



Servicio
Meteorológico
Nacional

INFORME FINAL - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO 2023

***Gerardo Carbajal Benítez¹, Héctor A. Ochoa^{2,3}, Eduardo Luccini^{4,5},
Facundo Orte⁶, Elian Wolfram^{1,6} y Héctor Estévez Pérez⁷.***

- 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. Instituto de Geofísica, UNAM, México.*

Enero, 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	9
2.3 Estabilidad del vórtice.	10
3. OBSERVACIONES DE OZONO	11
3.1 Observaciones Satelitales.	11
3.2 Estaciones en superficie.	12
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	12
3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO.	14
3.2.3 Estación Antártica San Martin	15
3.2.4 Estación Antártica Belgrano II	16
4. EL AGUJERO DE OZONO	19
4.1 El área del agujero de ozono.	19
5. CONCLUSIONES	22
6. AGRADECIMIENTOS	23
7. BIBLIOGRAFÍA	23

RESUMEN.

El presente informe, tiene por objetivo, establecer la evolución del Agujero de Ozono sobre la Antártida para el año 2023. La temperatura de la estratosfera mínima y zonal (50 – 90°S), la primera parte del año han oscilado alrededor de la media hasta el mes de agosto que presenta un enfriamiento muy cercano a los mínimos históricos, producido por los remanentes del Volcán Tunga en el 2022. En el mes de septiembre, esta situación cambia y se observa un incremento de la temperatura por un calentamiento súbito estratosférico no muy importante, debido a que se intensificó el movimiento de ondas atmosféricas que provocó un flujo de calor que viene desde la troposfera del trópico y se propaga a la estratosfera de latitudes altas y polares. Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) se forman durante inicios del invierno Antártico y superan la media del periodo 1979 a 2022, pero debido a la intensidad del flujo de calor (Calentamiento súbito estratosférico), estas van disminuyendo su área y volumen, por lo tanto, los procesos químicos no se llevan a cabo y no hay tanta destrucción de ozono, de tal manera que en el mes de octubre hay una reducción del agujero de ozono. Los distintos portales que monitorean el agujero de ozono con diversas plataformas satelitales concuerdan que el área máxima absoluta del agujero de ozono es de aproximadamente 26 millones de km², lo que lleva a ocupar el lugar 13 en el ranking de 44 años de monitoreo (1979 a 2023). Mientras que el área media del periodo del 7 de septiembre al 13 de octubre para éste año, lo coloca en el lugar 17 en el ranking del periodo de los 44 años de monitoreo.

Palabras Claves: Ozono, Estratosfera, Antártida, Destrucción, Química y Meteorología-

ABSTRACT.

The objective of this report is to establish the evolution of the Ozone Hole over Antarctica for the year 2023. The temperature of the minimum and zonal stratosphere (50 – 90°S), the first part of the year has oscillated around the average until August, which presents a cooling very close to historical minimums (produced by the remnants of the Tunga Volcano in 2022). In September, this situation changes and an increase in temperature is observed due to a sudden, not very important stratospheric warming, due to the intensified movement of atmospheric waves that caused a flow of heat that comes from the troposphere of the tropics and spreads to the stratosphere of high and polar latitudes. The Polar Stratospheric Clouds (PSN) form during the beginning of the Antarctic winter, and exceed the average for the period 1979 to 2022, but due to the intensity of the heat flow (Sudden Stratospheric Warming), they decrease in area and volume, therefore Both chemical processes are not carried out and there is not as much destruction of ozone, so that in October there is a reduction of the ozone hole. The different portals that monitor the ozone hole with various satellite platforms agree that the absolute maximum area of the ozone hole is approximately 26 million km², which places it in 13th place in the ranking of 44 years of monitoring (1979 to 2023). While the average area of the period from September 7 to October 13 for this year, places it in 17th place in the ranking of the period of the 44 years of monitoring.

Key Words: Ozone, Stratosphere, Antarctica, Destruction, 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 cambió la perspectiva de las ciencias de la atmósfera y arrojó 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 Clorofluorocarbonos (CFC's) los cuales provienen del uso de aerosoles y accesorios para refrigerar, así como la fabricación de espumas y para limpieza de componentes electrónicos. 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, si 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, cataratas en los ojos, etc., además de algunos otros daños en la ecología y en materiales, debido al aumento de la radiación ultravioleta. Por lo tanto, los encargados de la formulación de políticas internacionales concluyeron que se necesitaba una estrategia cautelosa de protección del ozono. 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 CFCs. El informe de Farman y sus colegas sobre la pérdida de un tercio de la capa de ozono en primavera 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 CFCs 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 CFCs 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 (Solomon, 2017).

1. INTRODUCCIÓN

Un efecto relacionado e inesperado, se reveló a principios de la década de 2000, cuando los estudios mostraron que el agujero de ozono antártico había afectado la circulación atmosférica en la superficie en el hemisferio sur, siendo notable el corrimiento de la corriente en chorro hacia el interior de la Antártida. Sin embargo, las observaciones y el modelado computacional confirman que la corriente en chorro troposférica es sensible a los cambios en los vientos estratosféricos y que el enfriamiento de la estratosfera polar está asociado con un desplazamiento hacia los polos de la corriente en chorro troposférica.

Para el final del siglo XX, se tiene la certeza de que, durante el verano, la corriente en chorro en la troposfera se ha desplazado 2° de latitud hacia la Antártida. Esto genera alteraciones en el transporte de calor y humedad en la atmósfera, produciendo 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. Después de varias simulaciones por modelos, que incluyen efectos antropogénicos como aerosoles, gases de efecto invernadero, cambios de ozono en distintas capas de la atmósfera y Sustancias Destructoras de Ozono (ODS) y factores naturales como erupciones volcánicas y ciclos solares. En primer lugar, los resultados muestran que, al menos durante los últimos 20 años, la recuperación del ozono ejerció una fuerza sobre la circulación troposférica como para superar el efecto opuesto de los aumentos de gases de efecto invernadero.

Esta es una contribución crucial al debate de larga data sobre el papel relativo de estos dos factores en las tendencias de circulación pasadas y futuras. A medida que los niveles de ozono continúen recuperándose, su tasa de cambio y la influencia asociada sobre el clima se debilitarán, aumentando el papel relativo de los aumentos de los gases de efecto invernadero, especialmente en escenarios de 'solo negocios, como hasta ahora' en los que no se hace nada para mitigar las consecuencias de los gases de efecto invernadero para el futuro. Por lo tanto, tales aumentos de emisiones podrían dominar los cambios futuros de la circulación troposférica y empujar la corriente en chorro hacia el polo. En segundo lugar, los hallazgos se suman a la evidencia de que los cambios estratosféricos pueden afectar el clima en la troposfera. Esto es importante porque, a pesar de décadas de investigación, el mecanismo exacto de estratosfera-troposfera es poco entendido. Por último, los resultados proporcionan una señal clara de que las acciones humanas pueden

afectar el clima de la Tierra: el Protocolo de Montreal ha detenido el cambio climático asociado con el agotamiento del ozono. Esta es una lección práctica sobre cómo debe reaccionar la comunidad internacional a los desafíos ambientales globales. Restringir las emisiones peligrosas y cambiar las prácticas comerciales es también la forma de combatir el calentamiento global causado por los gases de efecto invernadero (Karpechko, 2020).

