Servicio Meteorológico Nacional

BOLETIN 5 – TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO 2024

Gerardo Carbajal Benítez[1], Héctor Ochoa[2,3], Eduardo Luccini[4,5], Facundo Orte[6], Héctor Estévez Pérez[7], y Elián Wolfram[1,6].

1. Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.
2. Dirección Nacional del Antártico / Instituto Antártico Argentino.
3. Universidad Tecnológica Nacional FRBA. Argentina.
4. CONICET - Centro de Excelencia en Productos y Procesos de Córdoba, Argentina.
5. Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica Argentina.
6. CEILAP, UNIDEF (CITEDEF-CONICET), Argentina.
7. Red Solarimétrica del Instituto de Geofísica, UNAM, México.

Noviembre, 2024

Ministerio de Defensa
Presidencia de la Nación

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

INDICE

RESUMEN 4

ANTECEDENTES 5

1. Introducción. 6
2. CONDICIONES METEOROLOGICAS PREVALECIENTES 7
   2.1 Temperaturas. 7
   2.2 Área y volumen las NEP 8
   2.3 Estabilidad del vórtice. 10
   2.4 Activación química del vórtice 12

3. OBSERVACIONES DE OZONO 13
   3.1 Observaciones Satelitales. 13
   3.2 Estaciones en superficie. 14
      3.2.1 Estación VAG USHUAIA. 14
      3.2.2 Estación Antártica Marambio 16
      3.2.3 Estación Antártica San Martín 18
      3.2.4 Estación Antártica Belgrano 20

4. EL AGUJERO DE OZONO 22
   4.1 El área del agujero de ozono. 22

5. CONCLUSIONES 24
6. AGRADECIMIENTOS 24
7. BIBLIOGRAFÍA 25

RESUMEN.

El presente Boletín 5, tiene por objetivo establecer, la evolución del Agujero de Ozono hasta el momento sobre la Antártida para el año 2024. El vórtice polar conforme avanza el tiempo se va diluyendo, aun cuando la estratosfera se encuentra más fría con respecto a su media histórica, lo que provoco un pequeño aumento y hasta la fecha vuele a la tendencia de reducción, con una atmosfera que está en calma según el flujo de calor analizado. Las observaciones en superficie de la Antártida, muestran un aumento progresivo e incluso Belgrano II alcanza valores superiores al máximo histórico. Los ozonosondeos muestran claramente que en octubre fue el de máxima variabilidad en Marambio. Respecto al área de ozono, el máximo absoluto fue de 22.41 km2 el día 28 de septiembre, ocupando el ranking 30°, mientras que si se promedia del 7 de septiembre al 13 de octubre, el agujero es de 19.62 km2 ocupando el ranking 16°, ambos rankings son de menor a mayor. Finalmente, hay una discrepancia entre las proyección de las series de tiempo, entre TEMIS que proyecta hacia el cierre, mientras COPERNICUS tiene a aumentar el área, pero conforme avance el tiempo y nos acercamos hacia el verano, el agujero se estará cerrando paulatinamente.

Palabras Claves: Ozono, Estratosfera, Antártida, Destrucción, Calentamiento Súbito Estratosférico Química y Meteorología.

ABSTRACT.

The purpose of Bulletin 5 is to outline the evolution of the Ozone Hole over Antarctica for the year 2024. As time passes, the polar vortex has become less concentrated, despite the stratosphere remaining colder than its historical average. This has caused a slight increase in the ozone hole, although it has returned to a downward trend. Current observations of the Antarctic surface indicate a steady increase in ozone levels, with Belgrano II recording values higher than its historical maximum. Ozone soundings from Marambio show that October experienced the highest variability. The largest ozone area recorded was 22.41 million square kilometers on September 28, placing it 30th in ranking, while the average size of the ozone hole from September 7 to October 13 was 19.62 million square kilometers, placing it 16th in ranking. Both rankings are listed from lowest to highest. Lastly, there is a divergence in projections from different time series: TEMIS suggests that the ozone hole is moving toward closure, while COPERNICUS indicates an increasing area. However, as we approach summer, it is expected that the hole will gradually close.

Key Words: Ozone, Stratosphere, Antarctica, Destruction, Sudden Stratospheric Warming, Chemistry y Meteorology

ANTECEDENTES.

El descubrimiento de un agujero de la capa de ozono durante la primavera en la Antártida a mediados de la década de 1980, reveló la amenaza que representan las sustancias que agotan la capa de ozono producidas por el hombre. El daño causado por estos compuestos expone a las personas y los ecosistemas de la Tierra a la dañina radiación ultravioleta. Dentro de los 10 artículos más relevantes de la revista **nature**, se encuentra "El Descubrimiento del Agujero de Ozono en la Antártida" que cambio la perspectiva de las ciencias de la atmósfera y arrojo una de las políticas ambientales más exitosas de la historia, a nivel mundial, como lo es **el Protocolo de Montreal**. En 1985 Joe Farman, Brian Gardiner y Jonathan Shanklin reportan con 20 años de datos de ozono total de las Estaciones Antárticas Haley y Faraday, que los niveles de ozono comenzaron a descender (Agujero de Ozono) en los meses de primavera austral hacia fines de la década de 1970. Ellos sugieren y atribuyen a que esa disminución de ozono se debe a compuestos de origen antropogénico llamados Clorofluorocarbones (CFC's) los cuales provienen del uso de aerosoles y accesorios para refrigerar. En 1974 sugieren que el monóxido de cloro (ClO) se produce a partir de los CFC's y por lo tanto son destructores de ozono. A principios de la década de 1980, las mejores proyecciones de los modelos estratosféricos indicaron que, la producción continua de CFC's en grandes cantidades, pone en riesgo la destrucción de entre el 2% y el 4% de la capa de ozono para fines del siglo XX. Pero aún no se sugiere que el ozono en latitudes polares fuera especialmente sensible.

En 1974, Molina y Rowland publican los resultados de sus investigaciones en un artículo dentro de la revista **Nature**. En él advertían de la creciente amenaza que el uso de los gases CFCs representan para la capa de ozono, aviso que en aquel momento fue criticado y considerado excesivo por un sector de investigadores. Sin embargo, la tenacidad y el convencimiento que depositaron en sus propias teorías conquistaron las mentes más incrédulas. Tras arduas deliberaciones, Molina y Rowland consiguieron la aprobación a sus tesis en encuentros científicos internacionales y estuvieron presentes en las reuniones en las que se fijaron los parámetros de control que debían hacer cada país en la emisión de CFCs. El 4 de diciembre de 1995, Molina, Rowland y Crutzen fueron premiados con el **NOBEL** además por el Programa de la ONU para el Medioambiente (UNEP), por su contribución a la protección de la capa de ozono.

El agujero de ozono planteaba situaciones como el incremento de cáncer de piel, debido al aumento de la radiación ultravioleta y algunos otros daños en la ecología. Por lo tanto, los encargados de la formulación de políticas internacionales concluyeron que se necesitaba una estrategia cautelosa de protección del ozono y en marzo de 1985, se firmó la **Convención de Viena de las Naciones Unidas para la Protección de la Capa de Ozono**. Donde se pidió más investigación sobre la capa de ozono, pero no contenía objetivos legalmente vinculantes para la reducción de CFC. El informe de Farman y sus colegas sobre la pérdida de un tercio de la capa de ozono primaveral sobre la Antártida se publicó unos meses después. La respuesta de los formuladores de políticas fue inicialmente bien recibida. Sin embargo, argumentaron que los principios de precaución eran parte de la convención y firmaron **el Protocolo de Montreal de 1987** sobre sustancias que agotan la capa de ozono. Este fue un acuerdo para detener el crecimiento de la producción y el consumo de sustancias que agotan la capa de ozono a las tasas vigentes en ese momento, y cumplir con el tiempo para considerar si disminuir la producción. Posteriormente se ratificó notablemente rápida en 1989 y a enmiendas

posteriores (comenzando con **la Enmienda de Londres en 1990**) que incluyeron restricciones cada vez más estrictas sobre la producción y el consumo mundial de sustancias que agotan la capa de ozono. El Protocolo de Montreal condujo a la eliminación mundial de la producción y el consumo de CFC's para 2010, y ahora el agujero de ozono antártico se está recuperando paulatinamente. Por tanto, el protocolo evitó que la capa de ozono colapsara y es una historia de éxito emblemática para la política medioambiental mundial. Debido a que los CFC's tienen una vida útil atmosférica de 50 años o más, la atmósfera no se recuperará por completo hasta después de 2050, incluso en ausencia de más emisiones (7).

1. INTRODUCCIÓN

El ozono desempeña el papel más importante en el acoplamiento entre la química, la radiación y los procesos dinámicos. Por lo tanto, las fluctuaciones dinámicas y las reacciones químicas del ozono estratosférico Antártico, están sujetas a ambos eventos (Lubis et al., 2017; Oehrlein et al., 2020; Friedel et al., 2022). Un efecto relacionado e inesperado, reveló a principios de la década de 2000, cuando los estudios mostraron que el agujero de ozono antártico ha afectado la circulación atmosférica en la superficie en el hemisferio sur y recientemente es notable el corrimiento de 2° de latitud de la corriente en chorro hacia el polo. Esta situación produce un calentamiento en la Península Antártica, La Patagonia y Nueva Zelanda, además poca humedad (sequía) en el oeste de Tasmania y Nueva Zelanda. También, afecta la temperatura y salinidad del Océano Austral (Banerjee, et al., 2022).

