



Servicio
Meteorológico
Nacional

BOLETIN 2 - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO 2021

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.

Septiembre, 2021



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.	8
3. OBSERVACIONES DE OZONO	10
3.1 Observaciones Satelitales.	10
3.2 Estaciones en superficie.	11
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	12
3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO.	13
3.2.3 Estación Antártica San Martin	14
3.2.4 Estación Antártica Belgrano II	15
4. ACTIVACION QUIMICA DEL VÓRTICE	17
4.1 Resultados de Modelo BASCOE.	17
5. EL AGUJERO DE OZONO	18
5.1 El área del agujero de ozono.	18
6. CONCLUSIONES	20
7. AGRADECIMIENTOS	20
8. BIBLIOGRAFÍA	21

RESUMEN.

El presente Boletín 2, tiene por objetivo, establecer la evolución del Agujero de Ozono sobre la Antártida 2021. La temperatura de la estratosfera mínima y zonal, se encuentran por debajo de los valores mínimos históricos del periodo 1979 al 2020, es decir una estratosfera fría y las proyecciones muestran que así permanecerá por lo menos los próximos 5 días. El flujo de calor, a través del movimiento de ondas atmosféricas, fue muy poco, aunque los últimos días ya se nota una actividad muy cercana a la normal. Las Nubes Estratosféricas Polares estarán presentes, y por arriba de la media histórica, pero no llegan a las áreas máximas, la destrucción de ozono se muestra muy intensa, es decir se ha profundizado el agujero de ozono, debido a la liberación poco a poco de las sustancias agotadoras de ozono, como el óxido de cloro (ClO), aunque ya está disminuyendo la formación de las Nubes Estratosféricas Polares. El área máxima del Agujero de Ozono, fue de 24.8 millones de km², ocupando el lugar 18 desde que se tiene registro (1979 al 2021) Mientras que en el promedio del 7 de septiembre al 14 de octubre alcanza un área de 23,3 millones de km², ocupando el lugar 14 desde que se tiene registro e inicia el descaecimiento del agujero de ozono.

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

ABSTRACT.

The objective of this Bulletin 2 is to establish the evolution of the Ozone Hole over Antarctica 2021. The temperature of the minimum, and zonal stratosphere is below than historical minimum values of the period 1979 to 2020, that is, a cold stratosphere, and projections show that it will stay that way for at least the next 5 days. The heat flow, through the movement of atmospheric waves, was very little, although in recent days an activity very close to normal has already been noted. The Polar Stratospheric Clouds is be present, and above the historical average, but they do not reach the maximum areas, the destruction of ozone is very intense, that is, the ozone hole has deepened, due to the release little by little of ozone-depleting substances, such as chlorine oxide (ClO), although the formation of Polar Stratospheric Clouds is already decreasing. The maximum area of the Ozone Hole was 24.8 million km², occupying the 18th place since it has been recorded (1979 to 2021), while on the average from September 7 to October 14 it reaches an area of 23.3 million of km², occupying the 14th place since it has been recorded and the decay of the ozone hole begins.

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. 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. 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 CFC5. 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

Un efecto relacionado e inesperado, se 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, siendo notable el corrimiento de la corriente en chorro hacia el polo. 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 el polo. 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 lo suficientemente fuerte 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 los efectos del 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 Boletín del Agujero de Ozono en la Antártida 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 activación química 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 Antártica a 50 hPa., las temperaturas zonales en latitudes polares (60° a 90°) a 50 y 10 hPa, encontramos que la temperatura continúa por debajo de la media y muy cercanas a las mínimas históricas del periodo 1979 a 2020. Las temperaturas mínimas hasta ahora son muy parecidas al año 2020, (Ver la [Figura 1](#)).

