



INFORME FINAL - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO ANTÁRTICO 2022

Gerardo Carbajal Benítez¹, Héctor A. Ochoa^{2,3}, María Elena Barlasina¹, 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.

INDICE

ANTECEDENTES	4
1. Introducción.	5
2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES	6
2.1 Temperaturas.	7
2.2 Área y volumen del NEP	7
2.3 Estabilidad del vórtice.	8
3. OBSERVACIONES DE OZONO	10
3.1 Observaciones Satelitales.	10
3.2 Estaciones en superficie.	11
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	11
3.2.2 Estación Antártica Marambio.	12
3.2.3 Estación Antártica San Martín.	14
3.2.4 Estación Antártica Belgrano.	15
4. EL AGUJERO DE OZONO	17
5.1 El área del agujero de ozono.	27
5. CONCLUSIÓN	19
6. AGRADECIMIENTOS	20
7. BIBLIOGRAFÍA	20

RESUMEN.

El presente informe muestra la evolución del Agujero de Ozono sobre la Antártida para el año 2022. Para este año, el promedio del tamaño del agujero de ozono que comprende del 7 de septiembre al 13 de octubre fue de 23,5 millones de Km², el cual ocupa el 16° lugar (de Mayor a menor) de los 43 años (1979 a 2022). Mientras que el tamaño máximo absoluto se presenta el día 5 de octubre con 26,5 millones de km² ocupando el lugar 11° lugar de mayor a menor. Las condiciones de la dinámica y química de la atmosfera han sido muy similares a los años 2020 y 2021. Las temperaturas en la estratosfera han sido bajas, sobre todo en el invierno y la primavera, de tal manera que marcan una gran producción de Nubes Estratosféricas Polares (Reservorio de cloro), las cuales finalizan dicha producción a finales de octubre, quedando remanentes y continuando la destrucción de ozono hasta el 15 de diciembre que es el día que se cierra el agujero de ozono. Esta situación también es una consecuencia de un vórtice polar fortalecido y profundo, ya que es poco perturbado por el bajo transporte de calor desde la troposfera y baja actividad de ondas, lo que ayuda a dicho enfriamiento estratosférico. No se encuentra evidencia del impacto en la estratosfera Antártica y el agujero de ozono de la erupción del volcán Hunga Tunga-Hunga Ha'apai (15 de enero 2022) en la inyección de aerosoles y vapor de agua sobre la estratosfera a nivel global.

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

ABSTRACT.

This report shows the evolution of the ozone hole over Antarctica for the year 2022. For this year, the average size of the ozone hole from September 7 to October 13 was 23.5 million km², which occupies the 16th place (from highest to lowest) of the 43 years (1979 to 2022). While the absolute maximum size occurs on October 5 with 26.5 million km² occupying the 11th place from largest to smallest. The dynamic and chemical conditions of the atmosphere have been very similar to the years 2020 and 2021. The temperatures in the stratosphere have been low, especially in winter and spring, in such a way that they mark a great production of Stratospheric Clouds Polar (Chlorine Reservoir), which end their production at the end of October, leaving remnants and continuing the destruction of ozone until December 15, which is the day the ozone hole closes. This situation is also a consequence of a strengthened and deep polar vortex since it is little disturbed by low heat transport from the troposphere and low wave activity, which helps such stratospheric cooling. There is no evidence of the impact on the Antarctic stratosphere and the ozone hole of the eruption of the Hunga Tunga-Hunga Ha'apai volcano (January 15, 2022) in the injection of aerosols and water vapor over the stratosphere at a global level.

Key Words: Ozone, Stratosphere, Antarctic, 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 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 el 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's. 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 (Solomon, 2017).

1. INTRODUCCIÓN

La interacción entre el ozono y la dinámica a gran escala en la estratosfera de la Antártida es claramente diferente a la de la estratosfera del Ártico, debido a las diferencias en la superficie subyacente. La Antártida está rodeada de manera más uniforme por el océano, que no impide la circulación zonal de los vientos en la corriente en chorro polar, lo que resulta en la aparición anual del vórtice polar estratosférico invernal mucho más fuerte y más aislado. Esto evita que el aire más cálido y rico en ozono de latitudes medias, se mezcle con el aire polar considerablemente más frío, que ha experimentado una pérdida de ozono inducida por halógenos. Por el contrario, el Ártico está rodeado por tierra y agua. Las cadenas montañosas y la convección sobre mar abierto, que por definición debe estar a una temperatura superior al punto de congelación, desvían parte de la trayectoria del chorro del polo norte y generan ondulaciones. Estas ondulaciones, llamadas ondas de Rossby, debilitan la circulación polar, transportar aire más cálido de latitudes medias a la región del Ártico y disminuir la intensidad y la duración del vórtice polar del hemisferio norte.

Como resultado de las condiciones meteorológicas, que son muy contrastantes en los dos hemisferios, la columna total el ozono en el invierno-primavera del Ártico, es siempre mayor que el de la Antártida. Incluso cuando se han producido pérdidas químicas inusualmente grandes de ozono Ártico durante temporadas de invierno-primavera que fueron anormalmente frías (p. ej., 1997 y 2011).

En base a lo anteriormente mencionado, las condiciones meteorológicas de la estratósfera antártica durante el invierno austral (junio-agosto) sientan el escenario para la formación del agujero de ozono que ocurre año tras año en la Antártida. Las bajas temperaturas llevan a la formación de nubes en la estratósfera Polares (NEPs) que son reservas de sustancias destructoras del ozono estratosférico.

La cantidad de vapor de agua en la estratósfera es muy baja, solamente 5 de entre un millón de moléculas de aire son moléculas de agua, lo cual significa que bajo condiciones normales, no existen nubes en la estratósfera. Sin embargo, cuando la temperatura cae abruptamente por debajo de los -78°C (194.6°K), empiezan a formarse nubes en la estratosfera, que consisten en una mezcla de agua y ácido nítrico (HNO_3). Estas últimas son llamadas NEPs de tipo I, donde, en la superficie de partículas de la nube, tienen lugar reacciones químicas que transforman compuestos halógenos pasivos e inocuos (por ej. HCl y HBr) en las denominadas especies activas de cloro y bromo (por ej. ClO y BrO). Estas formas activas de cloro y bromo provocan una rápida pérdida de ozono al inicio de la primavera, con los primeros rayos del sol, a través de ciclos catalíticos, en los que una molécula de ClO puede destruir miles de moléculas de ozono antes de ser inhibidas, mediante la reacción con dióxido de nitrógeno. (NO_2).