La estratosfera polar durante el invierno, se caracteriza por un fuerte vórtice polar frío con vientos proveniente del oeste. Debido a la diferente distribución de los continentes y el mar en los hemisferios norte y sur, se generan en la troposfera ondas a gran escala con longitudes de onda de varios cientos de kilómetros. Estas ondas se propagan hacia arriba, alcanzando la estratosfera, perturbando o debilitando el vórtice polar, que afecta la dinámica y concretamente a la formación del agujero de ozono.

La ocurrencia de algunos eventos, de calentamiento súbito estratosféricos (en inglés, SSW) a mediados del invierno, se atribuye principalmente al impacto del vórtice polar estratosférico por medio de las ondas planetarias que se propagan desde la troposfera hacia la estratosfera (Holton, 1980; Qin et al., 2021; Baldwin et al., 2021). Un SSW es un fenómeno que se caracteriza por un rápido aumento de las temperaturas en la estratosfera de los polos. Dicha temperatura aumenta más de algunas docenas de grados en unos pocos días, durante el invierno, este fenómeno es muy común en el Hemisferio Norte y poco común en el Hemisferio Sur, aunque la frecuencia se está intensificando.

En algunos casos, el chorro polar nocturno se debilita e incluso se invierten los vientos del oeste y aparecen vientos del este durante el calentamiento. El calentamiento se denomina "calentamiento menor" cuando la temperatura polar aumenta más de 25 grados, en un período de una semana o menos, en cualquier nivel de la estratosfera. Un " calentamiento mayor" se considera si, la temperatura media zonal aumenta hacia los polos desde los 60 grados de latitud y los vientos medios zonales promediados a 60 grados de latitud se vuelven del oeste al este a una altura de 10 hPa (~32 km)

Varios estudios de caso de eventos SSW, que utilizan una combinación de modelos químico-climáticos y datos de reanálisis, enfatizan las anomalías del ozono estratosférico, que están influenciadas por la posición y la fuerza del vórtice polar y el procesamiento químico a diferentes condiciones dinámicas. Salby y Callaghan (2007) utilizaron un modelo tridimensional de dinámica y fotoquímica para investigar el ozono polar enriquecido durante la primavera a través de la mezcla isoentrópica por ondas planetarias y eliminaron gran parte del aparente agotamiento del ozono. Thiéblemont et al., (2019) confirmaron el momento de FSW afectado por el ozono y los gases de efecto invernadero a través de modelos acoplados de química y clima de WACCM. Lawrence et al. (2020) utilizaron MERRA-2 y el reanálisis de 55 años de la Agencia Meteorológica Japonesa (JRA-55) para mostrar el agotamiento del ozono y las cantidades de TCO en el casquete polar del hemisferio norte disminuyendo hasta el nivel más bajo jamás observado en primavera. Hong y Reichler (2021) investigan la pérdida persistente de ozono ártico durante las intensificaciones de los vórtices, que se compensa drásticamente con aumentos repentinos similares al calentamiento después del calentamiento final de 55 años. Friedel et al., (2022) contrastaron los resultados de los modelos de química y clima con y sin química interactiva del ozono.

El objetivo del presente Boletín 2 del Agujero de Ozono en la Antártida es monitorear e informar la formación, evolución y finalización de la destrucción de ozono durante la primavera austral, a través de la evaluación de la Temperatura Estratosférica a nivel de 50 hPa y en latitudes polares, de 60° a 90° a 50 y 70 hPa, el análisis del área y volumen de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP), así como la estabilidad del vórtice. Se incluye el análisis de observaciones satelitales y de superficie, la activación química del vórtice y el tamaño del Agujero de ozono.

2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES.

2.1. Temperaturas.

Las temperaturas en la estratosfera Antártica son un buen indicador para saber cómo evolucionará y se desarrollará el agujero de ozono en la estratosfera a corto plazo, por lo que también puede ser un predictor dinámico para desarrollar pronósticos a largo plazo, ya que la formación de nueves estratosféricas polares va a depender de la temperatura mínima (Carbajal et al., 2024; Vargin et al., 2024).

En la **Figura 1** se realiza el análisis de la temperatura mínima en la estratosfera del Hemisferio Sur (HS) a una altura de 50 hPa (a) muestra que la temperaturas mínimas en estratosfera se encuentran oscilando en la media histórica sin una tendencia aparente. Las temperaturas zonales en latitudes polares (60° a 90°) a alturas de 50 (b) y 10 hPa (c), muestra un enfriamiento notorio que se prolonga durante todo el mes de noviembre.

Fuente de datos: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp_2024_MERRA2_SH.html

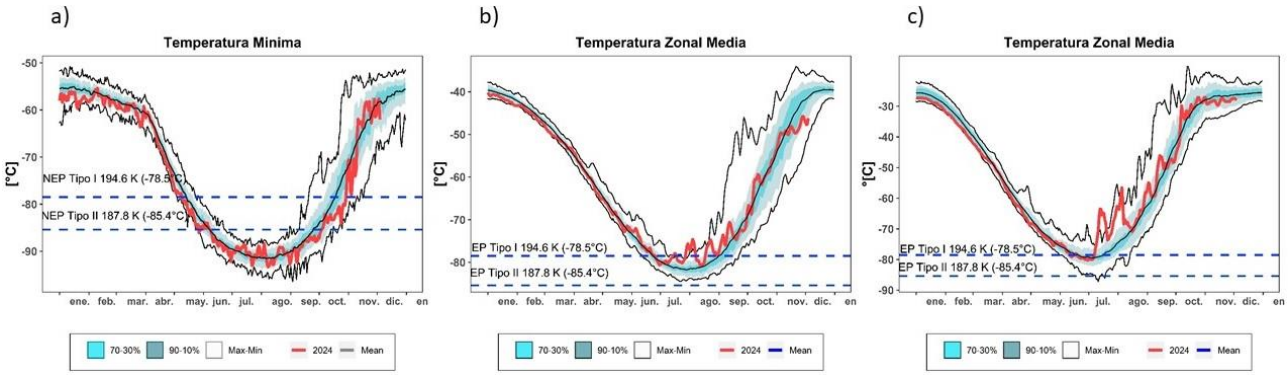


Figura 1. *a) Temperatura mínima promedio en el HS a 50hPa. b) Temperatura zonal media a 50 hPa. c) Temperaturas zonales media a 10 hPa, sobre la región de 60° a 90° S. La línea color roja, representa la evolución de las temperaturas para el año 2024 hasta el 21 de octubre. Las líneas externas negras, son media, máximos y mínimos del mismo periodo 1979 - 2023. Los sombreadas en azul-verde de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo.*

2.2 Área y Volumen de las NEP.

Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) se forman a través de las bajas temperaturas mínimas en la estratosfera; se considera Tipo I (ácido nítrico trihidratado) las que se forman a partir de una temperatura mínima inferior a 194,6 K (-78,5°C) a nivel isoentrópico de 460 K y las Tipo II por debajo de los 187,7 K (-85,3°C). Los mecanismos de formación son a través de reacciones heterogéneas en la estratosfera (Carbajal et al., 2024). El umbral de temperatura para la formación de NEP Tipo I, depende de las concentraciones de ácido nítrico y agua, lo cual es particularmente importante debido a posibles cambios en la composición química en las próximas décadas (Vargin et al., 2023).

En la ***Figura 2*** se puede observar que el área y volumen de las NEP Tipo I (a,b) y Tipo II (c,d) ya finalizado su ciclo debido a que las temperaturas están por encima de los umbrales de formación. Las NEP tipo II, se diluyen a finales de septiembre. Mientras que, las NEP Tipo I de la misma manera, pero a finales de octubre.