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

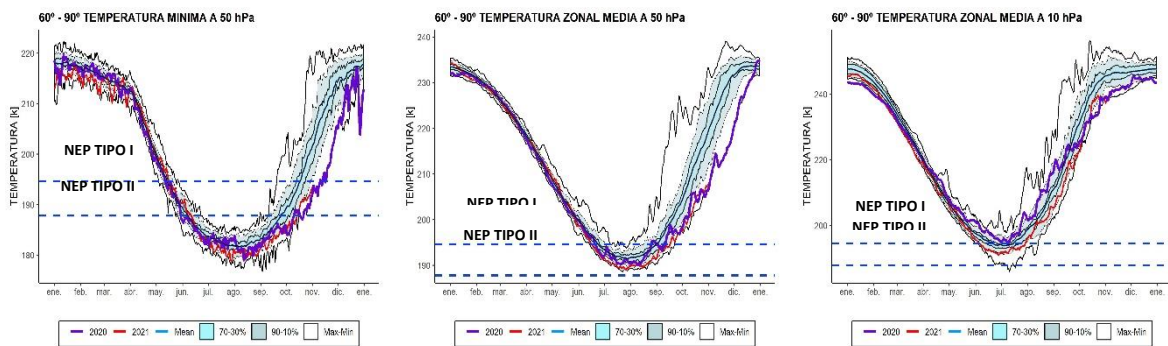


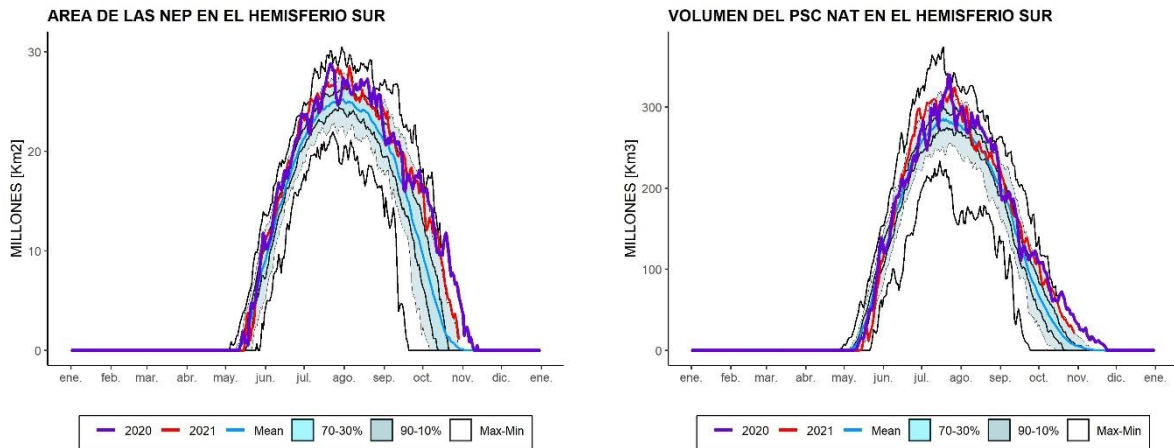
Figura 1. *Izquierda:* Temperatura mínima promedio a 50hPa. *Centro:* Temperatura zonal a 50 hPa. *Derecha:* Temperatura zonal a 10 hPa. Las temperaturas zonales sobre la región de 50° a 90° S. La línea color rojo y morada, representa la evolución de las temperaturas para el año 2021 hasta el 26 de octubre. La línea roja representa la media del periodo, 1979 a 2020. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos del mismo periodo. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Las líneas rectas punteada representan las nubes NEP tipo I 194,6 K (arriba) y NEP tipo II 187,8 (abajo)

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 las que se forman a partir de una temperatura mínima inferior a 194,6 K (-78,5°C) 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 2 se puede observar que el área y volumen de las NEP para este año y hasta el momento (26 de octubre), un nivel superior al de la media y oscila en la curva del percentil de 90%. La formación de las NEP es acorde a la estratosfera fría y consecuentemente, seguirá en esos niveles, Según la tendencia, es probable que las NEP finalicen su formación antes de lo que fue el año 2020.

