

MINI-AGUJERO DE OZONO SOBRE RÍO GALLEGOS EN OTOÑO DE 2025: IDENTIFICACIÓN MEDIANTE DATOS SATELITALES Y TERRESTRES

Cristian Laino Baldini^{1,2}, Facundo Orte^{1,3}, Eduardo Luccini^{1,4}, Facundo Carmona^{1,2}, Gerardo Carbajal Benítez⁵, Raúl D'Elia^{1,3}, Elian Wolfram⁵
cristian.laino@ihlla.org.ar. Autor correspondiente.

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

²Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. Eduardo Jorge Usunoff (IHLLA)

³Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (DEILAP), UNIDEF (CITEDEF-CONICET), IRL-3351-IFAECI-CNRS, Villa Martelli, Argentina

⁴Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica (UCA)

⁵Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Palabras clave: Columna total de ozono, TROPOMI, SAOZ.

1) INTRODUCCIÓN

Desde la década del '70, la capa de ozono sufre un deterioro global, cuyo fenómeno más extremo es la pérdida estacional sobre la región antártica durante la primavera austral, conocida como Agujero de Ozono Antártico (AOA) (Farman et al., 1985). Sin embargo, también ocurren disminuciones transitorias de columna total de ozono (CTO) en otras latitudes y en ambos hemisferios (Norte y Sur), en general no destructivas sino re-distributivas (James, 1998a, b; Hood et al., 2001). Newman et al. (1988) introdujeron el término *ozone mini-holes* para describir disminuciones abruptas (1–5 días) y localizadas de CTO, con escalas horizontales sinópticas (1000–3000 km). Estos eventos resultan fundamentalmente del ascenso dinámico de masas de aire troposférico pobre en ozono y de advección horizontal (Reed, 1950; Salby & Callaghan, 1993; Teitelbaum et al., 1998). Asimismo, hay indicios de que tales eventos también pueden activar reacciones heterogéneas que amplifiquen localmente la pérdida de ozono estratosférico (Grew y Dameris, 1997; Stenke et al., 2003). Los mini-agujeros de ozono son menos frecuentes durante verano y otoño en ambos hemisferios (James, 1998a, b). Pueden generar picos inusuales de radiación UV, con efectos en la salud humana y los ecosistemas (Millán, 2017).

En el presente trabajo se propone una metodología para la identificación de casos de mini-agujero de ozono y se analiza un evento registrado durante marzo de 2025 en el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral (OAPA), Río Gallegos, mediante observaciones terrestres y satelitales.

2) METODOLOGÍA

En este trabajo se emplean umbrales climatológicos para la detección de mini-agujeros de ozono. Un evento se identifica cuando la columna total de ozono diaria cae por debajo del promedio histórico menos dos desviaciones estándar ($\mu - 2\sigma$), representando aproximadamente el 95 % de las observaciones estadísticas de cada día del año. Se construyó una climatología de referencia para el sitio OAPA a partir de la serie Multi-Sensor Reanalysis v2 (TM3DAM-MSR v4.4 Overpass) para el período enero de 1960 a diciembre de 2024 (van der A et al., 2015), y se extendió hasta abril de 2025 utilizando datos del producto OMI OMDOAO3 L2OVP (Veefkind, 2006). Para cada día del año (DOY) se calcularon la media (μ) y la desviación estándar (σ), aplicando un suavizado mediante media móvil centrada de 30 días para definir la banda de variabilidad $\mu \pm 2\sigma$.

El evento fue detectado por las mediciones terrestres de CTO del instrumento SAOZ (*Système d'Analyse par Observations Zénithales*) perteneciente al laboratorio LATMOS (<http://saoz.obs.uvsq.fr/>; último acceso: mayo 2025), y también mediante observaciones satelitales del sensor TROPOMI (producto OFFL_L2_TOCL) a bordo del Sentinel-5P (Lambert et al., 2019), disponibles en Copernicus Data Space (<http://dataspace.copernicus.eu/>; último acceso: mayo 2025).

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El monitoreo diario realizado desde el OAPA permitió identificar un evento anómalo de reducción de ozono el 24 de marzo de 2025 (día 83 del año). Ese día, ambos sensores —TROPOMI y SAOZ— registraron valores por debajo del umbral inferior definido por

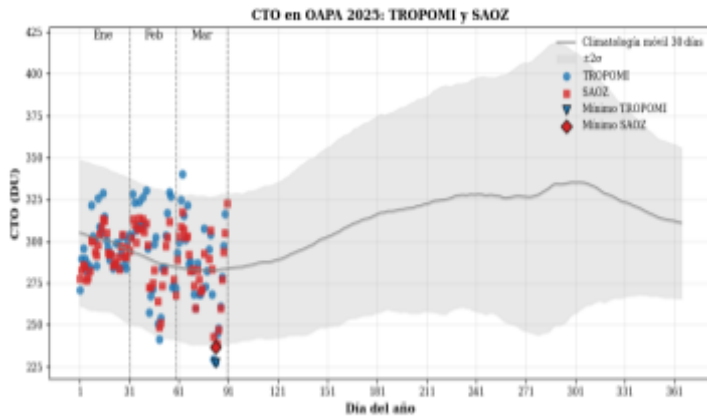


Figura 1: Observaciones satelitales y terrestres superpuestas sobre la climatología.

la climatología ($\mu - 2\sigma$), confirmando la presencia de un mini-agujero de ozono sobre la región. La Figura 1 presenta la climatología móvil de CTO (línea negra) obtenida para el OAPA a partir de las bases de datos del MSR y OMI, junto con su variabilidad ($\pm 2\sigma$). Sobre esta se superpusieron los valores diarios de TROPOMI (en azul) y SAOZ (en rojo) correspondientes al período enero–abril de 2025.