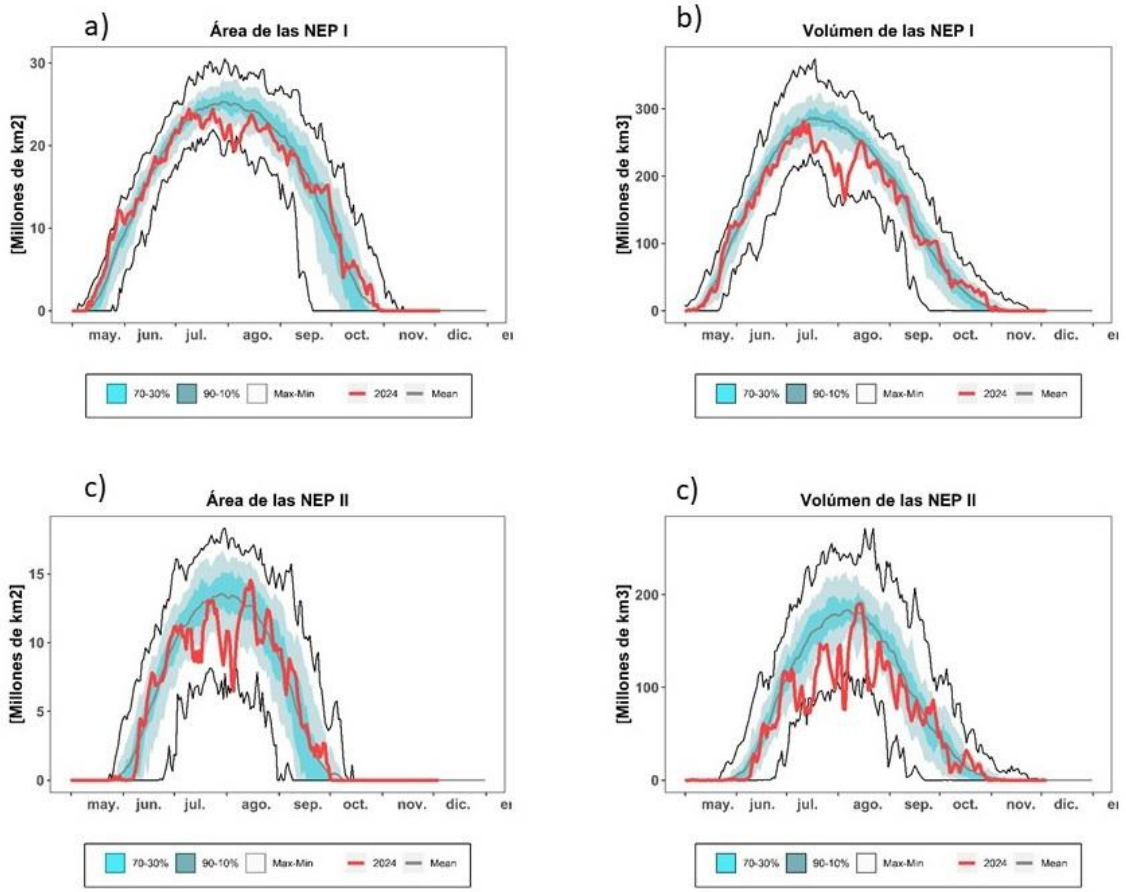
En la **Tabla 1**, se muestra los valores máximos para el tamaño y formación de las NEP Tipo I y Tipo II. Observamos que el área de las NEP Tipo I presenta 2 fechas en la cual, el máximo son aproximadamente igual, la diferencia es que el 9 de julio el valor del presente año es mayor que su media, mientras que el 23 de julio es menor con respecto a su media para la misma fecha. En el mismo sentido, las NEP Tipo II se observa que el máximo del volumen se presenta en dos fechas, el 14 y 15 de agosto, días consecutivos, es decir que el máximo persiste y en ambos casos los valores son mayores con respecto a sus medias para esos mismos días. En términos generales, los valores de las NEP Tipo I y II de este invierno polar, superan a sus medias, pero las diferencias son pequeñas, salvo el día 23 de julio que el área es menor que su media.

Es evidente que el SWW que se presenta en el mes de julio y agosto, impacta el crecimiento y desarrollo de las NEP en la estratosfera de la Antártida y se puede pensar de forma positiva para la formación del Agujero

de Ozono, debido a que hay menos reservorios que contienen a las sustancias destructoras de ozono, principalmente el cloro libre.

Tabla 1. Las unidades son: Área [Millones de km²] y Volumen [Millones de km³]. Los números en color azul, muestran cuando los valores máximos son superiores a sus medias y los números rojos cuando el valor máximo es inferior a su media.

FECHA, 2024	NEP TIPO I			
	Área	Área Media 1979 - 2023	Volumen	Volumen Medio 1979 - 2023
09 – Julio 23 – julio	24,3 24,3	23,2 24,9	---	---
11 - julio			281,4	278,1
	NEP TIPO II			
FECHA, 2024	Área	Área Media 1979 - 2023	Volumen	Volumen Medio 1979 - 2023
15 – agosto	13,9	12,7		
14 – agosto 15 – agosto	---	---	185,4 185,4	179,9 179,4



Figuras 2. *Área (a,c) y Volumen (b,d) de las nubes estratosféricas polares (NEP) Tipo I (arriba) y Tipo II (abajo), sobre la región Antártica. La línea color roja, representa la el año 2024. Las líneas externas y central negras, son los valores medias, máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2023. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo.*

Fuente de datos: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp_2023_MERRA2_SH.html

2.3 ESTABILIDAD DEL VÓRTICE

El flujo de calor promediado longitudinalmente entre los 45°S y los 75°S es una indicación de hasta qué grado está perturbada la estratosfera. En la **Figura 3** se muestra el desarrollo del flujo de calor. Lea el subtítulo para mayores detalles de cómo interpretar el gráfico.

Se puede observar que, después del SSW en agosto, la tendencia del flujo de calor es a ir desacelerando y poco a poco hacia la calma, aunque ya en el mes de septiembre hay nuevamente un pequeño movimiento y transporte de calor desde la troposfera que se transporta hacia la estratosfera. Durante el mes de septiembre y al inicio de octubre, el flujo de calor se incrementa bruscamente, pero tiende a la normalidad. Durante el mes de noviembre, la propagación de calor disminuye, debido a que la atmosfera tiende a estar en calma, asociado al enfriamiento de la estratosfera (Ver **Figura b y c**)

Fuente de datos: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/flux_2023_MERRA2_SH.html

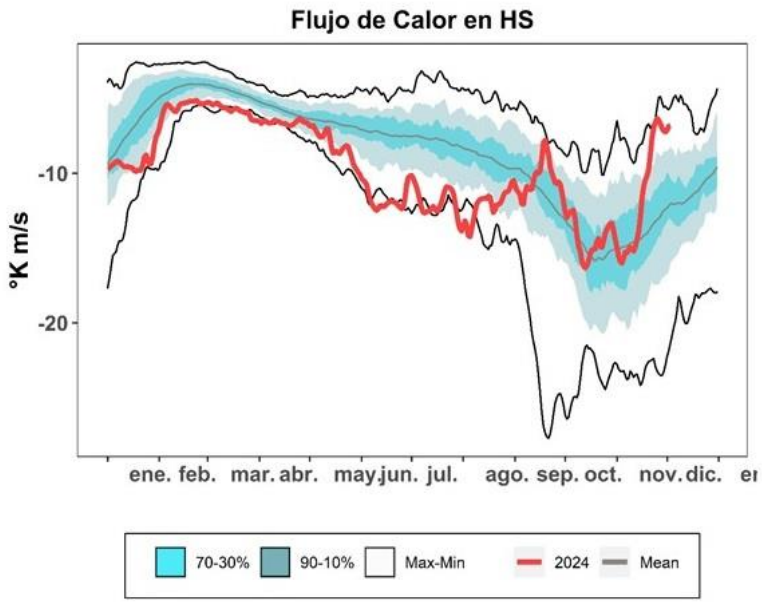


Figura 3. *Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva roja muestra los datos para 2024 hasta el 26 de noviembre. Note que un gran número negativo significa un gran flujo de calor. Los valores cercanos a cero significan un flujo de calor pequeño. Las líneas externas y central negras, son los valores medias, máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2023. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo.*

En la ***Figura 4*** se observa el vórtice polar y su estabilidad, a través del Potencial de Vorticidad (PV), en una superficie isoentrópica de Temperatura Potencial a 475°K, correspondiente a la baja estratosfera, donde la destrucción de ozono se lleva a cabo. Los valores entre más negativos, implican mayor estabilidad del vórtice polar.

Para estas fechas, el vórtice se observa inestable, con un muy ligero desplazamiento hacia el océano índico y Atlántico, al sur de Sudáfrica. (***a y b***).

En el gráfico del flujo Eliassen – Palm (E-P) de la onda total (***c***) se observa que, la propagación en los últimos días ha sido poco intenso y desplazado hacia los 60° de latitud. Finalmente la onda 2 (***d***), después del máximo histórico en el mes de julio, los últimos días se estabiliza la actividad y tiende a ser menor, hacia la estabilidad.

Fuente de datos:

http://www.pa.op.dlr.de/arctic/ecmwf.php?im=23

https://db.cger.nies.go.jp/gem/stras/en/forecast.html?date=20220830&polar=s&k=475

https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/STRAT/

https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html

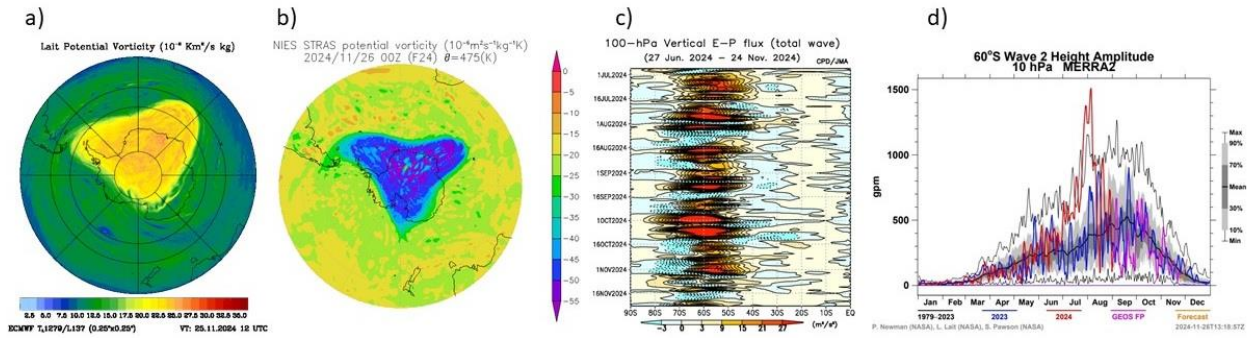


Figura 4*. Mapas de Vorticidad Potencial (PV) a una altura isentrópica de 550°K. El mapa se construye con datos del ECMWF para el día 21 de octubre (a). Después, el siguiente mapa (b) se construye con datos del NCEP para el día 26 de noviembre. El flujo Eliasen-Palm de onda total se construye en la agencia de meteorología Japonesa (c), Finalmente, la actividad de la onda 2 (d).*

En la ***Figura 5*** se observa la temperatura dentro del vórtice polar para los días 26, 27, 28 y 29 de noviembre, donde se observa que las zona con mayor temperatura se mueve siguiendo el flujo y alcanza en sur de la Patagonia, es decir por arriba de la ciudad de Ushuaia y la parte más fría permanece y perdura sobre la parte alta de Antártida, hacia el Océano Indico.