Fuente de datos: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/polar.shtml>



Figuras 2. Área de las nubes estratosféricas polares (NEP), sobre la región Antártica. La serie de tiempo donde las temperaturas están suficientemente bajas para para la formación de las NEP Tipo I (ácido nítrico, trihidratado, $-78,5^{\circ}\text{C}$) en el nivel isentrópico de 460 K. La línea color roja, representa la evolución del tamaño de las NEP para el año 2021 hasta el día 26 de octubre. La línea negra representa la media, la línea azul fuerte la media de 1979 a 2019. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2019. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.



Nubes Estratosféricas Polares (NEP). Fotos: Sr. Diego Bordón, Pabellón Científico de la Estación Antártica Marambio, SMN 2020.

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 en la **Figura 3** que poco flujo las dos últimas semanas de agosto, por arriba de su media y muy parecido al año 2020. Al inicio de octubre se muestra un pequeño flujo pero posteriormente, tiende nuevamente a la calma.

Fuente de datos: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/polar.shtml>

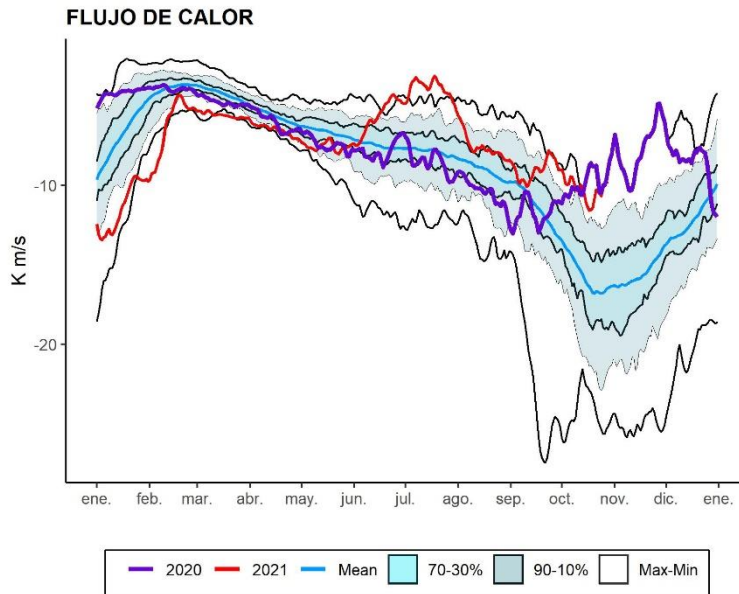


Figura 3. Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva roja muestra los datos para 2021 (actualizado hasta el 1 de septiembre. Note que un gran número negativo significa un gran flujo de calor. Los valores cercanos a cero significan un flujo de calor pequeño o calma. La línea punteada verde es la media de 1980 a 2020. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el mismo periodo. Las líneas en azul es la media más o menos una desviación estándar.

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 485K, 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. Ya para inicios de septiembre, ya se observa un vórtice estable, ahora en octubre, la estabilidad continua y se fortalece aún más,.

Fuente de datos:

http://www.copernicus.stratosphere.eu/4_NRT_products/5_Browse_plots/4_Meteo_fields/hres_pv_t.php?src=ECMWF_OD&spc=pv&l=at-485K&date=202106280000&ptype=sh