La climatología obtenida exhibe patrones estacionales definidos a esta latitud Sur, con máximos en primavera austral y mínimos en verano. Ambas Como se observa, dos de las observaciones diarias cayeron por debajo del umbral de -2σ el 24 de marzo, lo que constituye una anomalía significativa, considerando que dicha banda representa aproximadamente el 95 % de las observaciones. El valor mínimo fue registrado por TROPOMI, con 227.32 DU, equivalente a un $\sim 20\%$ menos que el valor climatológico para ese día (282.47 DU), y un $\sim 4.5\%$ por debajo del umbral de -2σ . El valor medido por SAOZ fue de 236.85 DU.

La Figura 2 presenta los mapas diarios de CTO observados por el sensor TROPOMI correspondientes a los días 23,

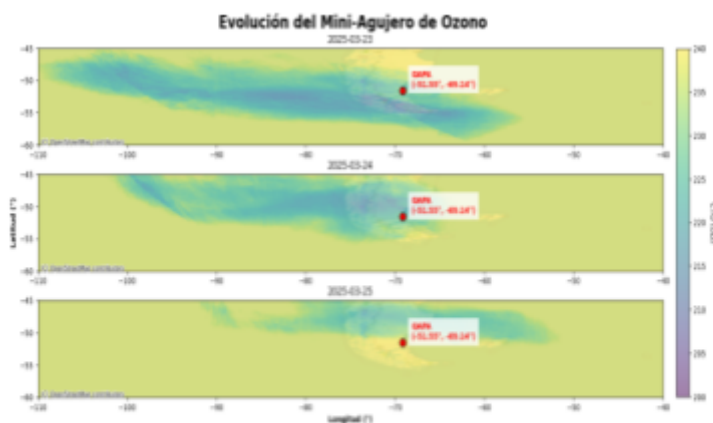


Figura 2: Visualización del mini-agujero de ozono sobre el sur argentino.

24 y 25 de marzo de 2025. Estos mapas permiten visualizar el desarrollo, desplazamiento y posterior disipación del miniagujero de ozono sobre el sur de Sudamérica. El núcleo de la anomalía se intensifica el 24 de marzo, coincidiendo con los valores mínimos detectados desde tierra, y se observa su desplazamiento hacia el este durante los días

posteriores, sobrepasando la ubicación del OAPA.

4) CONCLUSIONES

Se aplicó una metodología basada en la climatología local de CTO para identificar un evento de miniagujero de ozono pasando por sobre el sur de Sudamérica, en torno al 24 de marzo de 2025, confirmada por observaciones satelitales y terrestres, corroborada espacialmente en la región mediante mapas diarios de CTO en alta resolución. Los resultados subrayan la importancia del monitoreo integrado de ozono, a fines de estudiar el desarrollo de estos fenómenos y mejorar su pronóstico, dados los incrementos a corto plazo que pueden ocasionar sobre los niveles de radiación solar UV, y contribuyendo al conocimiento de la dinámica estratosférica regional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a LATMOS/CNRS y a Copernicus Data Space por la disponibilidad de datos SAOZ y TROPOMI, respectivamente.

REFERENCIAS

- Farman, J., Gardiner, B. y Shanklin, J., 1985:** Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature* 315, 207–210.
- Grewe, V., Dameris, M., 1997:** Heterogeneous PSC ozone loss during an ozone mini-hole. *Geophys. Res. Lett.* 24, 2503–2506.
- Hood, L. L., Soukharev, B. E., Fromm, M., y McCormack, J. P., 2001:** Origin of extreme ozone minima at middle to high northern latitudes, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 106, 20925–20940.
- James, P. M., 1998a:** A climatology of ozone mini-holes over the Northern Hemisphere. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(12), 1287–1303.
- James, P. M., 1998b:** An interhemispheric comparison of ozone mini-hole climatologies. *Geophysical research letters*, 25(3), 301–304.
- Lambert, J.-C.; Loyola, D.; McLinden, C.; Pazmino, A.; Pommereau, J.-P.; Redondas, A.; Romahn, F.; Valks, P.; et al., 2019:** TROPOMI/S5ptotal ozone column data: global ground-based validation and consistency with other satellite missions, *Atmos. Meas. Tech.*
- Millán, L. F. y Manney, G. L., 2017:** An assessment of ozone mini-hole representation in reanalyses over the Northern Hemisphere. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 9277–9289.
- Newman, P. A., Lait, L. R. y Schoeberl, M. R., 1988:** The morphology and meteorology of Southern Hemisphere spring total ozone mini-holes. *Geophys. Res. Lett.*, 15, 923–926.
- Reed, R. J. (1950). The role of vertical motions in ozone–weather relationships. *J. Meteorol.*, 7, 263–267.
- Salby, M. L. y Callaghan, P. F., 1993:** Fluctuations of total ozone and their relationship to stratospheric air motions. *J. Geophys. Res.*, 98(D2), 2271–2284.
- Stenke, A., y Grewe, V., 2003:** Impact of ozone mini-holes on the heterogeneous destruction of stratospheric ozone. *Chemosphere*, 50(2), 177–190.
- Teitelbaum, H. et al., 2001:** PSC and ozone mini-hole formation: the primary importance of synoptic scale flow perturbations. *J. Geophys. Res.*, 106(D22), 28173–28188.
- Van Der A, R. J., Allaart, M. A. F., y Eskes, H. J., 2015:** Extended and refined multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1970–2012. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(7), 3021–3035.
- Veeffkind, J. P., de Haan, J. F., Brinksma, E. J., Kroon, M., y Levelt, P. F., 2006:** Total Ozone from OMI Using the DOAS Technique. *IEEE TransactionsonGeoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1239–1244.