Cuando las temperaturas disminuyen abruptamente por debajo de los -85°C (187.8°K), se formarán nubes que consisten en hielo de agua pura. Estas últimas son denominadas NEPs de tipo II. Las partículas en ambos tipos de nubes pueden crecer tanto que ya no flotan en el aire y precipitan fuera de la estratosfera. En este proceso traen consigo ácido nítrico (HNO_3). El ácido nítrico es considerado un reservorio que libera NO_2 bajo condiciones de iluminación solar. Si el NO_2 es removido físicamente de la estratosfera (proceso denominado desnitrificación), el cloro y bromo activos pueden destruir muchas más moléculas de ozono antes de ser inhibidos. La formación de nubes de hielo llevará a una pérdida más severa de ozono, que la que causa las NEPs de tipo I, puesto que las especies halógenas son mejor activadas, cuando se encuentran en las superficies de partículas de hielo de mayor tamaño.

El Vórtice polar es un sistema de baja presión, donde los fuertes vientos (Jet Polar) en la estratosfera circundan el continente antártico, dentro del Jet Polar, es caracterizado por temperaturas muy bajas y gran pérdida de ozono que supera a cualquier parte del mundo. A inicios del mes de agosto, la información sobre parámetros meteorológicos y mediciones de estaciones terrestres, ozonosondeos, información de satélites y otros componentes como modelos para pronóstico, pueden proporcionar una idea del desarrollo del vórtice polar y, por lo tanto, dan información acerca de cómo será la evolución del agujero de ozono durante la temporada. Las bajas temperaturas conducen a la formación de las llamadas nubes estratosféricas polares (NEPs).

Para mayor información sobre el agujero de ozono antártico y la pérdida de ozono en general, se solicita a los lectores que se contacten con la página web de ozono de la OMM:

<http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone/index.html>.

2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES.

Los datos meteorológicos utilizados en este informe provienen de la Oficina de Asimilación y Modelo Global de la NASA <http://macc.aeronomie.be/index.php> y del Centro Europeo para Pronósticos del Tiempo de Medio Alcance (ECMWF). Los reanálisis provenientes del GMAO, los así denominados datos MERRA, han sido bajados del sitio web de Vigilancia del Ozono de la NASA (<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>). Los datos del ECMWF han sido extraídos y bajados del Instituto Noruego para Investigación del Aire (NILU) que ponen estos datos a disposición a través de un proyecto financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA).

Para el análisis de la composición química de la estratosfera Antártica, se usan los datos BASCOE, dentro del sistema Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) que es el predecesor del MAC. El sistema de asimilación BASCOE fue hecho para hacer análisis en tiempo real y predicciones a cierta cantidad de días. (http://macc.aeronomie.be/4_NRT_products/5_Browse_plots/1_Snapshot_maps/index.php?src=BASCOE&spc=o3&l=at-050hPa.)

Los datos para el análisis de los calentamientos repentinos en la estratosfera, se usan imágenes del Centro Regional del Clima (RII WMO, Asia), con sede en TOKIO. <http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/STRAT/>

Para los datos de la Columna Total de ozono en superficie, se usa el Espectrofotómetro Dobson de la estación GAW-Ushuaia, dependiente del Servicio Meteorológico Nacional. Los datos de la Columna Total de Ozono en superficie de la Estación Antártica San Martín, son gentilmente proporcionados por el instituto Antártico Argentino (IAA) dependencia de la Dirección Antártica Argentina (DNA). Finalmente los perfiles de ozono se obtienen de los ozonosondeos realizados

en la Estación GAW-Ushuaia y de la estación Antártica Marambio, esta última en convenio con el Instituto Meteorológico Finlandés (IMF).

2.1 Temperaturas.

En términos generales, durante el año 2022, las temperaturas estratosféricas sobre la Antártida estuvieron por debajo de la media. Es decir, en la mayor parte del año, la estratosfera ha sido fría, inclusive muy parecidas al año 2021. El 15 de enero se presentó la erupción del volcán Hunga Tonga, el cual inyectó a la estratosfera aerosoles y vapor de agua, los cuales provocan un enfriamiento en la estratosfera que alcanza la Antártida, pero con la formación del vórtice polar -a través de los ozonosondeos- no se encuentra vapor de agua (Ver en la parte de observaciones).

En la **Figura 1**, se observa que desde el mes de febrero hay una reducción de la temperatura mínima que muestra un enfriamiento que es asociado a la erupción del volcán Hunga Tonga, pero la curva empieza a oscilar antes de la formación del vórtice polar. Durante inicios de la primavera, las curvas de temperatura permanecen por debajo de la media y muy cercanas a la del año 2021. Posteriormente, a mediados de septiembre, la estratosfera se mantiene más fría que de lo normal, favoreciendo la permanencia y formación de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP)

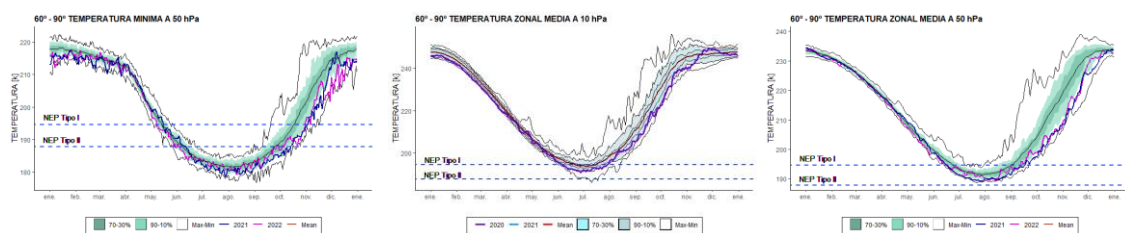


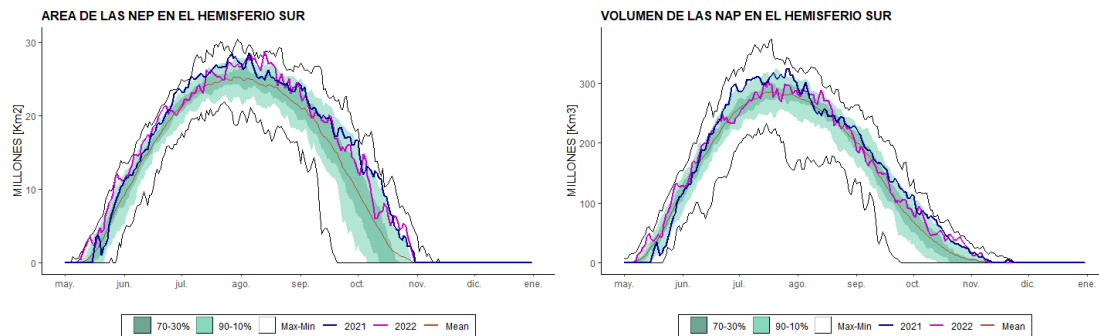
Figura 1. Izquierda, Temperatura mínima promedio a 50hPa, sobre la región de 50° a 90° S. Centro, Temperatura zonal media a 10hPa, sobre la región de 60° a 90°S. Izquierda, Temperatura zonal media a 10hPa, sobre la región de 60° a 90° S. En todos los casos: La línea color azul representa la evolución de la temperatura mínima para el año 2021, La línea rosa, representa el año 2022. La media para el periodo 1979-2020, está representada por la línea negra intermedia. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979–2018. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Las líneas rectas punteada de color azul, representan las nubes NEP tipo I (arriba) y NEP tipo II (abajo).