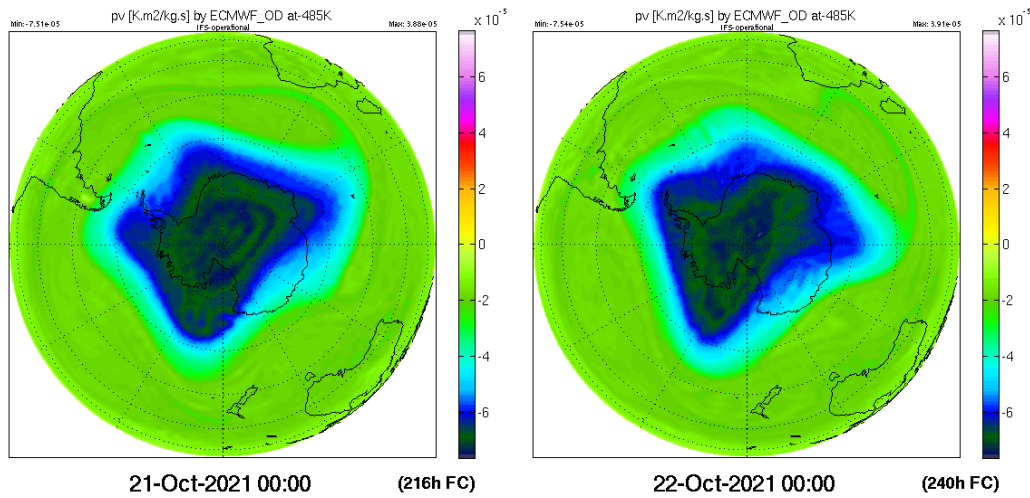


Figura 4. Mapas de proyecciones para la Vorticidad Potencial (PV) a una altura isentrópica de 485 K. Para los días 21 y 22 de octubre del 2021.

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. 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 del 2021, tal como han sido medidas por el instrumento GOME-2 a bordo del MetOp en comparación con su media histórica 1979 a 2020.

Tal como se observó anteriormente, un vórtice estable, con una estratosfera fría y en calma, es decir con muy poco flujo de calor, producen NEP por arriba de la media y muy cercano a los máximos, generan los ingredientes propicios para una mayor destrucción de ozono, por debajo de la media, muy cercana al percentil de 10%, lo que indica una que hasta el momento un agujero muy parecido al del año 2020 (Figura 5).

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

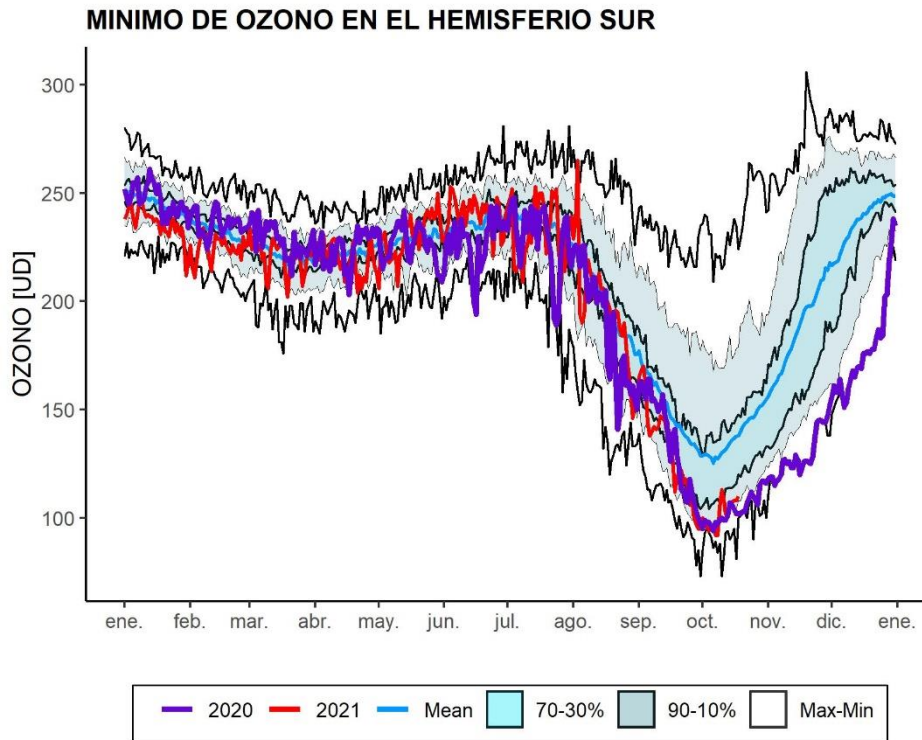


Figura 5. Mínimo diario de la columna total de ozono en el hemisferio sur, observado por GOME-2, y en el pasado por SCIAMACHY. Los datos son hasta el 26 de octubre. La línea roja muestra las observaciones de GOME-2 para el año 2021, la línea azul representa al año 2020. La línea negra es la media del periodo 1979 a 2020.