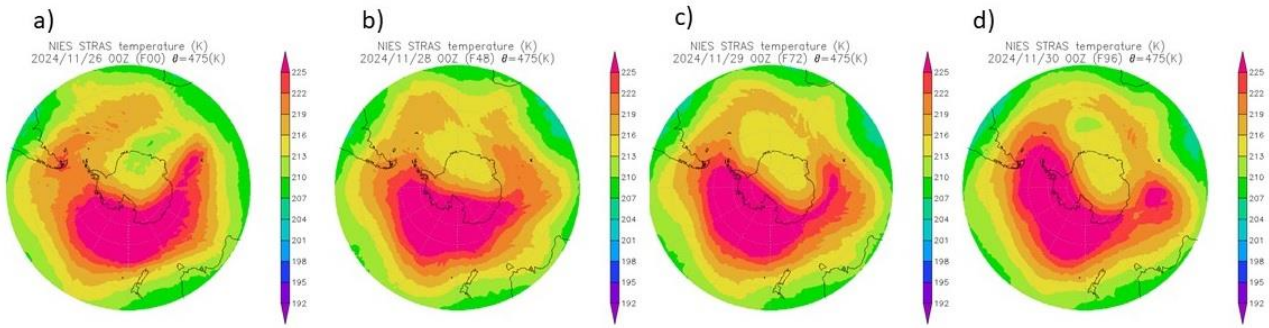


Figura 5. *Campos de Temperatura isoentrópica a 475°K dentro del Vórtice Antártico. a**) 26, b) 27, c) 28 y d) 29 de noviembre 2024**.*

2.4 Activación química del Vórtice Polar

Las reacciones heterogéneas son procesos que involucran distintas fases como gases, sólidas y líquidas, estas son extremadamente significativas en la estratosfera Antártica, debido que promueven la formación de compuestos clorados que se encuentran como reservorio en las NEP. La importancia de tales reacciones, es la liberación de cloro y son removidos por especies de nitrógeno (NOx) que en su forma más estable está como ácido nítrico (HNO_3) A través de varios mecanismos de las reacciones, los NOx atrapan cloro activo y lo transforman en reservorios Y posteriormente con la radiación UV, liberan cloro e inicia la destrucción del ozono, a través de ciclos catalíticos:

Las cinco reacciones básicas de la química heterogénea, las cuales son de mayor importancia para el la química de ozono son:

$$ClONO_2 + HCl \rightarrow Cl_2 + HNO_3 \qquad (R7)$$
$$ClONO_2 + H_2O \rightarrow HOCl + HNO_3 \qquad (R8)$$
$$N_2O_5 + HCl \rightarrow ClNO_2 + HNO_3 \qquad (R9)$$
$$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2\ HNO_3 \qquad (R10)$$
$$HOCl + HCl \rightarrow Cl_2 + H_2O \qquad (R11)$$

En la **Figura 6** se observa hasta el momento (27 de noviembre) los procesos químicos que se están llevando a cabo dentro del vórtice polar, aunque en un menor grado. El ácido nítrico (HNO_3) (**a**) se encuentra en menores concentraciones, pero las temperaturas ya no son favorables por las NEP tipo I y II. El ácido clorhídrico (HCl) (**b**) en estado gaseoso y el vórtice se observa saturado, recordando que este gas es un reservorio (conjuntamente con NOx y CH_4) para el cloro activo, en otras palabras ayuda a inhibir la destrucción de ozono. El compuesto de óxido de cloro ClOx (**c**) es el principal responsable de la destrucción catalítica de ozono, debido a su capacidad de liberar al cloro a través de la radiación ultravioleta y en este se encuentra, relativamente, ya en bajas concentraciones y poco a poco tiende a extinguirse. Finalmente el ozono (O_3) (**d**), muestra que aún permanece en baja concentración, pero su recuperación se nota respecto a días atrás.

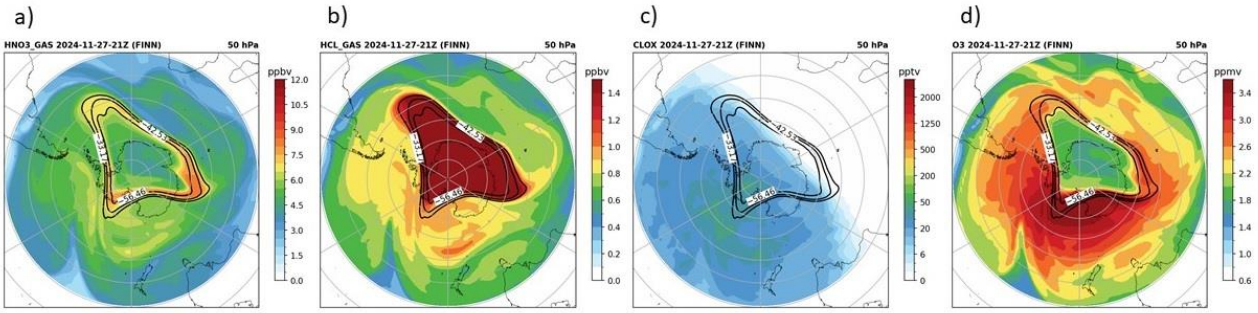


Figura 6. *Activación química dentro del vórtice polar a) ácido nítrico [ppbv], ácido clorhídrico [ppbv], C) Oxido de cloro [pptv] y Ozono [ppmv], todos a una altura de 50hPa, donde aproximadamente se encuentra en la mayor concentración el ozono.*

3. OBSERVACIONES DE OZONO

3.1 Observaciones Satelitales

Al inicio de la primavera austral, el sol empieza a retornar a la Antártida, ya que finaliza la noche polar. Tanto los datos satelitales, los datos de superficie y sondeos con globos muestran que el agujero de ozono, ya inició su formación. A la fecha de hoy, ya se observa la destrucción de ozono en la estratosfera a través de los compuestos destructores de ozono (ODS) albergados en las NEP.

La **Figura 7** se muestra la columna de ozono mínimo en Hemisferio Sur (**a**) y el Ozono dentro de la capa polar (**b**) y el déficit de ozono, es decir la perdida de éste gas en el agujero de ozono (**c**) del 2024, tal como han sido medidas por el TOMS, OMI y OMPS, en comparación con su media del periodo 1979 a 2023.

Tal como se observó anteriormente, el vórtice tiende a finalizar. El ozono mínimo en el HS (**a**) venia oscilando con poca amplitud alrededor de su media y se observa que, durante el mes de noviembre hay perdida de ozono, asociado al enfriamiento estratosférico como se vio en el apartado de temperaturas.

El ozono dentro de la capa polar (**b**) tiene un comportamiento similar (**a**) con pérdida el último mes. Mientras que, en los últimos días el déficit de ozono (**c**) ha permanecido en una constante durante noviembre, lo que significa que la pérdida de ozono ha superado la media histórica.

Fuente de datos: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/SH.html

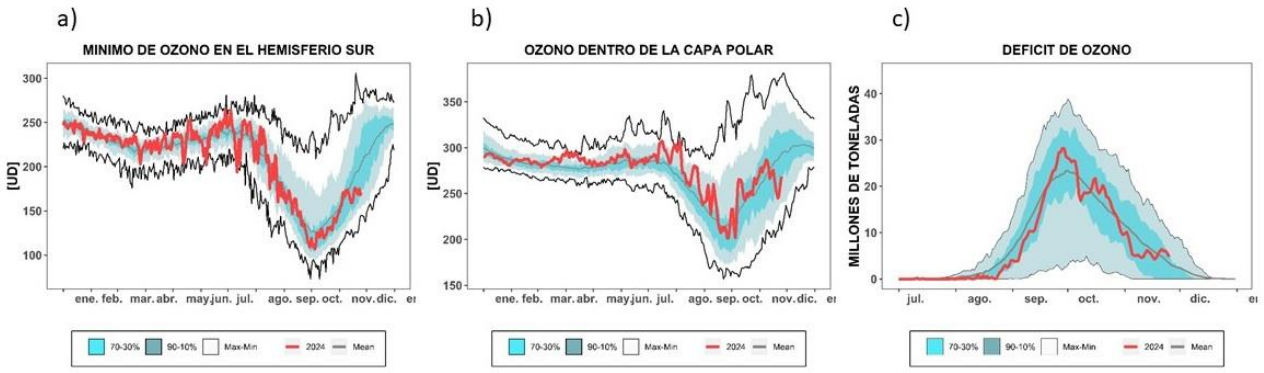


Figura 7. a), *mínimo diario de la columna total de ozono en el hemisferio sur. b), es la columna total de ozono dentro de la capa polar. C) Es el Déficit de ozono .En los tres casos, la línea roja muestra el año 2024 hasta el 26 de noviembre. Las líneas media y externas negras, son los valores medios, máximos y mínimos, respectivamente, durante el periodo 1979 – 2023. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.*

3.2 Estaciones en superficie

Por ahora, solo se usan mediciones en superficie obtenidos mediante el Espectrofotómetro Dobson y ozonosondeos de la Estación GAW Ushuaia (54° 50’ 54.46’’S, 68° 18’ 37.52’’ O) Y mediciones con Espectrofotómetro Dobson de la Estación Antártica Marambio (61° 14’ 33.68’’ S, 56° 37’ 36.98’’ O), dependientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Ozonosondeos y mediciones del espectrofotómetro Brewer de la Estación Antártica Belgrano II (77°52’28”S 34°37’37”O), medidas con Espectrofotómetro Brewer de la Estación Antártica San Martín (68°07’48’’ S, 67°06’ o8’’ O), ambos laboratorios bajo la dependencia de la Dirección Nacional del Antártico/Instituto Antártico Argentino (DNA/IAA).