2.2 Área y Volumen de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP).

Con la aparición de las NEP a mediados de mayo durante el inicio del invierno y en plena formación del vórtice en la Antártida, se inicia el preámbulo para el agujero de ozono. Las Temperatura mínima necesaria para la formación de **NEP tipo I** son 194.6 K (-78.5°C) y las **NEP tipo II** se forman a partir de los 187.8 K (-85.4°C).

El área y volumen de las NEP (**Figura 2**) se incrementa a partir de la primera parte del mes de mayo, y oscila alrededor de la media para el periodo 1979 a 2021. El 27 de julio, las NEP alcanzan su extensión máxima con 28.4 millones de km².

Mientras que, el 19 de julio su volumen alcanza su valor máximo con 317.6 millones de Km³. Luego, los valores permanecen muy cercanos a la media (1979 - 2021). Posteriormente disminuyen hasta alcanzar el volumen cero, a partir del día 23 de noviembre.



Figuras 2. Serie de tiempo del Área (Izquierda) y volumen (Derecha) de las nubes estratosféricas polares (NEP) sobre la región Antártica, donde la temperatura están suficientemente bajas para la formación de ácido nítrico trihidratado (NEP tipo I) en el nivel isentrópico de 460 K. La línea color rosa representa la evolución del tamaño y volumen de la NEP para el año 2022, la línea azul representa el mismo parámetro para el año 2021, la línea roja representa la media para el periodo 1979-2021. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos históricos durante el periodo 1979 – 2021. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.

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 estratósfera. En la **Figura 3** se muestra el desarrollo del flujo de calor. Lea el subtítulo para mayores detalles de cómo interpretar el gráfico.

Durante los primeros meses del año, hasta principios de mayo, el valor medio de 45 días del flujo de calor en 100 hPa (Curva 2021) ha sido menor a la media del periodo 1997-2021, lo que supone gran movimiento del flujo de calor. Después, dicha curva tiende a disminuir la intensidad, incluso llega a valores máximos históricos hasta inicios del mes de agosto, es decir, el flujo disminuye considerablemente. Al no haber flujo de calor hacia la estratosfera, ésta tiende a enfriarse, tal como se mostró en el apartado de temperaturas.

La **Figura 4** se muestra los mapas de vorticidad potencial (PV) en el nivel isentrópico de 475 K (~19 km de altura) para tres días para los años 2020, 2021 y 2022, Estos años presentan sus área máxima 45,79, 60,76, y 51,84 millones de km², respectivamente.

En la **Figura 5** se muestra la componente vertical del flujo E-P, donde se observa que en este año hay poca intensidad de ondas, lo cual perturba muy poco el vórtice polar y al agujero de ozono.

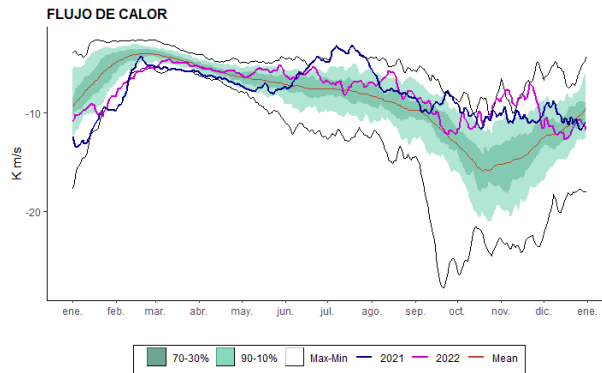


Figura 3. Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva azul muestra los datos para el año 2021, la línea morada representa al año 2020. Note que entre más negativo es el número, significa un alto flujo de calor. Los valores cercanos a cero significan un flujo de calor muy pequeño y calmo. La línea roja representa la media para el periodo 1979-2020. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2020. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.

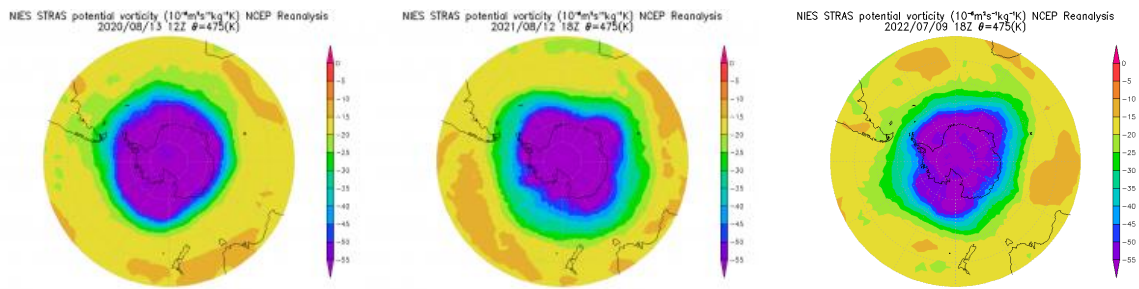


Figura 4. Mapas de vorticidad potencial (PV) a una altura isentrópica de 475 K, para el año 2020 (Izquierda), 2021 (Centro) y 2022 (Derecha). Los valores negativos más cercanos a cero, indican un vórtice débil (tono de color más claro).

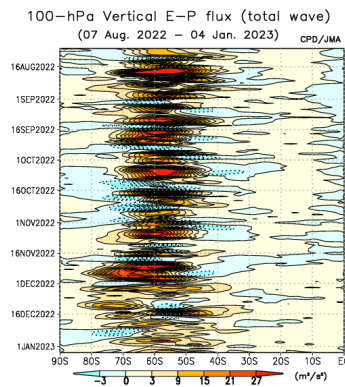


Figura 5. Evolución del flujo E-P a lo a lo largo de agosto a diciembre del presente año.