El objetivo del presente Informe Final del Agujero de Ozono en la Antártida 2023, es monitorear 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 física del vórtice y el tamaño del Agujero de ozono. Finalmente, el impacto de la radiación ultravioleta en la Antártida y las conclusiones.

2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES.

2.1. Temperaturas.

Haciendo un análisis de la temperatura mínima en la estratosfera (50hPa) del Hemisferio Sur (HS), en la [Figura 1](#) encontramos que la temperatura en la estratosfera, durante los meses de enero a julio, la mayor parte ha sido una estratosfera fría. Este efecto es muy relacionado las emisiones remanentes de la erupción del volcán Tonga en año 2022. Este enfriamiento trae como consecuencia una formación y aparición temprana de las NEP (Santee et al. 2024).

Para el mes de agosto, las temperaturas caen y se enfría la estratosfera, consecuencia de poco flujo de calor desde el trópico (más adelante). Posteriormente, se presenta un calentamiento súbito estratosférico (SWW) que no es muy importante y este fenómeno se repite a finales del mes de octubre. En ambos casos no llega a ser superior a los 2°K.

Al final del año donde se alcanza una diferencia con la media de hasta 6 a 8°K. A inicios del mes de diciembre, los valores de temperatura alcanzan en algunos momentos los mínimos históricos.

En la [Figura 1](#) se muestra la temperatura zonal a dos niveles de altura, la estratosfera alta (10hPa) y la baja (50hPa). A los 50hPa es muy consistente con las temperaturas mínimas, con la mayor parte del año la estratosfera esta fría, salvo el evento súbito de calentamiento estratosférico en septiembre menor a 6°K. Posteriormente, otro calentamiento súbito en octubre que casi alcanza los 8°K. Estos eventos son más notorios e ilustrativos en este tipo de gráfico.

Al nivel de altura de los 10hPa (Estratosfera alta) se observa el mismo comportamiento, el calentamiento súbito estratosférico en el mes de septiembre que alcanza casi los 2°K. Mientras que el calentamiento en octubre rebasa los 2°K.

En todos los gráficos de la **Figura 1 y 2**, los meses de noviembre y diciembre, son caracterizados por un enfriamiento, que por algunos momentos, alcanza los mínimos históricos hasta 8°K.

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

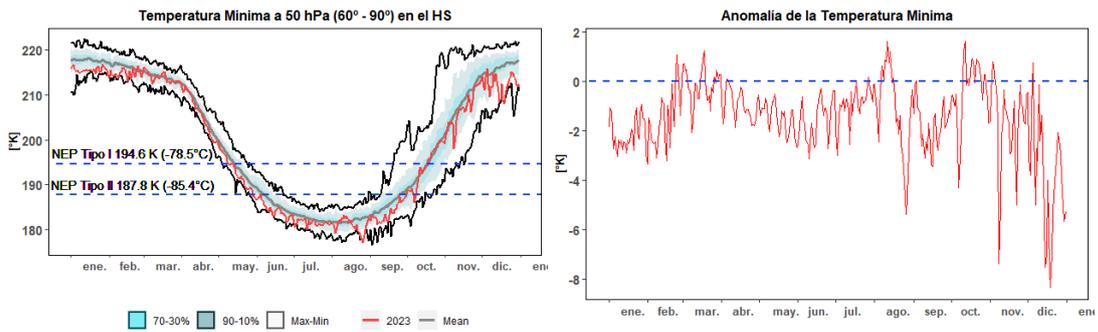


Figura 1. Izquierda: Temperatura mínima promedio a 50 hPa de altura y a una latitud entre 50° a 90° en el HS. La línea roja representa la evolución de la temperatura a lo largo del 2023, la línea gris es la temperatura promedio, los colores sombreados son los percentiles de 70 a 30% y 90 a 10%, mientras que las líneas externas negras, son las temperaturas máximas y mínimos, para el periodo 1979 al 2022. **Derecha:** Es la anomalía de las temperaturas a lo largo del año 2023 (Color rojo).

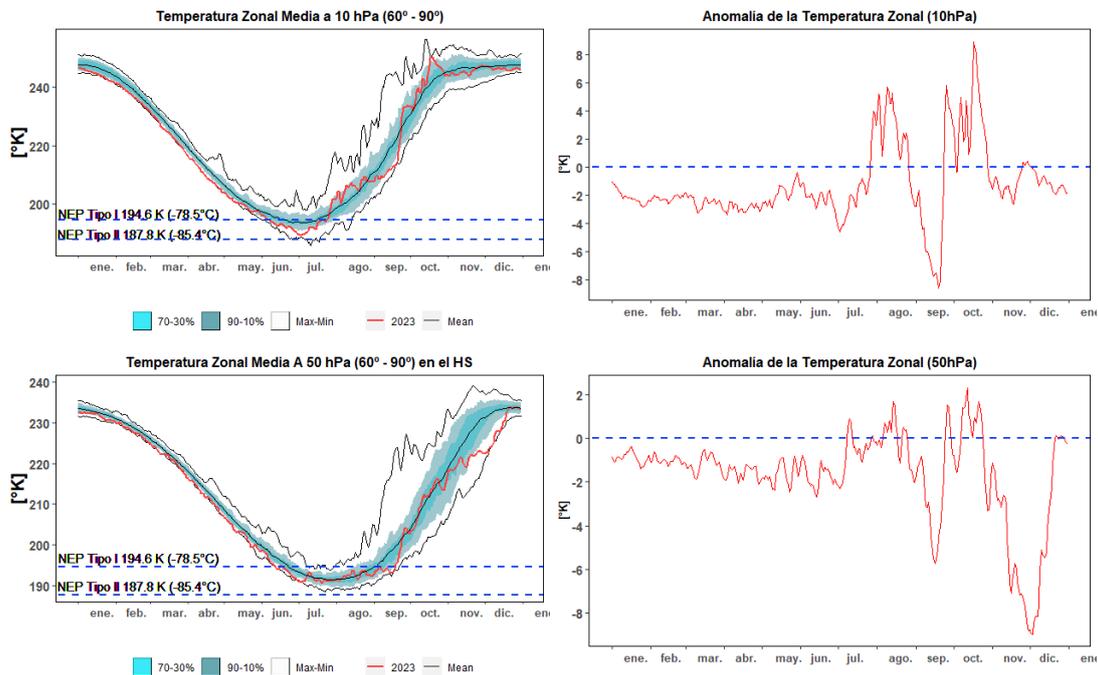


Figura 2. Arriba, (Izquierda y derecha): Temperatura zonal media a 10 hPa de altura y a una latitud entre 60° a 90° en el HS. Abajo (Izquierda y Derecha): Temperatura zonal media a 50 hPa de altura y a una latitud entre 60° a 90° en el HS. En ambas (derecha) la línea roja representa la evolución de la temperatura a lo largo del 2023, la línea gris es la temperatura promedio, los colores sombreados son los percentiles de 70 a 30% y 90 a 10%, mientras que las líneas externas negras, son las temperaturas máximas y mínimas, para el periodo 1979 al 2022. En ambas (Izquierda): Es la anomalía de las temperaturas a lo largo del año 2023 (Color rojo).