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° 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' 08'' O), ambos laboratorios bajo la dependencia de la Dirección Nacional del Antártico/Instituto Antártico Argentino (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, durante la 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 7**, 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 (1994-2020). Los datos diarios oscilan como todos los años, con gran amplitud y alrededor de la media, pero no rebasan los máximos o mínimos, tampoco se observa una tendencia.

En la Figura 8 se muestra los perfiles de ozono y de temperatura, producidos por los ozonosondeos realizados hasta el 27 de octubre. Se puede observar que aun en esa zona todavía no se detecta destrucción debido a que el agujero de ozono no pasa por la ciudad de Ushuaia.

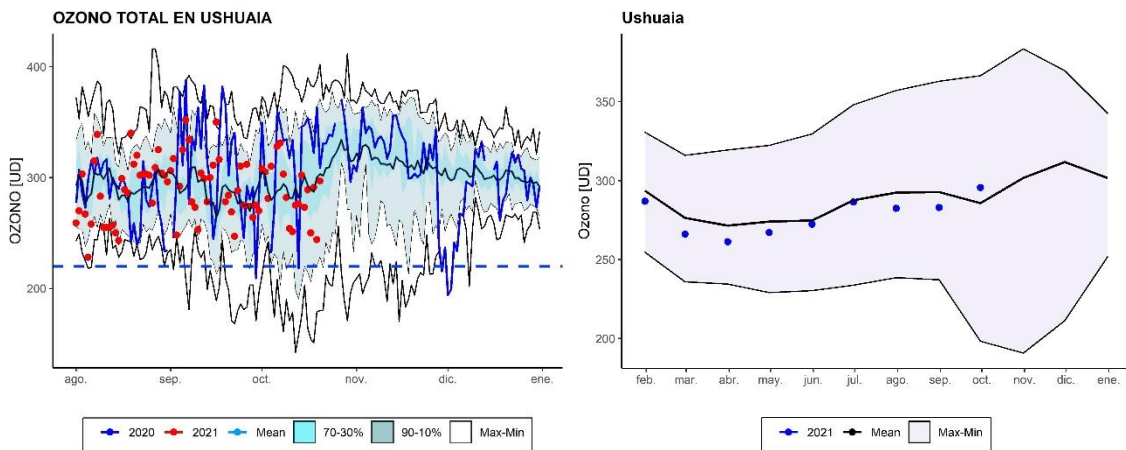


Figura 7. Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. En ambos gráficos los puntos rojos son los datos del año 2021. La línea naranja corresponde al año 2020, la línea negra la media del período 1994 a 2020.

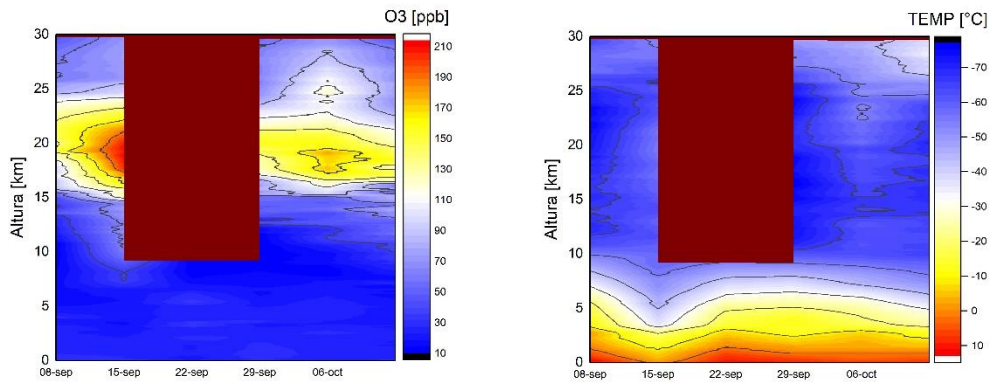


Figura 8. Ozonosondeos realizados en la Estación VAG de Ushuaia. En los dos gráficos, la línea morada es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmosfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].