3. OBSERVACIONES DE OZONO

3.1 Observaciones Satelitales

Con el retorno del sol al inicio de la primavera austral en la Antártida, tanto los datos satelitales, los datos de superficie y sondeos con globos, muestran que el agujero de ozono, inicia una formación temprana del agujero de ozono y en esas fechas se encuentra en etapa de crecimiento y fortalecimiento. Lentamente se empiezan a mostrar en algunas de las observaciones.

La **Figura 6** muestra las columnas de ozono mínimas en el Hemisferio sur, medido por el instrumento GOME-2 a bordo del MetOp, además el reanálisis MSR2 de asimilación de datos de ozono, proporcionados por KNMI/ESA, finalmente la destrucción de ozono en la capa polar (TOMS, OMI, OMPS). Donde se aprecia que a partir de los primeros días de agosto (Inicio de la primavera), empieza la destrucción de ozono superando la media histórica del periodo 1979 al 2021 y se intensifica durante el mes de septiembre, siendo muy similar al del año 2021, inclusive en algunos casos la destrucción se acerca a los mínimos históricos. Esta gran destrucción, continúa hasta fin de año. Esta gran destrucción de ozono nos permite establecer que el agujero de ozono ha sido de gran profundidad. Éste hecho, muy probablemente es debido a una estratosfera muy fría y la persistencia de las NEP.

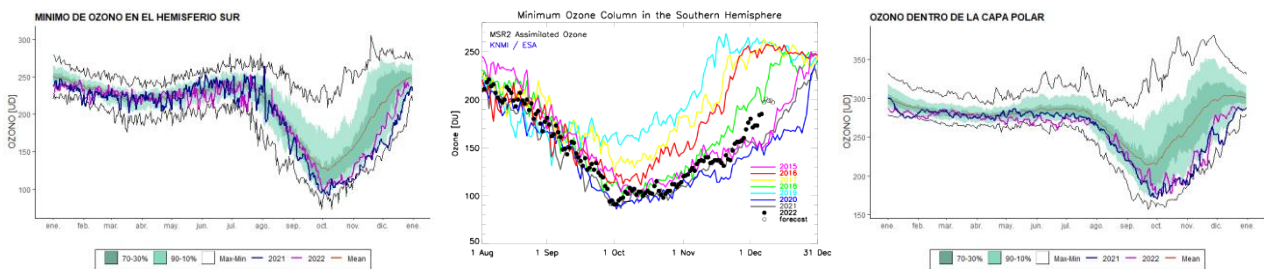


Figura 6. Izquierda, mínimo diario de la columna total de ozono en el Hemisferio Sur observado por GOME-2. Derecha, mínimo diario de la columna total de ozono en el Hemisferio Sur por el reanálisis MSR2. La línea azul muestra las observaciones de GOME-2 para el año 2021, la línea rosa representa al año 2022, la línea negra intermedia es la media del periodo 1979 a 2020. Las líneas negras son máximos y mínimos, mientras que las áreas sombreadas representan los percentiles de 10 a 90% y 30 a 70%, del mismo periodo que la media. La figura (der.) está adaptada desde un gráfico provisto por el Instituto Holandés de Meteorología (KNMI).

La **Figura 7** muestra los mapas de las columnas de ozono total de las observaciones del satélite OMI para las medias mensuales para agosto a diciembre del año 2022. Donde se aprecia su evolución, desde el inicio de la primavera hasta finales del mismo e inicio del verano.

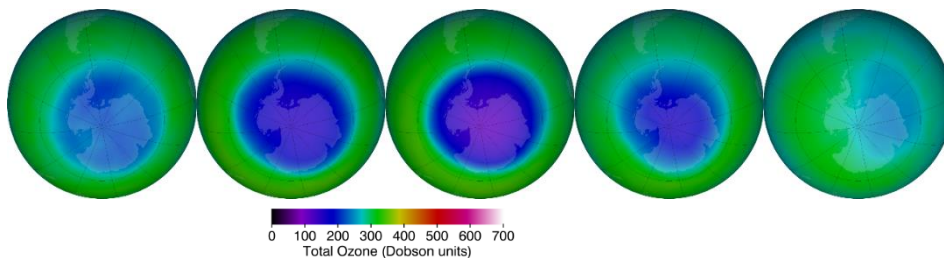


Figura 7. Mapas de columna total de ozono de agosto a diciembre del OMI para 2022,...

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 ($54^{\circ} 50' 54.46'' S$, $68^{\circ} 18' 37.52'' O$) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Además de la Estación Antártica San Martín ($67^{\circ} 07' 48'' S$, $67^{\circ} 06' 08'' O$), dependencia de la Dirección Nacional Antártica/Instituto Antártico Argentina (DNA/IAA).

3.2.1 Estación VAG-USHUAIA.



La Estación de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de Ushuaia forma parte de la red de medición de parámetros físicos y químicos de la atmósfera de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). La estación VAG de Ushuaia se localiza al borde del Vórtice Polar, de tal manera que en temporada de agujero de ozono, éste puede pasar por arriba de la ciudad de Ushuaia e incluso adentrarse hacia el norte de la Provincia de Tierra del Fuego.

El espectrofotómetro Dobson (*#D131*) mide todos los días y en la [Figura 8](#), se muestra la evolución de la columna total de ozono para el año en curso, comparado con su media histórica (1994-2021). Algunos días faltantes debido a las condiciones meteorológicas adversas que impiden la operación del instrumento. Se muestra los datos de la columna total de ozono, con gran variabilidad durante la primavera, debido a que, en las orillas del vórtice polar, se acumula ozono que proviene de las latitudes tropicales y éste impide que penetre en la Antártida, posteriormente dicho vórtice es perturbado por el impacto de las ondas atmosféricas haciendo que se mueva y al agujero de ozono pase por el sur de la Patagonia, específicamente por encima de la ciudad de Ushuaia, lo que produce un aumento en el índice de radiación ultravioleta.

Cuatro son los días que, el agujero de ozono pasan por la ciudad de Ushuaia: 21 y 28 de agosto, 12 de octubre y 29 de noviembre. Esta situación se puede apreciar en las mediciones del espectrofotómetros Dobson los cuatro días, mientras que, los ozonosondeos solo se registran en los dos últimos días ([Figura 9](#)).