2.2 Área y Volumen de las NEP.

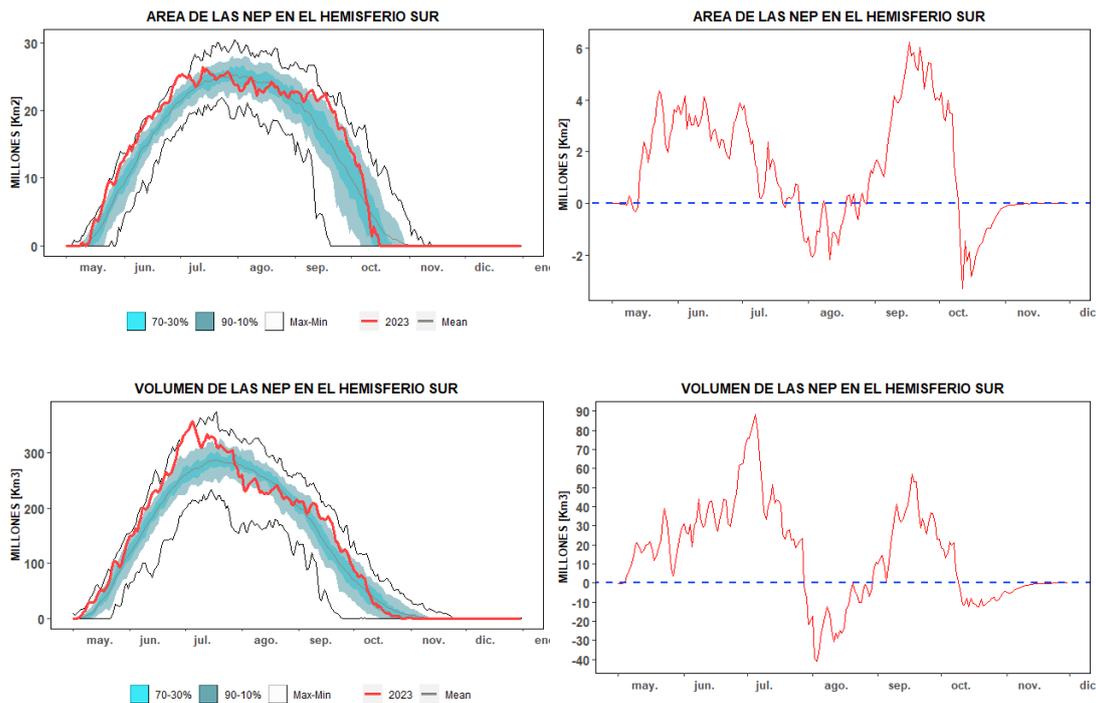
Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) se forman a través de las bajas temperaturas en la estratosfera; se considera Tipo I (ácido nítrico trihidratado) las que se forman a partir de una temperatura mínima inferior a 194,6 K (-78,5°C) a nivel isentrópico de 460 K y las Tipo II por debajo de los 187,7 K (-85,3°C). Los mecanismos de formación son a través de reacciones heterogéneas en la estratosfera.

En la *Figura 3* se puede observar que el área de las NEP para este año ha sido de 26,44 millones de km² alcanzado el día 13 de julio de este año, superando a la media para el mismo día de 24,07 millones de km², pero no supera al valor máximo para ese día de 27,43 millones de km², tampoco el valor máximo histórico de 30,47 millones de km².

En ambos casos, tanto en el área como en el volumen de las NEP se puede observar que son dos procesos que dominan la formación y destrucción. Como se vio en las temperaturas, la primera mitad del año es una estratosfera fría, consecuencia de las emisiones del volcán Tunga en año 2022 y esto hace que, entrado el invierno la formación de la NEP se mantienen muy cercanos a los valores máxima histórica del periodo 1979 a 2022. Posteriormente, conforme se acerca la primavera, el área y el volumen de las NEP decaen. En el mes

de septiembre, la destrucción de las NEP se acelera, debido al calentamiento súbito estratosférico que no es tan significativo y se observa mejor el decaimiento de las NEP en el gráfico de las áreas.

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



Figuras 3. Arriba e izquierda: Área de las nubes estratosféricas polares (NEP), sobre la región Antártica. La línea color roja representa la el año 2023. La línea gris representa la media del periodo 1979 a 2022. Las líneas externas negras, son los valores máximos y mínimos del mismo periodo. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. **Arriba y derecha:** La línea roja son las diferencias del año con respecto a la media.

2.3 ESTABILIDAD DEL VÓRTICE

El flujo de calor promediado longitudinalmente entre los 45°S y los 75°S es una indicador de hasta qué grado está perturbada la estratosfera. En la **Figura 4** se muestra el desarrollo del flujo de calor (Izquierda). Lea el subtítulo para mayores detalles de cómo interpretar el gráfico. A mediados de agosto se observa que la tendencia es a disminuir el flujo y más a una atmósfera en calma, después en septiembre, se observa que inicia un flujo de calor, consistente con el calentamiento súbito estratosférico, asociado aumento del movimiento de onda (Derecha)

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

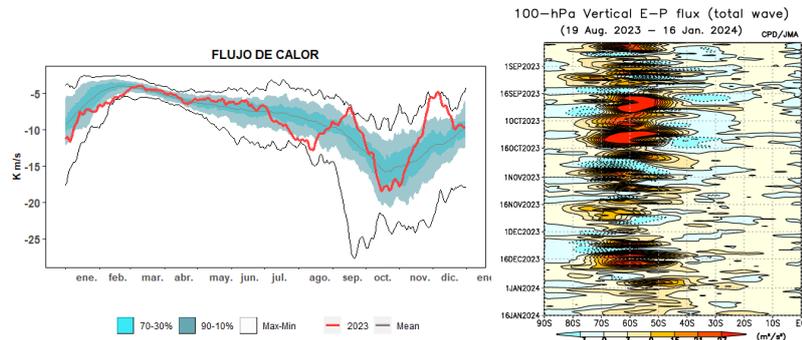


Figura 4. Serie de tiempo del flujo de calor. *Izquierda*, La curva roja muestra los datos para 2023. La línea azul corresponde al año 2022 y las líneas externas negras, son los valores máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2022. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo. Entre más negativo es el valor, es mayor el flujo de calor hacia la estratosfera Antártica. *Centro*, El flujo de la componente vertical Eliassen – Palm a 100hPa que denota la intensidad del movimiento de onda total, cuando mayor es el valor positivo, es mayor la actividad de onda.

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 5** se muestra la columna de ozono mínimo en Hemisferio Sur (HS) a la izquierda y el Ozono dentro de la capa polar a la derecha del año 2023, tal como han sido medidas por el TOMS, OMI y OMPS, en comparación con su media del periodo 1979 a 2022.

El grafico del mínimo de ozono (Izquierdo) muestra que la primera parte de año oscila alrededor de la media, pero con una notable pérdida. La segunda parte el año, hay mucha pérdida de ozono en el HS y muy poca recuperación.