3.2.1. Estación VAG Ushuaia.

El espectrofotómetro Dobson (D131) mide todos los días y en la **Figura 8**, se muestra la evolución diaria (**a**) y mensual (**b**) de la columna total de ozono hasta el 26 de noviembre del año 2024, comparado con su media histórica (1994-2023). Los datos diarios de ozono total, son muy acordes con los datos de ozono mínimo y están asociados a la temperatura en la estratosfera. Después del SWW los datos en su mayoría están por arriba de su media debido

a que el vórtice polar funciona como una barrera donde no permite intercambio, de tal manera que la parte fuera del vórtice es más caliente que dentro del mismo. La amplitud en cuanto a los valores es notorio, son 3 veces que al agujero de ozono está por encima del sur de la Patagonia, mientras que valores máximos que rebasan los máximos históricos en la estación, debido a paso de masas de aire ópticas ricas en ozono, alrededor del vórtice polar. A pesar de que en septiembre y octubre, paso el agujero de ozono las medias mensuales se observan valores de ozono por arriba de la media, incluso en noviembre.

En la **Figura 9** se muestra los perfiles de ozono para el año 2024 (17 sondeos), después por mes. 4 ozonosondeos durante septiembre, el cual es de poca variabilidad, debido a que el agujero de ozono no pasa por la ciudad, durante los lanzamientos, además de estabilidad fuera del vórtice polar, acumulando las parcelas ópticamente ricas en ozono sobre la estación. En el mes de octubre, son 6 lanzamientos y en los cuales el día 11 de octubre pasa el agujero de ozono, a eso se debe la gran variabilidad de ozono en la estratosfera, posteriormente la mase de aire enriquecida con ozono continua por encima de Ushuaia. Finalmente, noviembre se caracteriza por muy poca variabilidad de ozono, debido a que el agujero de ozono se ha reducido más que lo normal y no alcanza a pasar por el sur de la Patagonia.

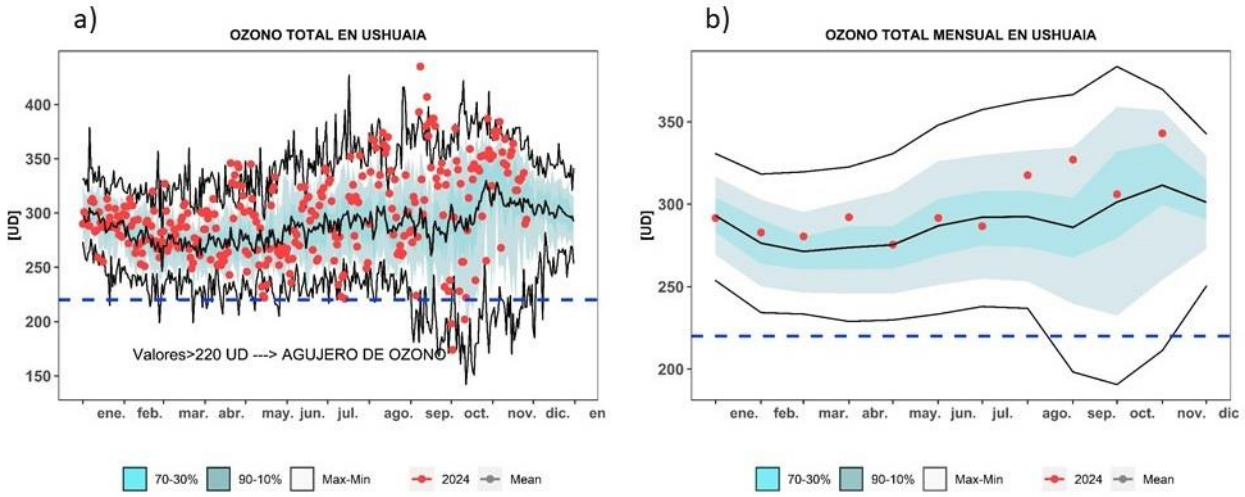


Figura 8. *Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. Los puntos rojos son los datos del año 2024. Las líneas negras son la media, máximos y mínimos, en tanto los colores sombreados es la media del período 1994 a 2023. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.*

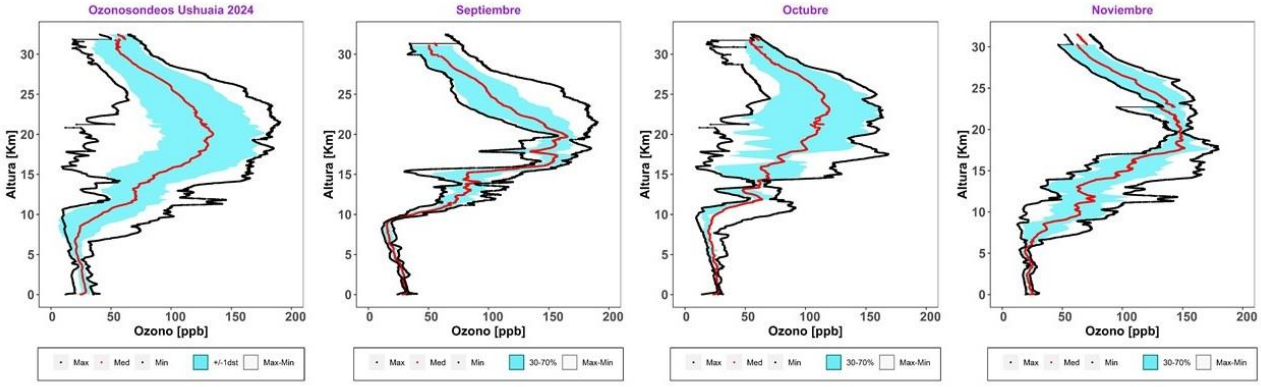


Figura 9. *Ozonosondeos realizados en la Estación VAG de Ushuaia. En los dos gráficos, la línea azul es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmosfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].*

3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO.

La estación Antártica Marambio se encuentra en la península Antártica y forma parte de la red de medición de ozono total de programa VAG de la OMM. El espectrofotómetro Dobson (#D099) mide todos los días, excepto durante el invierno polar (abril a septiembre) o debido a situaciones complicadas que impidan la medición, como vientos fuertes, lluvia, caída de Nieve, etc. Este año inicia tarde las mediciones debido a las inclemencias del tiempo, pero actualmente ya están regularizadas dichas mediciones.

Foto: Técnicos Matías Ignacio Martorano y Evelyn de los Ángeles Lucero.

A mediados del mes de agosto, reinician las mediciones diarias y se observa que en el grafico diario de la **Figura 10**, que la primera parte del año, hasta el mes de abril, los valores del año oscilan alrededor de la media del periodo 1986 a 2023 y en tres casos se supera los valores máximos históricos en el mes de marzo. La segunda parte del año, cundo la noche polar termina, se retoman las mediciones y se observa que, el agujero de ozono, ya se encuentra en la Península Antártica. Después del calentamiento súbito estratosférico que deforma al vórtice polar y al agujero de ozono, éste deja de estar sobre la Estación Marambio y se observa valores con una variabilidad alta, es decir cantidades por debajo y por arriba por del umbral de 220 UD, esta situación se puede explicar debido a la inestabilidad del vórtice durante septiembre que, se deforma y en ocasiones pasa por la parte norte de la Península Antártica y otras no, específicamente en la estación. Posteriormente, en octubre y lo que va noviembre valores muy altos, e incluso uno que supera el máximo histórico (3 de noviembre). Esta situación es debido a que el agujero de ozono es más pequeño de lo normal y que la mayor parte del tiempo se encuentra desplazado hacia el océano Índico y no pase por la Península Antártica.