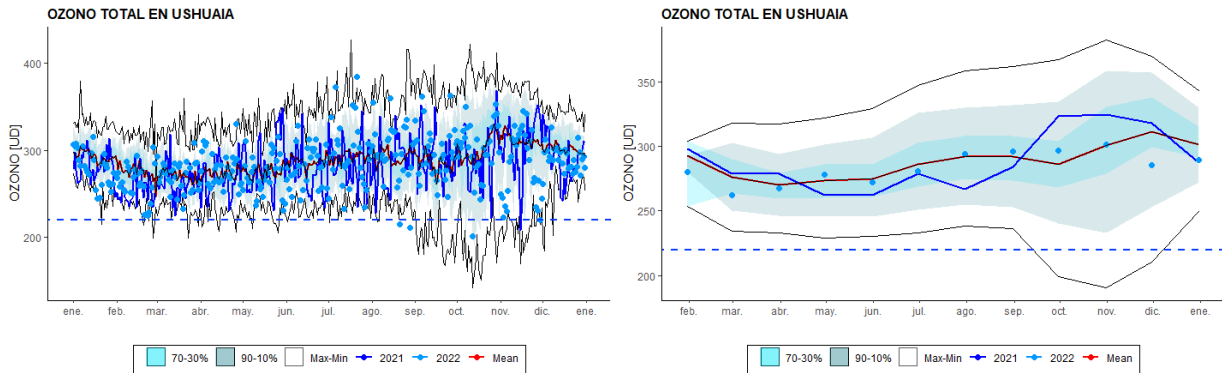
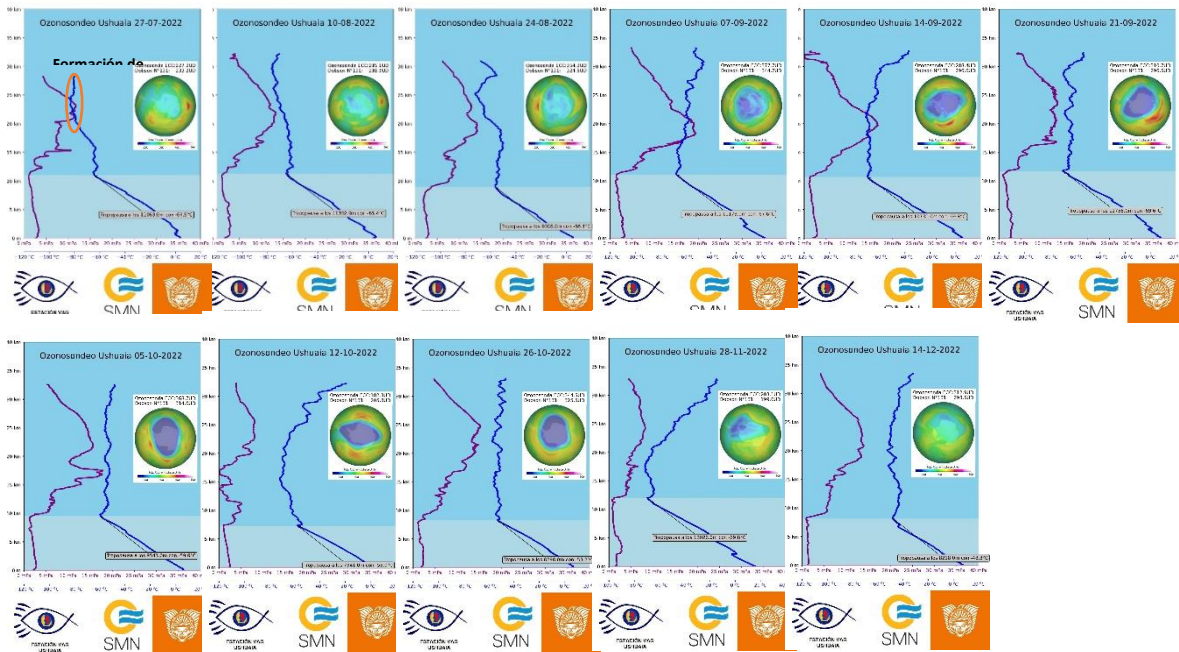


Figura 8. Datos de la columna de Ozono Total (COT) en Unidades Dobson [UD] medidos con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. Los puntos azules representa la COT para el año 2021. La línea morada representa la COT para el año 2020. La línea roja es la media para el periodo 1994-2020.



Figura

9. Perfiles de ozono en la Estación VAG Ushuaia durante el 2022..

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 ozono total se mide con espectrofotómetro Dobson, pero sus datos aún no están disponibles.

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. A mediados del mes de agosto, reinician las mediciones diarias y se observa que en el gráfico diario de la **Figura 10**, que algunos de los valores de las medidas, después de la noche polar, se encuentran por encima de la media del periodo 1987 - 2021, algunos valores se acercan a máximos históricos. Posteriormente al 2 de noviembre hay valores por debajo del umbral de los 220 UD que indican que el agujero de ozono está presente y pasan por la estación en la Península Antártica.

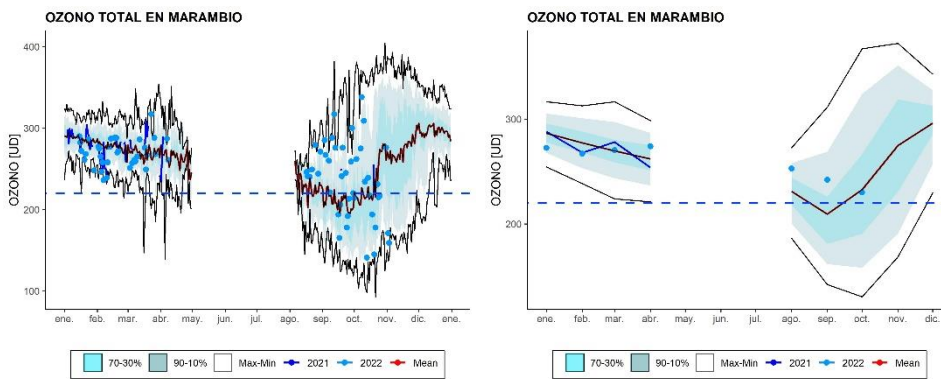


Figura 10. Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. En ambos gráficos los puntos azules son los datos del año 2022. La línea azul es del año 2021 y la línea negra es la media del período 1994 a 2021.

3.2.3 Estación Antártica SAN MARTÍN.



La estación Antártica San Martín se encuentra en la península Antártica San Martín ($68^{\circ}07'48''$ S, $67^{\circ}06' 8''$ 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 comenzó a medir normalmente a partir del día 7 de octubre, fecha en la cual ya está formado el agujero de ozono.



El espectrofotómetro Brewer de Base San Martín esta siendo operado y mantenido por el personal técnico del IAA Ing. Rodrigo Azpilcueta y el Ing. Alvaro Martín Errasquin (2021).