El ozono, dentro de la capa polar (Derecha), durante todo el año se observan pérdida de ozono. Incluso, entrado el invierno en algunos momentos la destrucción supera el umbral de la mayor destrucción del periodo 1979 a 2022. Posteriormente, al acercarse la primavera, continúa la destrucción hasta que se da el calentamiento súbito estratosférico, se nota una recuperación, debido a que la NEP se diluye y no se llevan a cabo los procesos químicos heterogéneos de destrucción de ozono en su superficie.

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

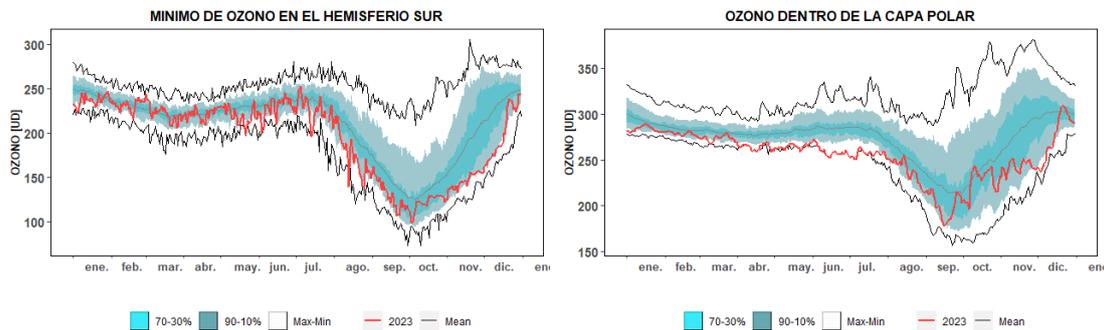


Figura 5. Izquierda, mínimo diario de la columna total de ozono en el hemisferio sur. **Derecha,** es la columna total de ozono dentro de la capa polar. En ambos casos, la línea roja muestra el año 2023, la línea gris representa la media del periodo 1979 a 2022. Las líneas externas negras, son los valores máximos y mínimos durante el mismo periodo. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% del mismo periodo.

3.2 Observaciones en superficie

Por ahora, solo se usan mediciones en superficie obtenidos mediante el Espectrofotómetro Dobson y ozonosondeos de la Estación GAW Ushuaia ($54^{\circ} 50' 54.46''S$, $68^{\circ} 18' 37.52'' O$) Y mediciones con Espectrofotómetro Dobson de la Estación Antártica Marambio ($61^{\circ} 14' 33.68'' S$, $56^{\circ} 37' 36.98'' O$), dependientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Ozonosondeos y mediciones del espectrofotómetro Brewer de la Estación Antártica Belgrano II ($77^{\circ}52'28''S$ $34^{\circ}37'37''O$), medidas con Espectrofotómetro Brewer de la Estación Antártica San Martín ($68^{\circ}07'48'' S$, $67^{\circ}06' 08'' O$), 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 6, se muestra la evolución diaria de la columna total de ozono y las medias mensuales para el año en curso, comparado con su media

histórica (1994-2022). Los datos diarios oscilan como todos los años, con gran amplitud y alrededor de la media, hasta el mes de septiembre, donde el agujero de ozono pasa por encima de la ciudad de Ushuaia en 5 ocasiones, posteriormente, los valores empiezan a subir durante todo el mes de octubre y parte de noviembre. Estos valores altos son los acumulados de ozono que se quedan al borde del vórtice polar.

En la *Figura 7* se muestra los perfiles de ozono y de humedad relativa (%HR), producidos por los ozonosondeos realizados el 19 de julio, 23 de agosto y 18 de septiembre, 1,9 y 18 de octubre, 8 de noviembre y finalmente 13 de diciembre. Se agrega la %HR para saber si hay un remanente de vapor de agua y su posible impacto en la pérdida de ozono. Se puede apreciar que los valores de %HR son muy bajos, tal como se encuentran en la estratosfera, de tal manera que no hay algún tipo de efecto en el ozono por este medio.

El perfil de ozono, muestra que solo tres ozonosondeos presentan reducción, eso se debe a que el agujero de ozono ha pasado sobre la ciudad de Ushuaia, tal como también lo muestra el espectrofotómetros Dobson. Dichos días son: 18 de agosto, 17, 21 y 22 de septiembre, 1 y 9 de Octubre.

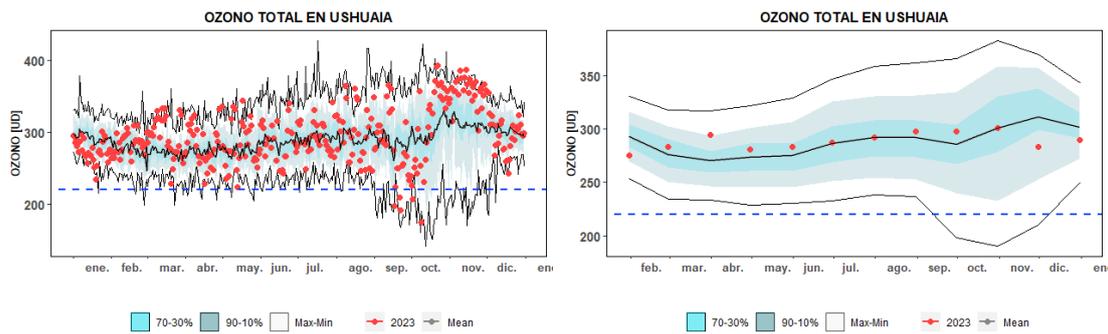
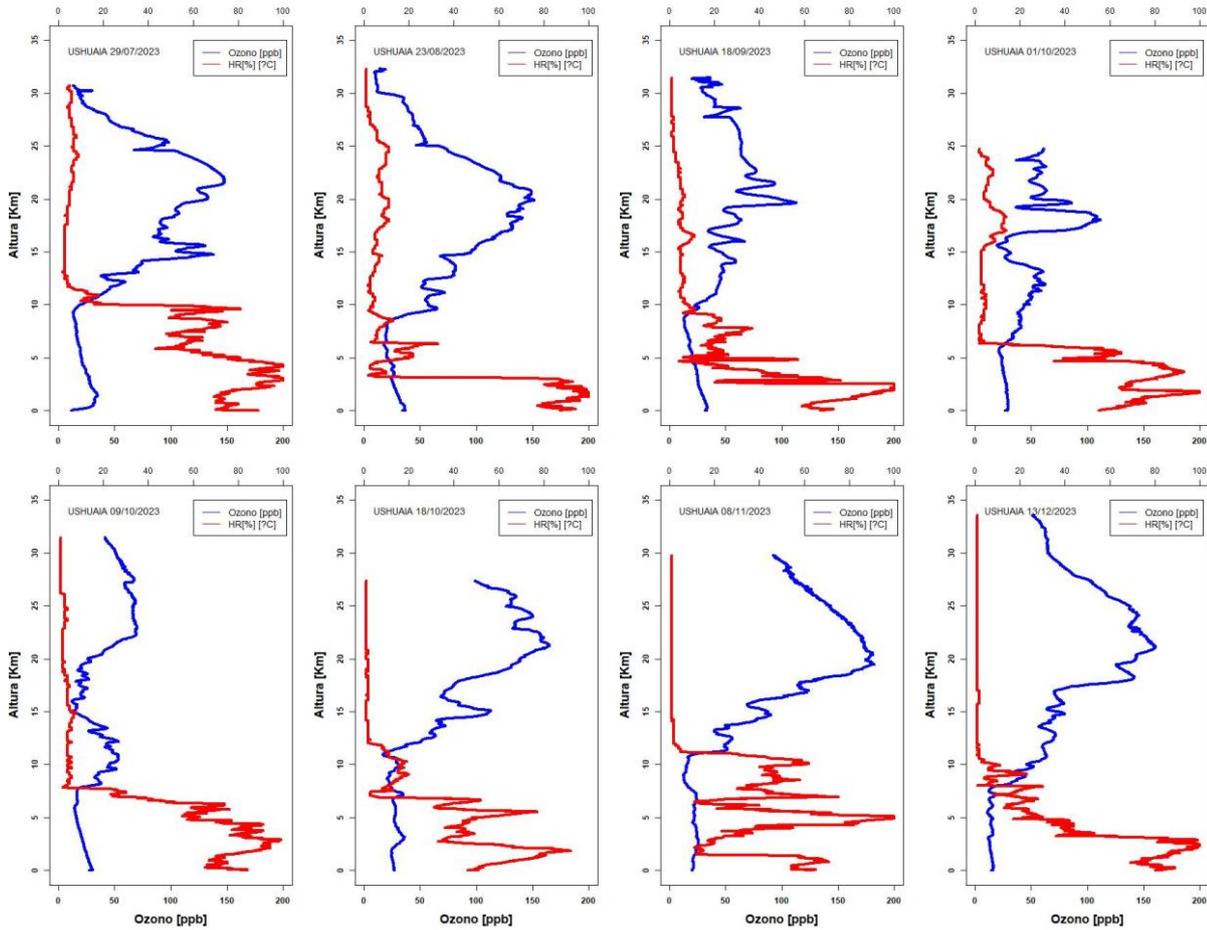