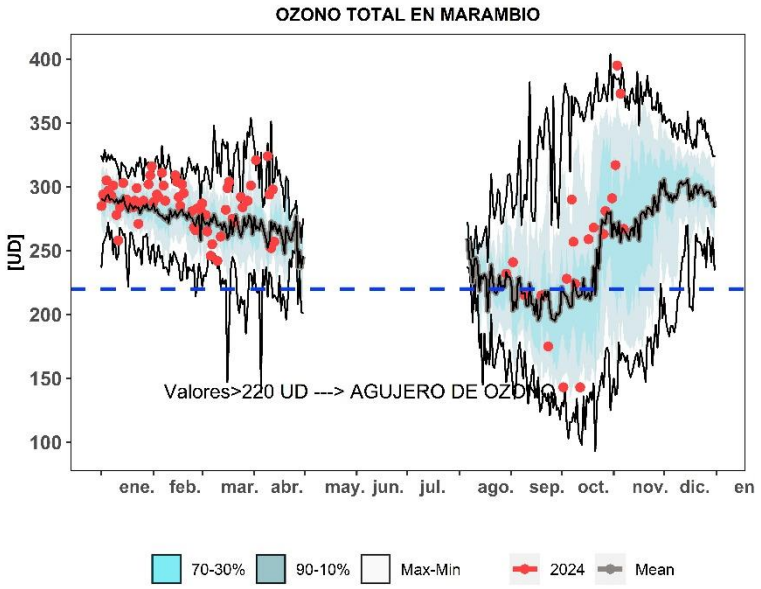


Figura 10. *Medición de ozono total diario con el espectrofotómetro Dobson (#099) en la estación Antártica Marambio.*

.

3.3.3. Estación Antártica San Martín.

La estación Antártica San Martín se encuentra en la península Antártica San Martín (68°07'48'' S, 67°06' 8'' O) y forma parte de la red de medición de ozono total del programa VAG de la OMM. El instrumento Brewer #162 utilizado para medir el ozono total en la estación y a partir del 1 de diciembre de 2020, sus datos serán parte de la red europea de instrumentos Brewer **EUBREWNET**. El Espectrofotómetro Brewer se encuentra bajo un convenio entre el **Instituto Antártico Argentino** (IAA) y el ex **Comando Antártico de Ejército**.

El espectrofotómetro Brewer mide todos los días, excepto durante el invierno polar (abril a septiembre) o debido a situaciones complicadas que impidan la medición, como vientos fuertes, lluvia, etc. Actualmente se no ha iniciado las mediciones para el monitoreo del agujero de ozono.
El espectrofotómetro Brewer #162 participó este año de la intercomparación realizada desde el 19 de febrero al 8 de marzo en Santa María, Rio Grande do Sur (RS, Brasil). Esta fue la primera campaña Iberoamericana de calibración e intercomparación de instrumentos Brewer para la medida de ozono total y radiación solar ultravioleta. La misma fue organizada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, España) y la Universidad Federal de Santa María (UFSM, Brasil), con el apoyo de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

El Brewer #162 fue retirado en marzo de 2023 de base San Martín, participó de la Intercomparación y volvió a la base antártica San Martín durante el mes de abril de 2024. El mismo fue calibrado por el Dr. Alberto Redondas y el Téc. Nazareno Tintes quién lo operó durante la visita a Brasil.
En las imágenes siguientes podemos ver el despliegue de Brewers en las instalaciones de la UFSM.

Despliegue de espectrofotómetros Brewers en la Universidad Federal de Santa María, Brasil. El Téc. Nazareno Tintes realizando un test de lámparas UV. (Fotos, Dr. Alberto redondas)

En la **Figura 11** se observa las mediciones del Espectrofotómetro Brewer durante septiembre y lo que vamos de

noviembre (día 26) y se observa que, los valores de ozono se incrementan progresivamente e incluso rebasando los valores históricos. El agujero de ozono es más pequeño que lo normal y genera en la estación San Marín una situación muy similar a Marambio, debido a que San Martin se encuentra en la Península Antártica y se encantan ambas estaciones en zonas estratosféricas con masas de aire enriquecidas con ozono.

Montaje del espectrofotómetro Brewerr #162 y despliegue auroral en Base San Martín. El personal técnico del IAA Ing. Federico Daniele y Téc. Rodrigo De Iulis (2024).

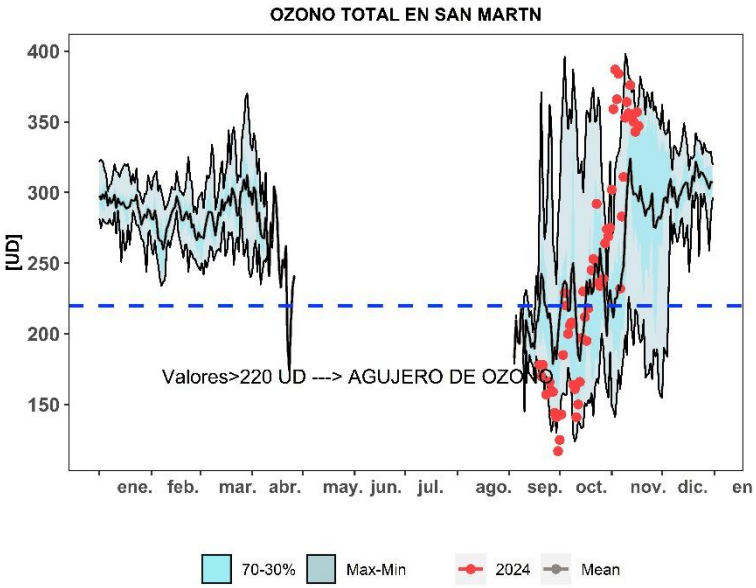


Figura 11. *Medición de ozono total diario medido con el Espectrofotómetro Brewer #162 en la estación Antártica San Martín.*

3.3.4 Estación Antártica Belgrano II.

La estación Antártica Belgrano II se encuentra ubicada en el Nunatak Bertrab ubicado al sur del mar de Wedell en la Bahía Vahsel sobre la Costa Confin en la Tierra de Coats y forma parte de la red de medición de ozono total de programa VAG de la OMM. El ozono total se mide con espectrofotómetro Brewer MKIV desde 1992, Los datos del Brewer #99 desde el año 2020 son parte de la red europea de brewer **EUBREWNET**. El Espectrofotómetro Brewer es un instrumento que deriva del convenio de Colaboración Científica entre la Dirección Nacional del Antártico - **Instituto Antártico Argentino** (IAA) y el **Programma Nazionale di Ricerche in Antartide** (PNRA) de Italia a través del Instituto de Física Atmosférica de Roma (IFAR).

Los ozonosondeos que, se realizan en esta base. Estos son llevados a cabo, a través del convenio de Colaboración Científica entre la Dirección Nacional del Antártico - **Instituto Antártico Argentino** (IAA) y el instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA) de España desde 1994, donde se inicia la colaboración con el monitoreo de la capa de ozono y el NO2 con el Espectrómetro Visible de Absorción (EVA), utilizando la técnica DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy). Hoy se trabaja con el espectrómetro NEVA II que utilizan la técnica Max DOAS. Ambos espectrómetros fueron desarrollados por el INTA de España.

La Estación Antártica Belgrano II es una estación NDACC y los datos pueden ser accedidos en el siguiente link: https://ndacc.larc.nasa.gov/stations/belgrano-ii-station-antarctica.

En la **Figura 12** se muestra los resultados de las mediciones de ozono total, donde la tendencia es muy similar a las estaciones Marambio y San Martin, se nota un incremento que parte del mes de septiembre y se prolonga en noviembre. Es notorio como el agujero de ozono poco a poco deja de estar por encima de la estación Belgrano II

Operación de Espectrofotómetro Brewer, preparación y lanzamiento de ozonosonda en Base Belgrano II por los Técnicos del IAA, Rodrigo Fornerón, Agustín Coto y Lautaro Odellii (2024).

En la **Figura 13** la evolución del agujero de ozono se muestra a través de los ozonosondeos, en estos se muestra el perfil de ozono y de la temperatura. El día 25 de septiembre (**a**), 16 (**b**) y 30 (**c**) de octubre, es notorio que el agujero de ozono está presente por arriba de la estación, aun cuando el día 25 no llega el globo hasta una altura óptima, si alcanza la altura por arriba de la capa de ozono. Los perfiles de temperatura muestran claramente el calentamiento de la estratosfera, en (**a**) está por debajo del umbral de la formación de NEP tipo II, mientras que en (**b**) las temperaturas alcanzan solo para la formación de NEP Tipo I. para (**c**) ya no habría formación de NEP debido a que las temperaturas llegan a estar por arriba del umbral.