En la **Figura 11** se muestran los valores diarios (Izquierda) y medios mensuales (Derecha) durante todo el año. El hueco que se observa entre mayo a septiembre, es debido a la noche polar que no se mide, porque las características

meteorológicas son adversas. Los primeros meses, los valores diarios oscilan alrededor de la media y también se aprecia una alta variabilidad, no se puede hacer afirmaciones porque el programa de medición inicia en el año 2016 y son muy pocos valores, pero no se observan eventos significativos. Durante la temporada de agujero de ozono, es decir en primavera, se observan valores por debajo de la media del periodo 2016 – 2021. Además, los valores son muy cercanos a los mínimos históricos (periodo 2016-2021) sobre todo en el mes de noviembre que se encuentran algunos valores que están por debajo de dichos mínimos. Esto nos indica la profundidad en la que se encuentra el agujero de ozono. Esta situación también se observa en las medias mensuales incluso en noviembre está por debajo del histórico de dicho periodo.

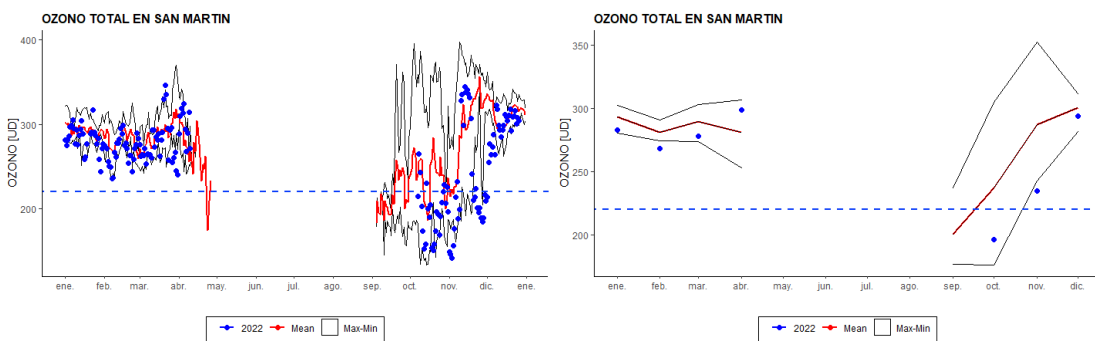


Figura 11. Datos de la columna de Ozono Total (COT) en Unidades Dobson [UD] medidos con el Espectrofotómetro Brewer en la estación Antártica san Martín. Los puntos azules representan la COT para el año 2021. La línea morada representa la COT para el año 2020. La línea roja es la media para el periodo 2016-2020.

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 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.

En la **Figura 12** se muestra los valores de la columna total de ozono diarios y el promedio mensual, donde se detecta la profundidad del agujero de ozono en ambos gráficos e inclusive, los diarios alcanzan los mínimos históricos del periodo (1992 a 2021)

En **la Figura 13** se muestra los ozonosondeos, el perfil para ozono (Izquierda) y el perfil de temperatura, donde se observa (Derecha). El agujero de ozono entre los 14 y 20 km de altura muestra la destrucción de ozono y su evolución, así como el cierre tardío. El primer perdió es obtenido el día 21 de septiembre, donde ya muestra la destrucción de ozono por encima de la base, indicativo de que el agujero de ozono está presente. A partir del 17 de noviembre se observa una recuperación y ya el día 14 de diciembre se observa una recuperación de la capa de ozono.

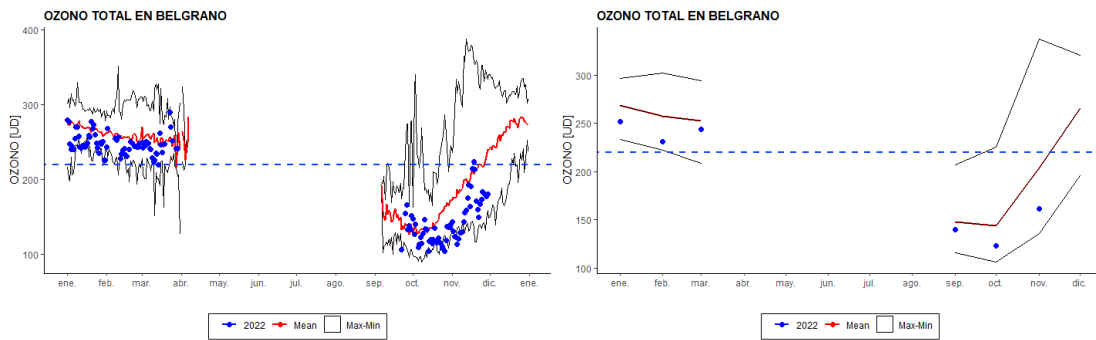
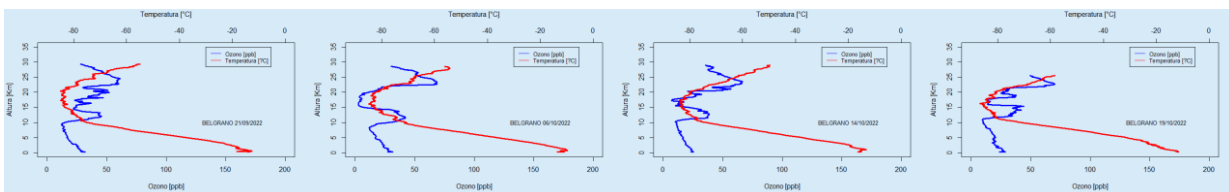


Figura 12. Columna total de ozono para la Estación Antártica Belgrano II. Izquierda, datos diarios. Derecha, datos medias mensuales



En la imagen podemos ver los registros del espectrofotómetro Brewer #099 (año 2021) vs registro satelital de OMI y algunas valores de las ozonosondas lanzadas durante el presente año.