Figura 6. Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. En ambos gráficos los puntos rojos son los datos del año 2023. La línea negra central corresponde la media del periodo 1979 a 2023 y las líneas exteriores son los máximos y mínimos para el mismo periodo.



Figura

Figura 7. Ozonosondeos realizados en la Estación VAG de Ushuaia. En los dos gráficos, la línea morada es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmósfera. 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. A mediados del mes de agosto, reinician las mediciones diarias y se observa que en el gráfico diario de la *Figura 8*, que la primera parte del año, hasta el mes de abril, los valores del año oscilan alrededor de la media del periodo 1986 a 2022 y en tres casos se supera los valores máximos históricos en el mes de marzo. La segunda parte del año, cuando la noche polar termina, se retoman las mediciones y se observa 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, y éste deja de estar sobre la Estación Marambio y se observa valores altos, que incluso superan los valores máximos históricos. Finalmente. Con el enfriamiento estratosférico, los valores bajan, incluso a valores por debajo del umbral de los 220 UD.

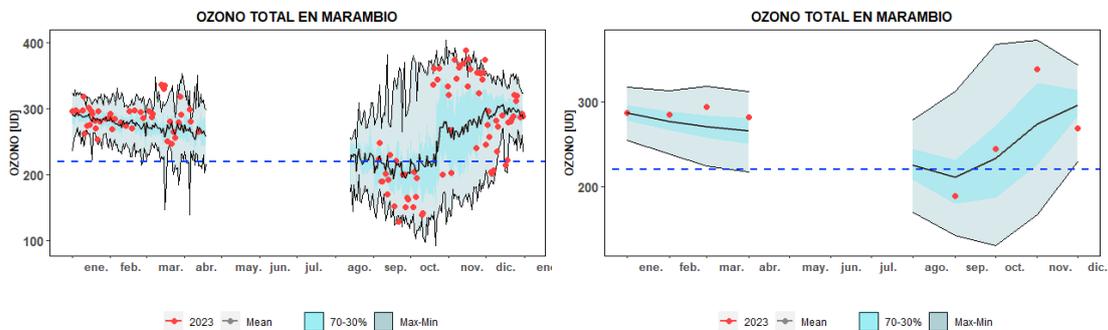


Figura 8. Medición de ozono total en la estación Antártica Marambio Derecha, valores diarios. Izquierda, Promedios mensuales.

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 es utilizado para medir el ozono total en la estación. Sus datos son 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. En marzo de 2023 fue replegado a Buenos Aires para participar de la intercomparación de Brewers de Sudamérica que se realizará desde el 23 de febrero hasta el 8 de marzo de 2024 en la Universidad Federal de Santa María en Brasil.

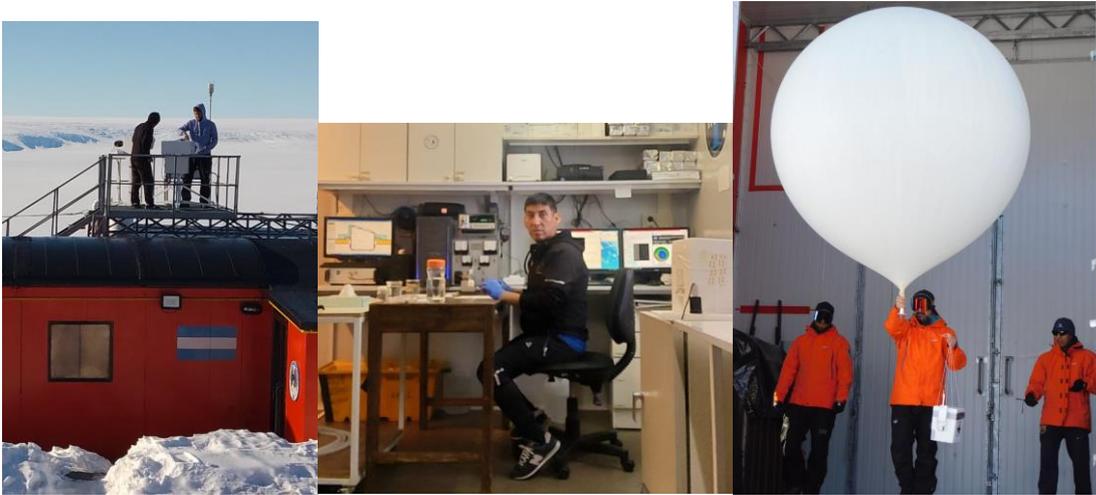
3.3.4 Estación Antártica Belgrano II.



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).

En la [Figura 9](#) se muestran los resultados del monitoreo a lo largo del año 2023. La primera parte del año, específicamente en enero y febrero, se observa valores más bajos que la media histórica del periodo 1992-2022, correspondiente a una estratosfera fría y muy acorde con la pérdida de ozono dentro de la capa polar ([Figura 3](#)). A inicios del mes de abril, las mediciones se detienen debido a la noche polar (invierno) para reiniciar en el mes de septiembre, donde los valores que se miden se encuentran por debajo del umbral de los 220 UD que indica que la estación ya está influenciada por el agujero de ozono. Después en el mes de noviembre, los valores de ozono se recuperan debido a que el agujero de ozono ya empieza a reducir su tamaño en plena primavera Antártica, es decir se produce más ozono del que se destruye. En algunos casos durante el mes de diciembre, hay valores por debajo del umbral 220 UD, asociados a una estratosfera muy fría para ese mes ([Figura 1 y 2](#)).