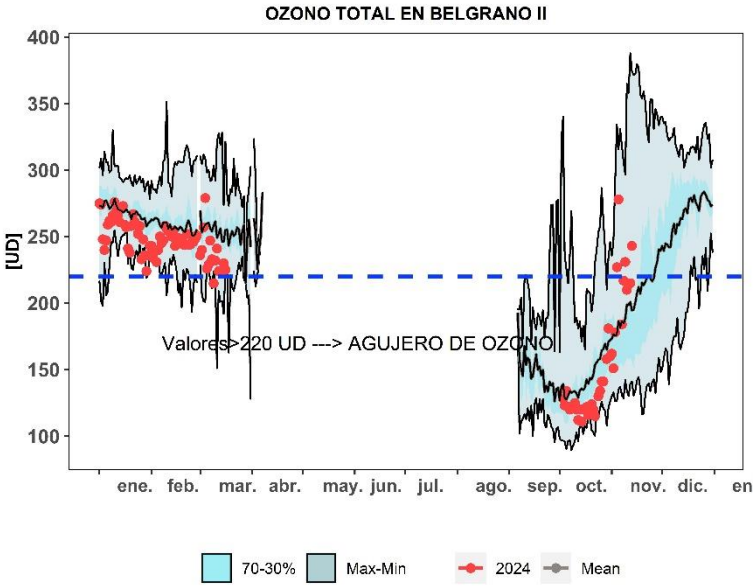


Figura 12. *Medición de ozono total diario medido con el Espectrofotómetro Brewer en la estación Antártica Belgrano II.*

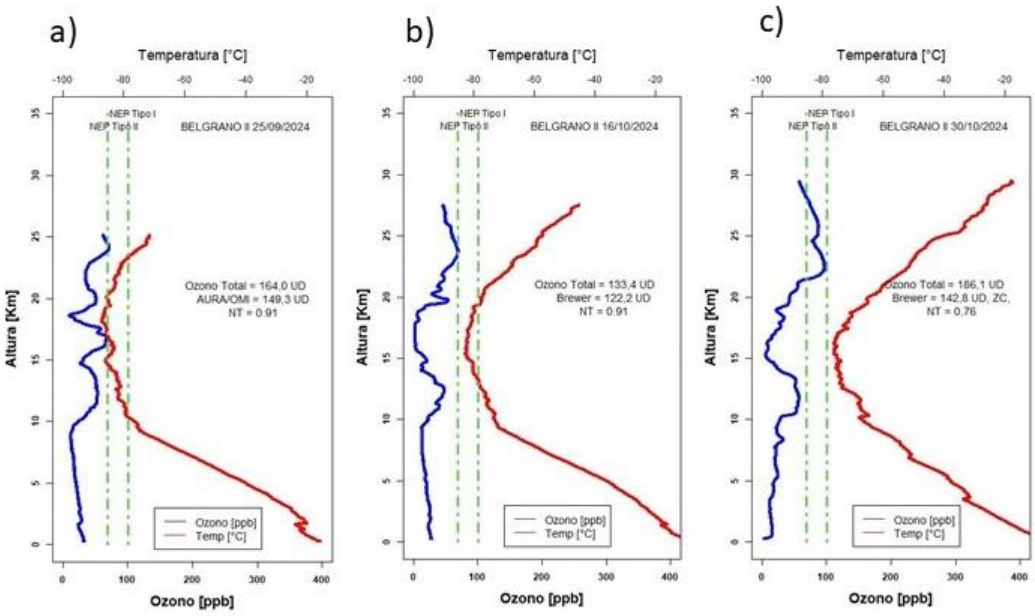


***Figura 13.** Ozonosondeo realizado en la Estación Antártica Belgrano II. En los dos gráficos, la línea azul es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmosfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C]. El Valor NT se relaciona con el Factor de Normalización (NT).*

4. El Agujero de ozono

4.1 El área del agujero de ozono

En la **Figura 14** se muestra el área de la región en la que el ozono total es menor a los 220 UD (Definido por la comunidad científica como Agujero de Ozono). Cuatro son los portales que reportan el área del agujero de ozono, a través de series de tiempo, los cuales muestran que, hay una discordancia y diferencia ente el pronóstico del portal TEMIS (**b**) y el COPERNICUS (**c**); la proyección del **b** muestra que el agujero tiene hacia la baja, mientras que **c**, por el contrario, la proyección que muestra es a aumentar el área pero por muy pocos kilómetros.

Fuente de datos:

https://www.temis.nl/protocols/o3hole/o3_size.php?date=20230922&lang=0

https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/SH.html y https://www.temis.nl/index.php

https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer

https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/gif_files/ozone_hole_plot_N20.png

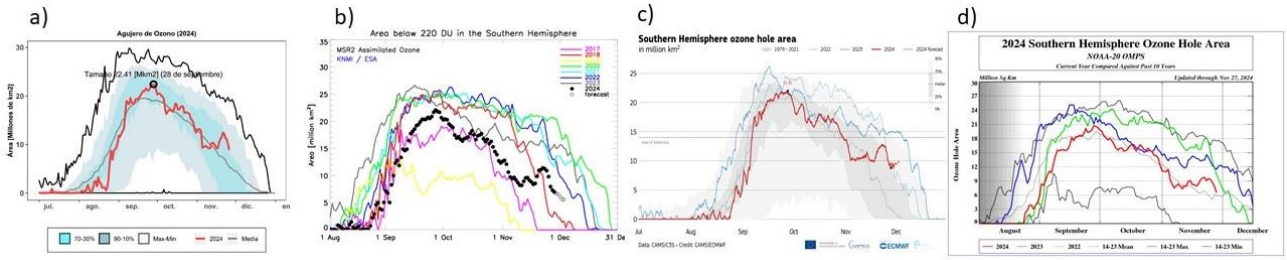


Figura 14. Área del Agujero de Ozono (millones de km2). a), Es el consenso de satélites de la NASA, EEUU (TOMS+OMI+OMPS). b); son datos del TEMIS, Datos de la ESA (Agencia Espacial Europea). c) El monitoreo del COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVUCE (CAMS) del Centro Europeo ECMWF. d) El gráfico de la NOAA, solo del equipo OMPS.

En lo que va del año, ya se puede establecer la magnitud del agujero de ozono, después de 2 calentamientos súbitos estratosféricos menores que ayudo a que éste no creciera demasiado. En la **Figura 15** se puede observar que el área máxima absoluta (**a**) y el promediado del 7 de septiembre al 13 de octubre (**b**) que, son la fechas en las que observa el tamaño máximo. **a)** está en el **Rankin 30°** de 45 años de medición, considerando de menor a mayor, más pequeño que los últimos 5 años. **b)** Mientras que el área promedio, ocupa el lugar del **Rankin 16°**, de menor a mayor, siendo este promedio menor al de los últimos 4 años.

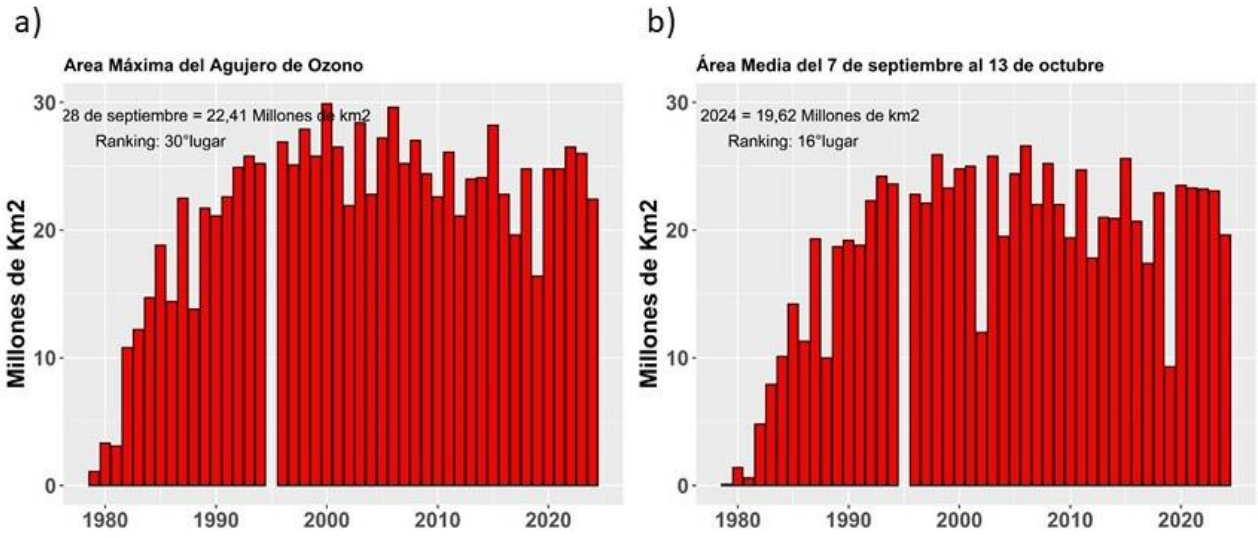


Figura 15. Serie de tiempo del Área del Agujero de Ozono (millones de km2). a) Área Máxima absoluta y b) área promedio del periodo del 7 de septiembre al 13 de octubre de cada año.

En la **Figura 16**, se observa los mapas proyectados para los próximos 6 días, a partir del 1 de noviembre. En estos se observa que el agujero de ozono durante los 6 días, estaría disminuyendo paulatinamente.