3.2.1 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.

En convenio entre el SMN y el Instituto Finlandés de Meteorología (IFM) se mantiene el programa de ozonosondeos. Dichos sondeos se efectúan aproximadamente dos veces por semana durante el período de Agujero de Ozono. Pero 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. Este año inicia tarde las mediciones debido a las inclemencias del tiempo, pero actualmente ya están regularizadas dichas mediciones.

3.3.3. 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 13 de septiembre, fecha en la cual el μ (factor de masa de aire) tiene el valor adecuado para comenzar a medir en este período.



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

En la figura 9 se puede observar la gran destrucción de ozono (Datos diarios), muy por debajo de la media e inclusive muy cercanos a los mínimos históricos del período 2016 al 2020. Esto muestra que la estación detecta la profundidad

del agujero de ozono. Mientras que en el mensual, hasta lo que va de octubre, el promedio se encuentra por debajo de los mínimos históricos.

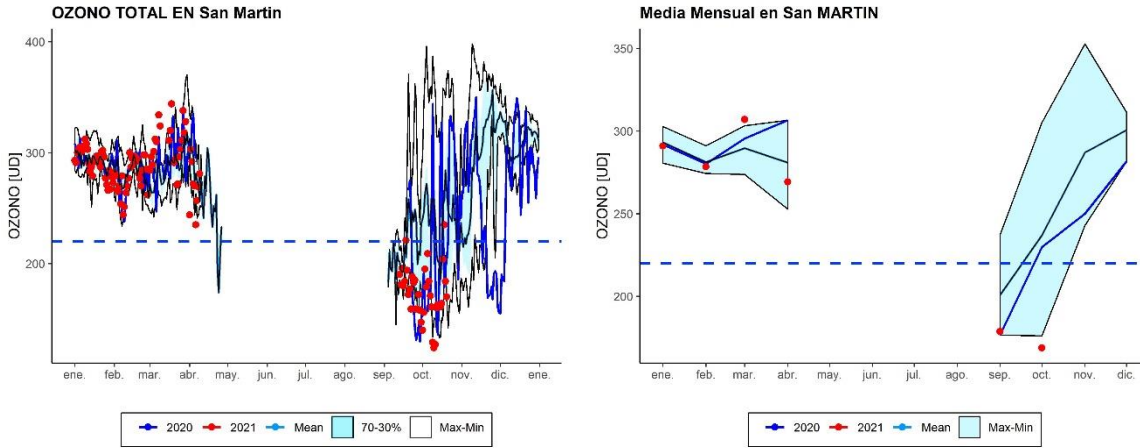


Figura 9. Columna total de ozono para la Estación Antártica San Martín. Los datos son desde 2016 hasta el 2020.

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 10 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 tocan los mínimos historias (2016 a 2020) y los del año 2020.

En la figura 11 se muestra los ozonosondeos, el perfil para ozono y el perfil de temperatura, donde se observa (Derecha) la presencia del agujero de ozono entre los 14 y 20 km de altura.