Los ozonosondeos que se hacen en esta base, son realizados 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 espectrómetros que utilizan la técnica Max DOAS y un LIDAR para la detección de las NEP.



Operación de Espectrofotómetro Brewer, preparación y lanzamiento de ozonsonda en Base Belgrano II por los Técnicos del IAA, Elías Finck, Martín Juan Noseda y Ronaldo Porco. (2023).

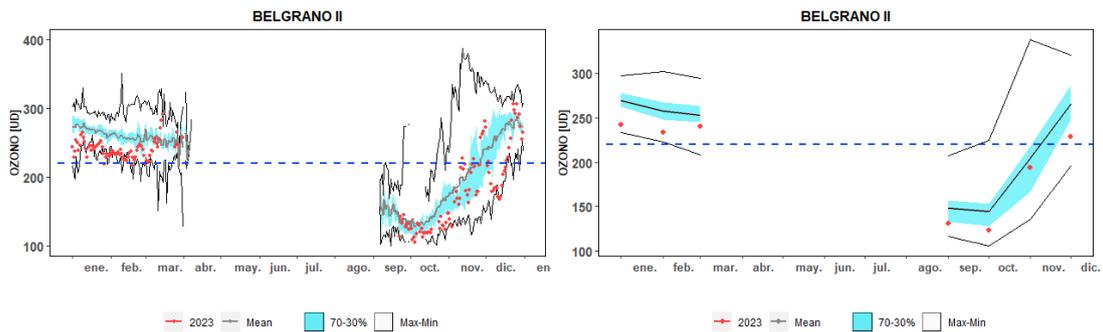
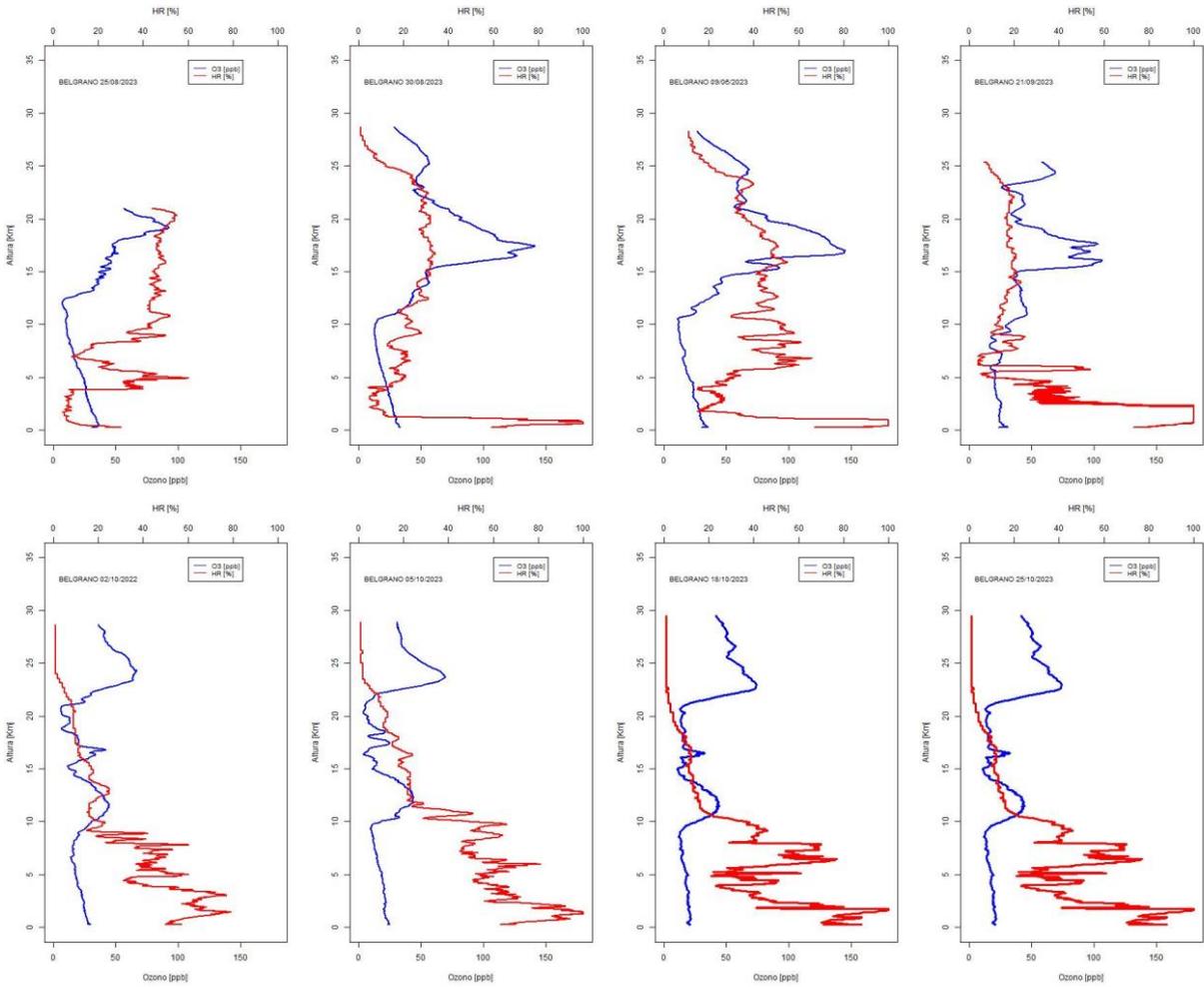


Figura 9. Medición de ozono total en la estación Antártica Belgrano II con el Espectrofotómetro Brewer. **Derecha,** valores diarios. **Izquierda,** Promedios mensuales.

En la **Figura 10** la evolución del agujero de ozono se muestra a través de los ozonsondeos, en estos se muestra el perfil de ozono y de la HR%. En los primeros cuatro (25, 30 de agosto y 9, 21 de septiembre) es notorio la cantidad de humedad que hay en la estratosfera (entre 15 y 30 km) en algunos casos de cercanos al 50%, mientras que cuando avanza el tiempo, la estratosfera se empieza a secar.



