, AM; Escudero, M; Mantilla, E; Gangoiti, G; García-Pando, CP; Olid, M; Moreta, JR; Hernández, JL; Santamaría, J; Millán, M; Querol, X. 2021. Understanding the local and remote source contributions to ambient O₃ during a pollution episode using a combination of experimental approaches in the Guadalquivir valley, southern Spain (en línea). *Science of the Total Environment* 777:144579. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144579>
- Jia, W; Zhang, X; Wang, Y. 2021. Assessing the pollutant evolution mechanisms of heavy pollution episodes in the Yangtze-Huaihe valley: A multiscale perspective (en línea). *Atmospheric Environment*, 244:117986. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117986>
- Judd, LM; Al-Saadi, JA; Janz, SJ; Kowalewski, MJG; Bradley, R; Szykman, JJ; Valin, LC; Swap, R; Cede, A; Mueller, M; Tiefengraber, M; Abuhassan, N; Williams, D. 2019. Evaluating the impact of spatial resolution on tropospheric NO₂ column comparisons within urban areas using high-resolution airborne data (en línea). *Atmospheric Measurement Techniques* 12(11):6091-6111. Disponible en <https://doi.org/10.5194/amt-12-6091-2019>
- Levelt, PF; Hilsenrath, E; Leppelmeier, GW; Van Den Oord, GHJ; Bhartia, PK; Tamminen, J; De Haan, JF; Veefkind, JP. 2006. Science objectives of the ozone monitoring instrument (en línea). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Disponible en <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872336>
- Levelt, PF; Joiner, J; Tamminen, J; Veefkind, JP; Bhartia, PK; Zweers, DCS; Duncan, BN; Streets, DG; Eskes, H; Van Der, RA; McLinden, C; Fioletov, V; Carn, S; De Laat, J; Deland, M; Marchenko, S; McPeters, R; Ziemke, J; Fu, D; ... Wargan, K. 2018. The Ozone Monitoring Instrument: Overview of 14 years in space (en línea). *Atmospheric Chemistry and Physics* 18(8):5699-2018. Disponible en <https://doi.org/10.5194/acp-18-5699-2018>
- Mayer, H. 1999. Air pollution in cities. *Atmos Environ* 33(24):4029-4037.
- Munro, R; Lang, R; Klaes, D; Poli, G; Retscher, C; Lindstrot, R; Huckle, R; Lacan, A; Grzegorski, M; Holdak, A; Kokhanovsky, A; Livschitz, J; Eisinger, M. 2016. The GOME-2 instrument on the Metop series of satellites: Instrument design, calibration, and level 1 data processing - An overview. *Atmospheric Measurement*

- Techniques 9(3):1279-1301. Disponible en <https://doi.org/10.5194/amt-9-1279-2016>
- Ni, W; Hu, X; Ju, Y; Wang, Q. 2023. Air pollution and indoor work efficiency: Evidence from professional basketball players in China (en línea). *Journal of Cleaner Production* 399:136644. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136644>
- Parisi, AV; Igoe, D; Downs, NJ; Turner, J; Amar, A; Jebar, MAA. 2021. Satellite monitoring of environmental solar ultraviolet a (UVA) exposure and irradiance: a review of OMI and GOME-2 (en línea). *Remote Sensing* 13(4):1–19. Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs13040752>
- Piters, AJM; Boersma, KF; Kroon, M; Hains, JC; Van, M; Wittrock, F; Abuhassan, N; Adams, C; Akrami, M; Allaart, MAF; Apituley, A; Beirle, S; Bergwerff, JB; Berkhout, AJC; Brunner, D; Cede, A; Chong, J; Clémer, K; Fayt, C; Zhou, Y. 2012. The Cabauw Intercomparison campaign for Nitrogen Dioxide measuring Instruments (CINDI): Design, execution, and early results (en línea). *Atmospheric Measurement Techniques* 5(2):457-485. Disponible en <https://doi.org/10.5194/amt-5-457-2012>
- Prunet, P; Lezeaux, O; Camy-Peyret, C; Thevenon, H. 2020. Analysis of the NO₂ tropospheric product from S5P TROPOMI for monitoring pollution at city scale (en línea). *City and Environment Interactions* 8:100051. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100051>
- Qi, Q; Wang, S; Zhao, H; Kota, SH; Zhang, H. 2023. Rice yield losses due to O₃ pollution in China from 2013 to 2020 based on the WRF-CMAQ model (en línea). *Journal of Cleaner Production* 401:136801. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136801>
- Rathore, A; GOpikrishnan, GS; Kuttippurath, J. 2023. Changes in tropospheric ozone over India: Variability, long-term trends and climate forcing (en línea). *Atmospheric Environment* 309:119959. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119959>
- Richter, A; Begoin, M; Hilboll, A; Burrows, JP. 2011. An improved NO₂ retrieval for the GOME-2 satellite instrument (en línea). *Atmospheric Measurement Techniques* 4(6):1147-1159. Disponible en <https://doi.org/10.5194/amt-4-1147-2011>
- Seinfeld, JH; Pandis, SN. 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 1st edition, J. Wiley, New York.
- Sokharavuth, P; Thiv, S; Nara, C; Him, C; Sokyimeng, S; Henze, DK; Holmes, R; Kuylenstierna, JCI; Malley, CS; Michalopoulou, E; Slater, J. 2023. Air pollution mitigation assessment to inform Cambodia's first clean air plan (en línea). *Environmental Research* 220:115230. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115230>
- Wang, L; Shi, T; Chen, H. 2023a. Air pollution and infant mortality: Evidence from China (en línea). *Economics and Human Biology* 49:101229. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ehb.2023.101229>
- Wang, R; Wang, L; Xue, M; Chen, N; Zhang, L; Ling, Z; Li, T; Tao, M; Wang, Y. 2023b. New insight into formation mechanism, source and control strategy of severe O₃ pollution: The case from photochemical simulation in the Wuhan Metropolitan Area, Central China (en línea). *Atmospheric Research* 284:106605. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106605>

Artículo recibido en: 12 de noviembre del 2024

Aceptado en: 19 de agosto del 2025