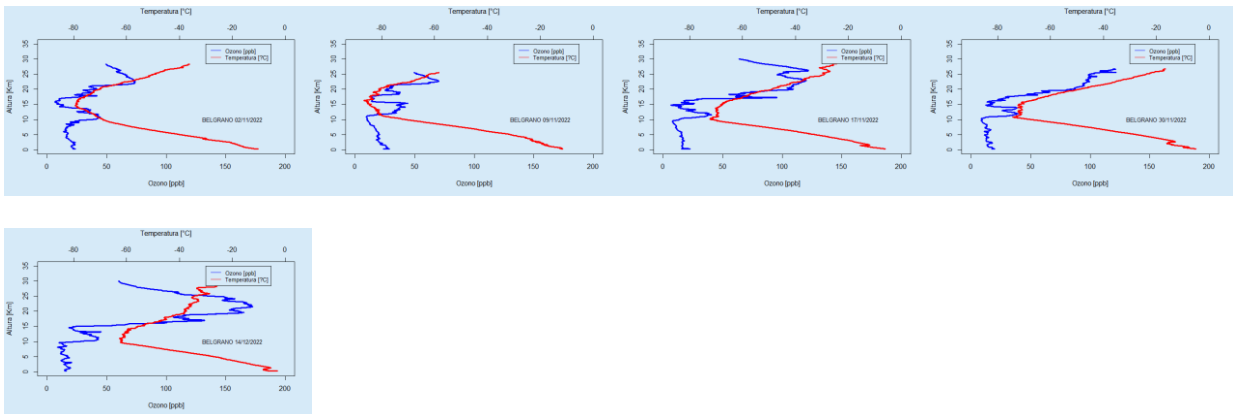
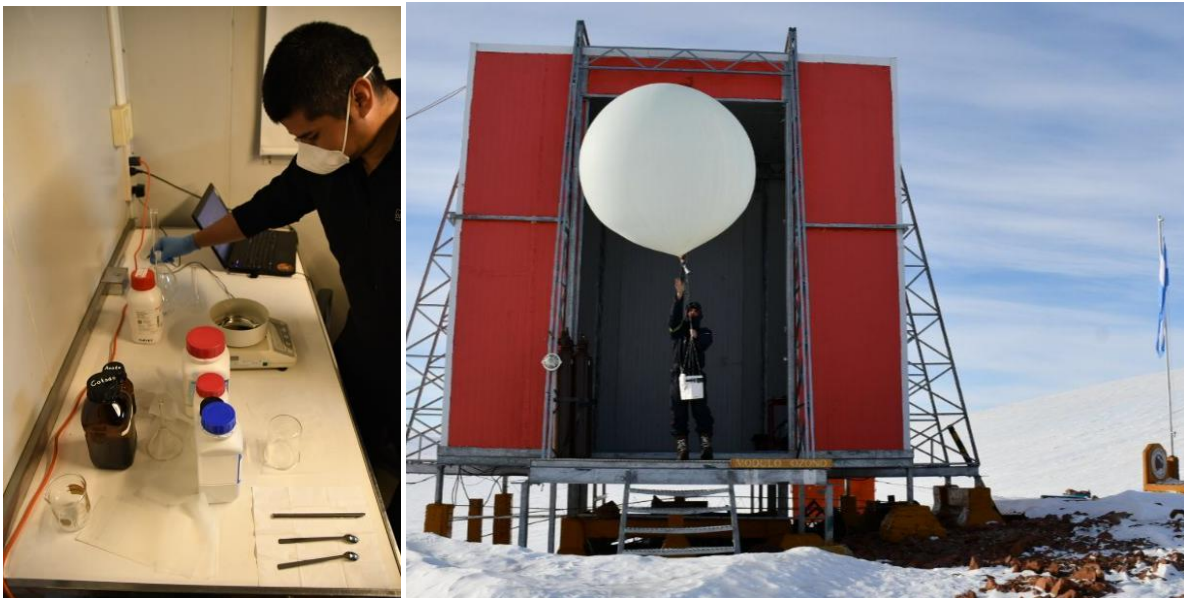


Figura 13. Perfiles de ozono de la Base Antártica Belgrano II. La línea color azul, representa al ozono y la línea roja es la temperatura.



El Ing. Heraldo Iván Vilca, es el responsable de la calibración de las ozonosondas, lo podemos ver en la foto de la izquierda preparando las soluciones químicas. Los Técnicos Sebastián Firpo y Santiago Kyanka son los responsables de preparar el globo y realizar el lanzamiento del ozonosondeo.

4. El Agujero de ozono

4.1 El área del agujero de ozono

El agujero de ozono empieza su crecimiento a partir aproximadamente el día 10 de agosto muy cercano a su media, además, de una manera muy similar al del año 2020 y 2021, Éste llega a cerrarse aproximadamente el día 15 de diciembre y en la **Figura 14** se muestra el área de la región en la que el ozono total es menor a las 220 UD (Definido por la comunidad científica como Agujero de Ozono).

Fuente de datos: Fuente de datos:

<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

https://www.temis.nl/protocols/o3hole/o3_size.php?date=20220922&lang=0

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

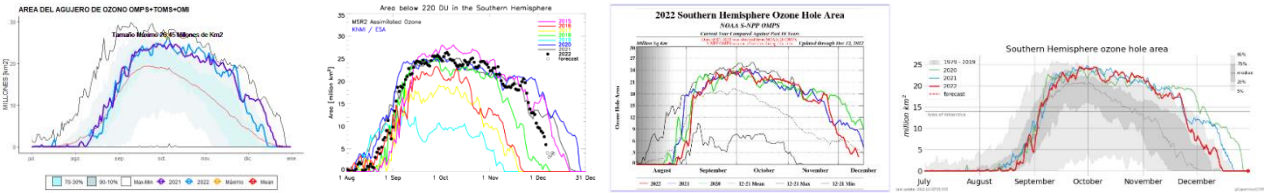


Figura 14. Área (millones de km²) donde la columna total de ozono es menos de 220 unidades Dobson, hasta el 2 de noviembre. Izquierda; Satélites de la NASA, EEUU (TOMS+OMI+OMPS). Derecha; Datos de la ESA (Agencia Espacial Europea).

En la **Figura 15** se muestra el área del agujero de ozono, comprado con los 42 años anteriores (1979 a 2021). La máxima área que se presenta en año 2022 fue el día 5 de octubre, con un valor de 26,5 millones de km², que lo ubica en el 11° lugar (de mayor a menor) Esta área solo se presenta un día como parte de la variación del agujero año con año, pero si se toma un promedio de las áreas desde el día 7 de septiembre al 13 de octubre, el área media del agujero de ozono para el 2022 es de 23,2 millones de km², ocupando el lugar 16° y ja sido muy similar a los años 2020 y 2021, además muy cercano al 2018 (23,9 millones de km²)

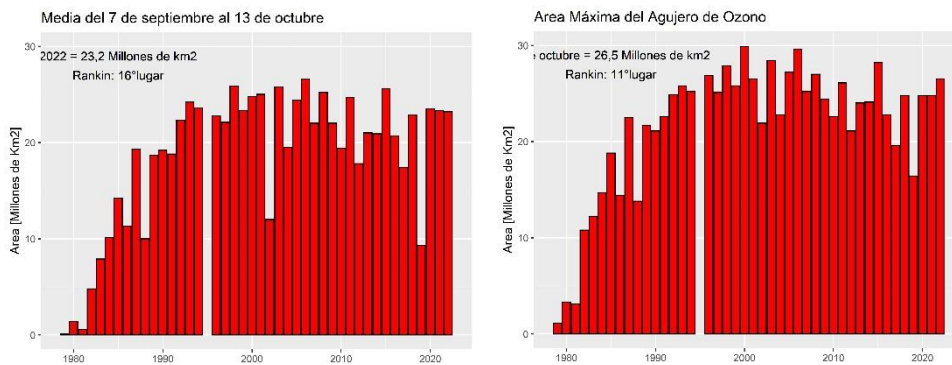


Figura 15. En ambas figuras se muestra el tamaño del agujero de ozono. Izquierda; Es la media del periodo en el que se presentan los máximos del agujero de ozono (7 de setiembre al 13 de octubre). Derecha; El tamaño máximo del agujero de ozono para el año 2022.