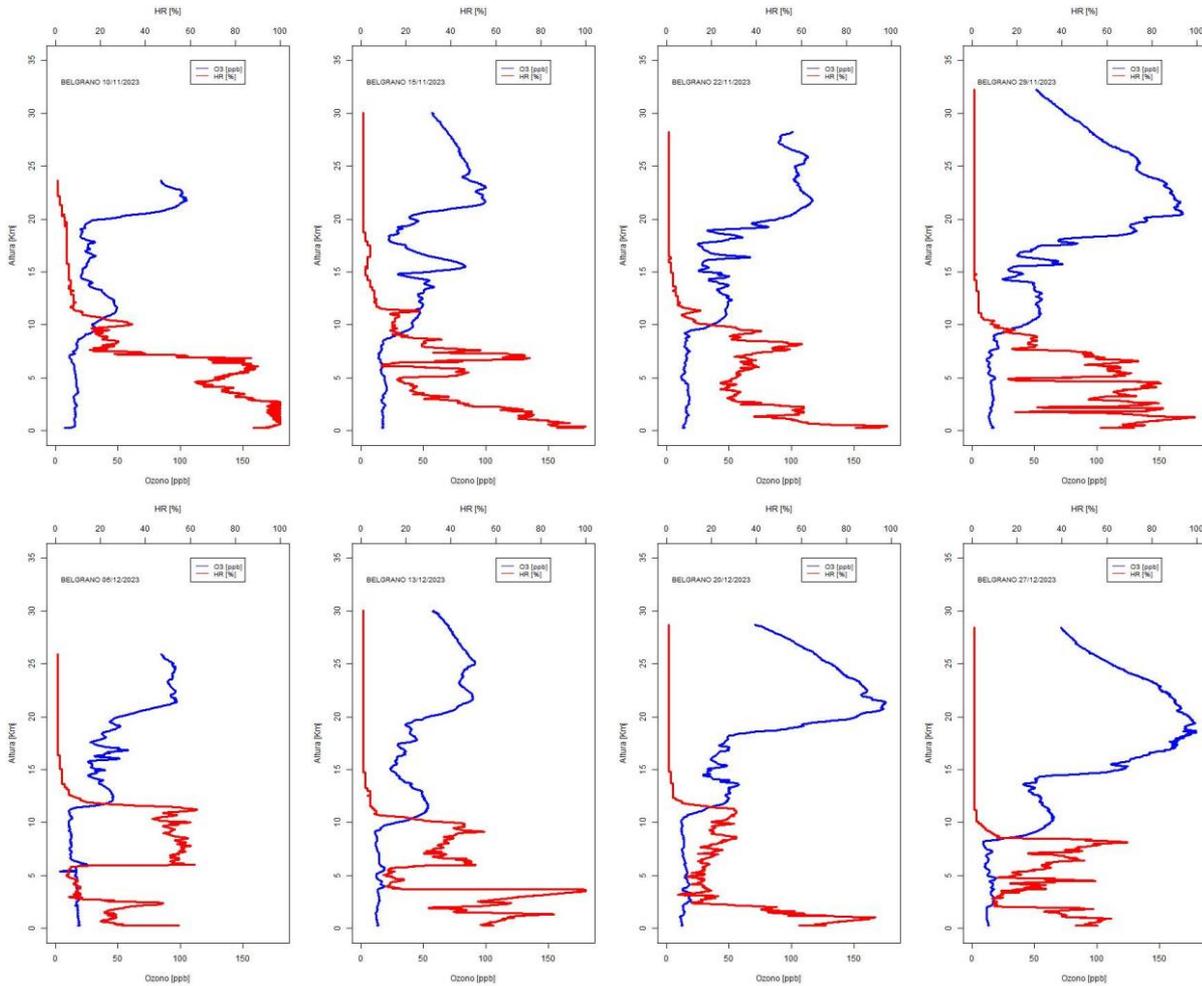


Figura 10. Ozonosondeos realizados en la Estación Antártica Belgrano II. En los dos gráficos, la línea azul es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmósfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].

4. El Agujero de ozono

4.1 El área del agujero de ozono

En la [Figura 11](#) 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, los cuales muestran que, cualitativamente su comportamiento es muy similar y cuantitativamente difieren muy poco entre ellos. El agujero de ozono mostrado por COPERNICUS tiene un máximo de 26,15 millones de km², en tanto que la NASA reporta un máximo de 25,96 millones de km². El portal TEMIS reporta aproximadamente 26,3 millones de km² y finalmente, la NOAA muestra un agujero de ozono que pasa los 26,0 millones de Km².

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

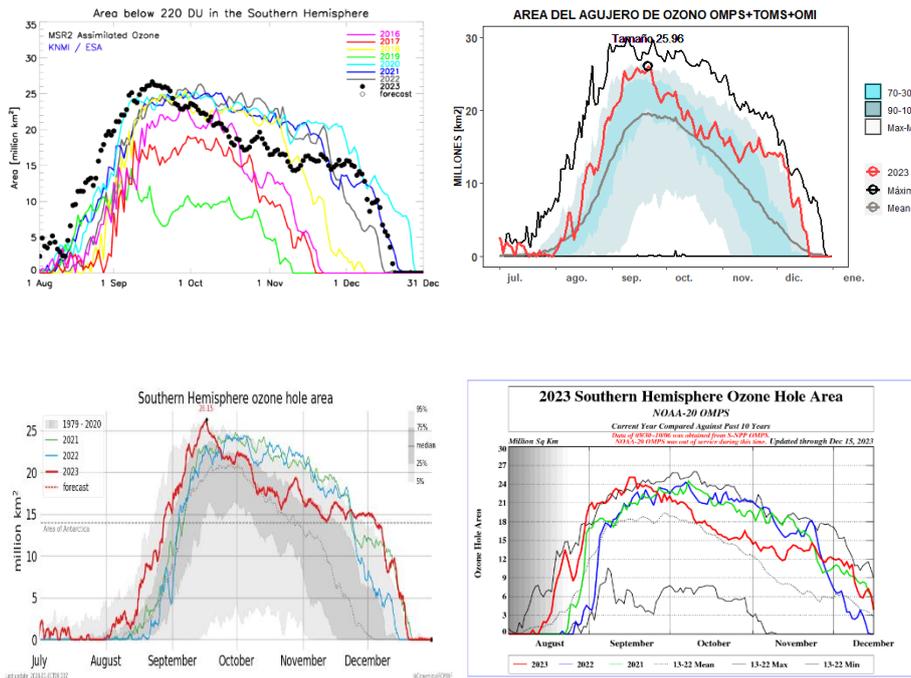


Figura 11. Área del Agujero de Ozono (millones de km²). Arriba a la Izquierda; son datos del TEMIS, Datos de la ESA (Agencia Espacial Europea). Arriba a la Derecha. Es el consenso de satélites de la NASA, EEUU (TOMS+OMI+OMPS). Abajo a la Izquierda, es el monitoreo del COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE (CAMS) del Centro Europeo ECMWF- Abajo a la Derecha, el gráfico de la NOAA, solo del equipo OMPS.

La **Figura 12**, muestra año tras año la evolución del agujero de ozono desde 1979 al 2023. Para el caso de los máximos absolutos (Izquierda) se observan:

- a) Una tendencia definida a aumento del tamaño del agujero de ozono desde 1979 hasta alrededor del 2000. Esta tendencia a aumentar ha sido de 1,217 millones de km² por año.
- b) Una tendencia hacia la recuperación del ozono y reducción del agujero de ozono para los años de 2006 al 2019 de 0,5031 millones km² por año.

- c) Los últimos 4 años han sido muy similares y no se observa una tendencia definida.
- d) El año 2023 se presenta el máximo absoluto el día 21 de septiembre con aproximadamente 26 millones de km^2 , ocupando el 13° lugar en el ranking de mayor a menor.