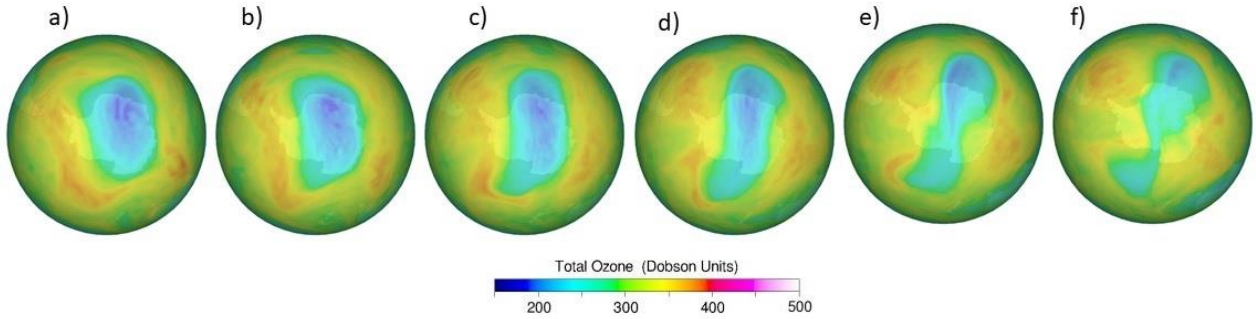


Figura 16. *Proyecciones para los próximos 6 días a partir del día 1 hasta el 6 de diciembre, muestran las proyecciones para la evolución y desarrollo del agujero de ozono.*

5. CONCLUSION

Se destaca el enfriamiento de la estratosfera, según en análisis de las temperaturas zonales, teniendo pequeñas repercusiones en el retroceso del agujero de ozono, tal como ocurrió a inicios de noviembre, un muy pequeño aumento del área.

El agujero de ozono, tal como se observa el análisis de área máxima del agujero de ozono y en el área media del periodo del 7 de septiembre al 13 de octubre, ocupando el Rankin 16° y 30° de menor a mayor de los 45 años de medición. Aunque es menor que el de los últimos 5 años.

Se espera que el agujero de ozono continúe con su diminución, según las proyecciones y no se descarta un cierre a más tardar la segunda semana de diciembre.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Oficina de Asimilación y Modelo Global (GMAO) de la NASA (MERRA).

Se agradece al Centro Europeo para Pronósticos del Tiempo de Medio Alcance (ECMWF), Instituto Noruego para Investigación del Aire (NILU) y a la Agencia Espacial Europea (ESA).

Se agradece a Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS - ECMWF).

Se agradece a Centro Climático de TOKIO, considerado Centro regional de Clima (RII, Asía).

Se agradece los datos de las ozonosondas de Belgrano II del convenio entre el instituto Antártico Argentino (IAA) dependencia de la Dirección Nacional del Antártico de Argentina (DNA) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

(INTA) de España.

Se agradece al **Prof. Juan Daniel Agüero y Osvaldo Blanco**, por el aporte y control de los datos históricos de la Estación Antártica Marambio.

Se agradece al personal de la Estación VAG-Ushuaia; **Ing. Lino Fabián Condori, Sr. Emiliano Petruzzi y Sr. Gonzalo Gambarte.**
Se agradece a los observadores Antárticos del Pabellón Científico de Marambio; **Técnicos Matías Ignacio Martorano y Evelyn de los Ángeles Lucero.**

Se agradece a los observadores Antárticos de San Martín del Laboratorio LASAN: **Ing. Federico Daniele y Téc. Rodrigo De Iulis.**

Se agradece a los profesionales Antárticos de Belgrano II del Laboratorio LABEL; **Téc. Rodrigo Fornerón, Téc. Agustín Coto y Téc. Lautaro Odellii.**

8. BIBLIOGRAFÍA

Baldwin, M. P., Ayarzaguena, B., Birner, T., Butchart, N., Butler, A. H., Charlton-Perez, A. J., Domeisen, D. I., Garfinkel, C. I., Garny, H., Gerber, E. P., et al.: Sudden stratospheric warmings, Reviews of Geophysics, 59, e2020RG000 708, 2021.

Banerjee, A., Fyfe, J. C., Polvani L. M., Waugh, D., and Chang K. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol, Nature, Vol 579, 544-548, 2022.

Botek E., Chabrillat S., Christophe Y. (BIRA-IASB) “Report on 2014 Antarctic ozone hole studies” MACC-III project (Monitoring Atmospheric Composition and Climate - III) 2014.

Carabajal Benitez Gerardo; Cupeiro Manuel; Sánchez Ricardo; Agüero Juan Daniel; Barlasina María Elena y Nollas Fernando. Caracterización de la Columna Total de Ozono medido con el Espectrofotómetro Dobson en cuatro estaciones en la Argentina. ISBN 978-987-1323-36-4, 2014.

Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines 1, 2, 3, 4 e Informe Final del Agujero de Ozono 2019.

Carbajal Benitez, G., H. Ochoa y H. Estevez Perez, 2024: Nubes Estratosféricas Polares y su seguimiento a través de modelos y ozonosondeos en Ushuaia y Belgrano II. Nota Técnica SMN 2024-169, 2024.

Eskes H. J., Van der A R. J., Brinksma E. J., Veefkind J. P., de Haan J. F., and Valks P. J. M., Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat, Atmos. Chem. Phys. Discuss, 5, 4429-4475, 2005.

Friedel, M., Chiodo, G., Stenke, A., Domeisen, D. I. V., 465 and Peter, T.: Effects of Arctic ozone on the stratospheric spring onset and its surface impact, Atmospheric Chemistry and Physics, 22, 13 997–14 017, https://doi.org/10.5194/acp-22-13997-2022, 2022.

Geir Braathen, “Boletín de Ozono Antártico”, Editado por la WMO.

Holton, J. R.: The dynamics of sudden stratospheric warmings, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 8, 169–190, 1980.

Henk Eskes, Peter van Velthoven, Pieter Valks and Hennie Kelder, Assimilation of GOME total ozone satellite observations in a three-dimensional tracer transport model, Q.J.R.Meteorol.Soc. 129, 1663-1681, 2003. doi: 10.1256/qj.02.14.

Newman (NASA), E. Nash (SSAI), R. McPeters (NASA), S. Pawson (NASA) National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center - NASA Ozone Watch.

Hong, H. J., and Reichler, T.: Local and remote response of ozone to Arctic stratospheric circulation extremes, Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 1159–1171, https://doi.org/10.5194/acp-21-1159-2021, 2021.

Karpechko, A., Y. (2020). Jet stream stops shifting as ozone layer recovers, Nature, Vol 579, 544-501.

Lawrence, Z. D., Perlwitz, J., Butler, A. H., Manney, G. L., Newman, P. A., Lee, S. H., and Nash, E. R.: The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic oscillation and ozone loss, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125, e2020JD033 271, 2020.

Lubis, S.W., Silverman, V., Matthes, K., Harnik, N., Omrani, N.-E., andWahl, S.: How does downward planetary wave coupling affect polar stratospheric ozone in the Arctic winter stratosphere? Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 2437–2458, 2017.

Manuel Gil Ojeda “El ozono estratosférico” Tethys, 3, 47–58, 2006. DOI:10.3369/tethys.2006.3.06.

Oehrlein, J., Chiodo, G., and Polvani, L. M.: The effect of interactive ozone chemistry on weak and strong stratospheric polar vortex events, Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 10 531–10 544, 2020.

Qin, Y., Gu, S.-Y., Dou, X., Teng, C.-K.-M., and Li, H.: On the westward quasi-8-day planetary waves in the middle atmosphere during arctic sudden stratospheric warmings, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126, e2021JD035 071, 2021.

Salby, M. L. and Callaghan, P. F.: Influence of planetary wave activity on the stratospheric final warming and spring ozone, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112, 2007.

Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018 – Exective Sumary – WMO UNO environment, NOAA, NASA, European Comission.

Solomon, S. (2019). The discovery of the Antarctic ozone hole, Nature, Vol 575, 46-47.

Thieblemont, R., Ayarzaguena, B., Matthes, K., Bekki, S., Abalichin, J., and Langematz, U.: Drivers and surface signal of interannual variability of boreal stratospheric final warmings, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124, 5400–5417, 2019.

Veefkind, J.P., J.F. de Haan, E.J. Brinksma, M. Kroon and P.F. Levelt, Total Ozone from the Ozone

Monitoring Instrument (OMI) Using the DOAS technique, IEEE Trans. Geo. Rem. Sens., 2006, Vol. 44, No. 5, 1239-1244, doi:10.1109/TGRS.2006.871204.

Valks, P.J.M., J.F. de Haan, J.P. Veefkind, R.F. van Oss and D.S. Balis, TOGOMI: An improved total ozone retrieval algorithm for GOME, XX Quadrennial Ozone Symposium, 1/6/2004-8/6/2004, C.S. Zerefos (Ed), 2004, Athens, University of Athens, 129-130.

Van der A, R. J., Allaart, M. A. F., and Eskes, H. J., Extended and refined multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1970-2012, Atmos. Meas. Tech., 8, 3021-3035, 2015. doi: 10.5194/amt-8-3021-2015.

Van der A, R. J., Allaart, M. A. F., and Eskes, H. J.,Multi-Sensor Reanalysis (MSR) of total ozone, version 2. Dataset. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2015. doi: 10.21944/temis-ozone-msr2.

Vargin, P.; Kostrykin, S.; Koval, A.; Rozanov, E.; Egorova, T.; Smyshlyaev, S.; Tsvetkova, N. Cambios en la estratosfera del Ártico en el siglo 21 en el modelo del sistema de la Tierra SOCOLv4. Frente. Tierra Sci. 2023, 111214418.

Vargin, P.; Koval, A.; Guryanov, V.; Volodin, E.; Rozanov, E. Variations of Planetary Wave Activity in the Lower Stratosphere in February as a Predictor of Ozone Depletion in the Arctic in March. Atmosphere 2024, 15, 1237. https://doi.org/10.3390/atmos15101237.