5. Conclusión.

La estratosfera sobre la Antártida, nuevamente estuvo fría al inicio y durante la primavera, del mismo modo que en los años 2020 y 2021, por lo que se produce gran cantidad de área y volumen de las NEP's, que perduran hasta finales de octubre. Esta última situación es consecuencia de un vórtice polar muy estable y fortalecido por la estratosfera fría, además con poco transporte de calor y poca actividad de onda. Estas condiciones son muy similares a las de los años 2018, 2020 y 2021.

En las estaciones de superficie, tanto los espectrofotómetros y ozonosondas, muestran la misma situación que los satélites, gran destrucción de ozono y muy cercano a los valores más bajos de ozono, situación que indica que, es un agujero de ozono profundo y muy cercano a los dos años anteriores.

Para este año, el promedio del tamaño del agujero de ozono que comprende del 7 de septiembre al 13 de octubre fue de 23,5 millones de Km², el cual ocupa el 16° lugar (de Mayor a menor) de los 43 años. Mientras que el tamaño máximo absoluto se presenta el día 5 de octubre con 26,5 millones de km² ocupando el lugar 11° lugar de mayor a menor. Finalmente. El agujero de ozono se cierra aproximadamente el 15 de diciembre, nuevamente siendo profundo y extendido en el tiempo y es muy similar a los del 2018, 2020 y 2021.

Aparentemente, no hay evidencias de que las emisiones de aerosoles y vapor de agua del volcán Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, hayan alcanzado la estratosfera antártica, tal como se muestra en el [Figura 16](#), donde se usa (Vömel et al. 2022) perfiles de ozono y humedad relativa para Ushuaia y Belgrano II. El vapor de agua se encuentra en muy baja concentración en la estratosfera y al descomponerse para formar al radical OH destruye al ozono para formar la molécula OH₂. Según lo anterior, podemos observar en Ushuaia (27 de julio) que, a una altura entre 23 y 25 km de altura, hay una acumulación de humedad que es muy probable que esté relacionada a la emisión del volcán, situación que se presenta en menor grado los días 8 y 24 de agosto, posteriormente ya no se observa más. En la estación Antártica Belgrano II (inicio el 21 de septiembre), no se observa en ningún caso hay acumulación de humedad.

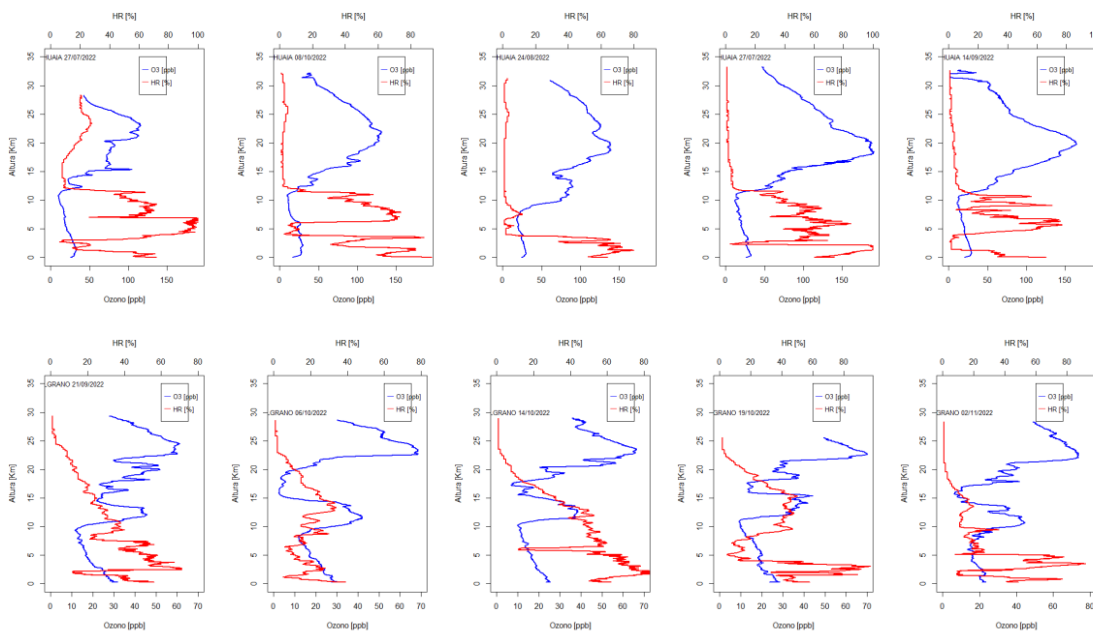


Figura 13. Perfiles de ozono [ppb] y Humedad relativa [%]. *Arriba*, La estación VAG Ushuaia y *abajo*, la estación Antártica Belgrano II.

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).

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; **Sr. Francisco Quarin y Sr. Julián Dimitri.**

Se agradece a los observadores Antárticos de San Martín del Laboratorio LASAN: **Bioing. Rodrigo Gramajo, Ing. Andrés Broggi y Ing. Nazareno Tintes.**

Se agradece a los observadores Antárticos de Belgrano II del Laboratorio LABEL; **Téc. Valerio Ezequiel Adrián y al personal del SMN que este año colabora con los lanzamientos de ozonsondas Sub. Principal Alborno y Sub. Auxiliar López.**

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.

- Vömel H., Stephanie E., Matt Tully³, Water vapor injection into the stratosphere by Hunga Tonga-Hunga Ha'apai, *Science* 377, 1444–1447 (2022).
- Zerefos (Ed), 2004, Athens, University of Athens, 129-130.
- E. Botek, S. Chabrilat, 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* 1, 2, 3, 4 e Informe Final del Agujero de Ozono 2019.
- 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.
- Carbajal 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