Para el caso de las medias del agujero de ozono (Derecha) se observa:

- a) Para el periodo de 1979 al 2006, la tendencia aumenta más lenta que los valores máximos absolutos, es decir 0,8844 millones de km^2 .
- b) Para el periodo de 2006 al 2019, se observaba una recuperación de ozono y reducción del agujero de ozono de 0,5967 millones de km^2 por año, muy similar a los máximos absolutos.
- c) Los últimos 4 años (2020 al 2023) han sido muy parecidos y con muy poca variación.
- d) Para el año 2023, el tamaño del agujero de ozono presenta una área media de 23,07 millones de km^2 , ocupando el lugar del ranking 17, de mayor a menor.

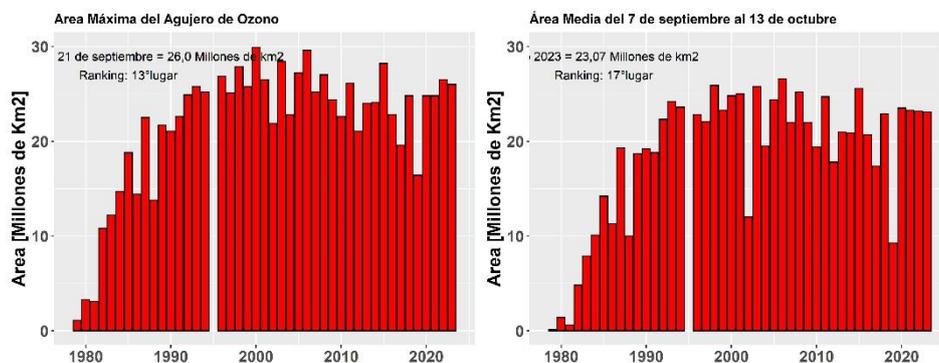


Figura 12. Evolución del Área del Agujero de Ozono (millones de km^2) desde 1979 a 2023. Izquierda; es el área máxima que se presentó en un día en específico. Derecha; representa el área media para el periodo del 7 de septiembre al 13 de octubre, que es donde se presenta el área máxima del agujero de ozono.

En la **Figura 13**, se observa de manera global, la distribución y crecimiento del agujero de ozono medio mensual para los meses de julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, para el año 2023. Estos mapas nos muestran que para el mes de septiembre, se tenía un agujero grande, acorde al poco flujo de calor, temperaturas bajas en la estratosfera y NEP creciendo más que su media histórica. Posterior al

calentamiento súbito estratosférico, en el mes de octubre dicho agujero de ozono se reduce, cuando este mes es el más crítico.

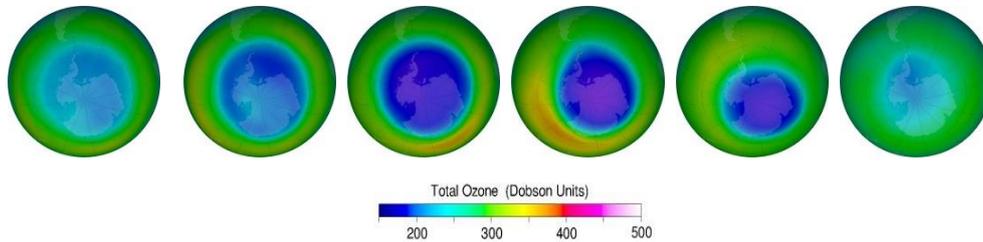


Figura 13. Proyecciones para los próximos 4 días a partir del día 26 de septiembre y muestran la evolución y crecimiento del agujero de ozono.

Animación de la evolución del agujero de ozono, sede 1 de Julio hasta a fecha: <https://atmosphere.copernicus.eu/antarctic-ozone-hole-starts-amid-questions-about-impact-hunga-tonga-eruption>.

5. CONCLUSION

Las condiciones meteorológicas de la estratosfera y el vórtice, ponen las condiciones físicas para su desarrollo, modulando su crecimiento, mientras que las condiciones químicas, a través de las NEP, inician con la destrucción del ozono total antártico. Un forzante más entro para impactar al agujero de ozono, que son emisiones remanentes del volcán Tunga del año 2022. Para este año 2023 se presenta un agujero de ozono muy similar a los tres anteriores, que se modula por 2 sucesos estratosféricos:

- a) La primera parte de la formación de ozono, julio, agosto y septiembre, hay un enfriamiento en la estratosfera (emisiones del volcán Tunga) potenciado por el bajo flujo de calor que se propaga desde la troposfera tropical hacia la estratosfera de latitudes altas y polares, de tal manera que las NEP venían creciendo por arriba de media histórica, consecuentemente el agujero de ozono venía creciendo muy por arriba de la media.
- b) La segunda parte se caracterizó por un calentamiento súbito estratosférico no muy importante como el del año 2019, pero sí para inhibir el crecimiento del agujero de ozono, durante todo el mes de octubre. Las NEP decaen y los procesos químicos de la destrucción de ozono no son tan grandes en un mes tan crítico como en octubre, es decir hay más formación de ozono.

Finalmente, el agujero de ozono se cierra según el monitoreo y las mediciones satelitales, el día 19 de diciembre, cuando la media histórica marca que el cierre es el 24 de diciembre.

6. 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, Asia).

Se agradece los datos de las ozonsondas 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; **Ing. Daniel Ríos, Sr. Gabriel Agustín Arias y Gustavo Copes.**

Se agradece a los observadores Antárticos de la base Belgrano II del Laboratorio LABEL; **Téc. Elías Finck, Téc. Martín Juan Nosedá y al Téc. Ronaldo Porco.**

7. BIBLIOGRAFÍA

- 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.
-
- Geir Braathen, "Boletín de Ozono Antártico", Editado por la WMO.
- Newman (NASA), E. Nash (SSAI), R. McPeters (NASA), S. Pawson (NASA) National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center - NASA Ozone Watch.
- 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.
- H. J. Eskes, R. J. van der A, E. J. Brinksma, J. P. Veefkind, J. F. de Haan, and P. J. M. Valks, Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat, Atmos. Chem. Phys. Discuss, 5, 4429-4475, 2005.
- 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.
- E. Botek, S. Chabrillat, Y. Christophe (BIRA-IASB) "Report on 2014 Antarctic ozone hole studies" MACC-III project (Monitoring Atmospheric Composition and Climate - III) 2014.
- Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018 – Executive Summary – WMO UNO environment, NOAA, NASA, European Commission.

- Manuel Gil Ojeda “El ozono estratosférico” Tethys, 3, 47–58, 2006. DOI:10.3369/tethys.2006.3.06.
- Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines e Informe Final del Agujero de Ozono 2018, 2020, 2021.
- Karpechko, A., Y. (2020). Jet stream stops shifting as ozone layer recovers, Nature, Vol 579, 544-501.
- Solomon, S. (2019). The discovery of the Antarctic ozone hole, Nature, Vol 575, 46-47.
- 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.
- Santee M.L, Manney G.L., Lambert A., Mill’an L. F., Livesey N. J., Pitts M. C., Froidevaux L., Read W. G., and Fuller R. A.. The Influence of Stratospheric Hydration from the Hunga Eruption on Chemical Processing in the 2023 Antarctic Vortex.