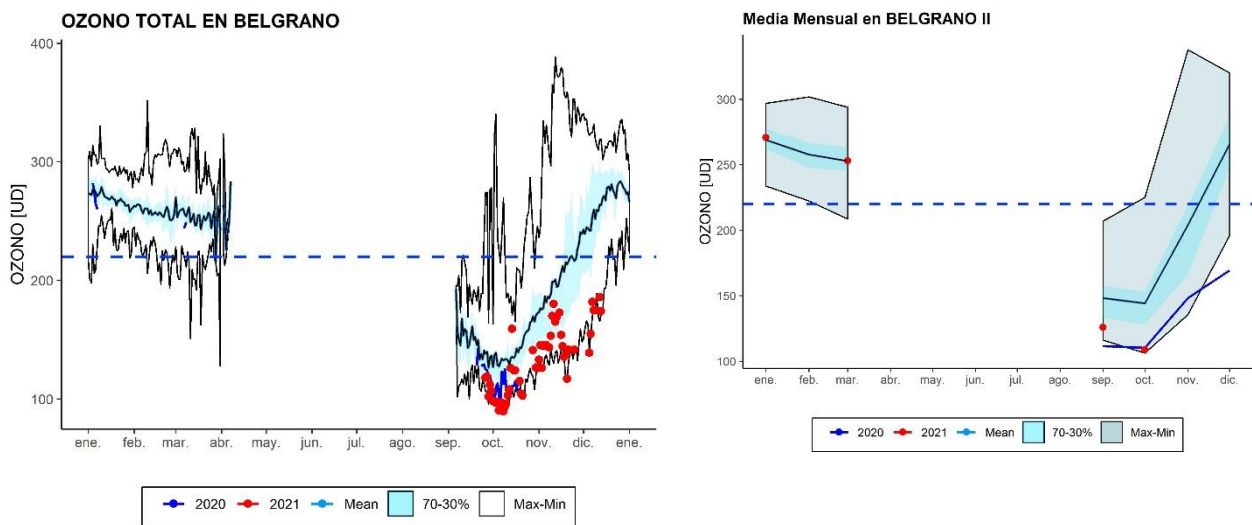


Figura 10. Columna total de ozono para la Estación Antártica Belgrano II. Los datos son desde 1992 hasta el 2020.

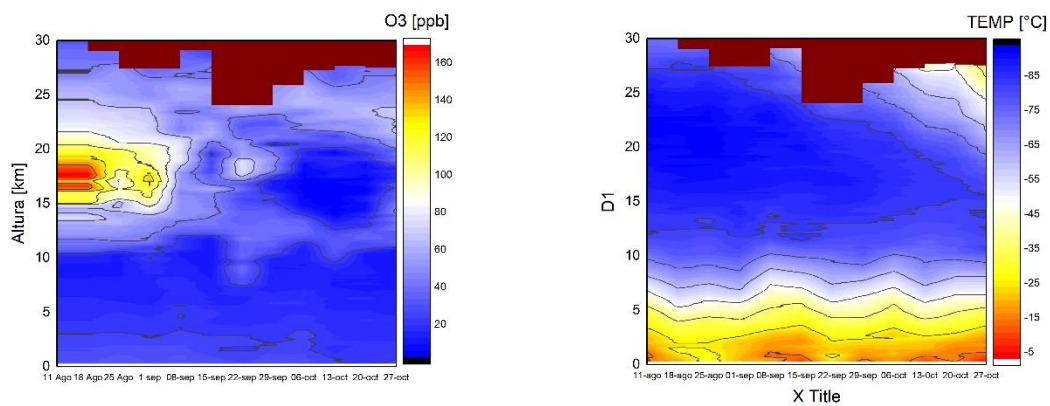


Figura 11. Ozonosondeos realizados en la Estación Antártica Belgrano II. En los cuatro gráficos. Izquierda; Perfil de ozono con unidades [ppb]. Derecha; la temperatura en [°C].



En la imagen se puede ver al Téc. Santiago Kyanka realizando el mantenimiento anual del Espectrofotometro Brewer en el laboratorio LABEL de base Belgrano II.



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. ACTIVACIÓN QUÍMICA DEL VÓRTICE

4.1 Resultados del Modelo BASCOE.

La **Figura 12** muestra la progresión de las tres especies principales, que son reservorios dentro de las NEP, para la destrucción de ozono en la estratosfera y de la concentración de ozono con unidades [ppb]. Los mapas son en el nivel de 50 hPa.

En la primera fila; el ácido nítrico (HNO_3) se observa cómo es removido gradualmente, cuando las temperaturas NEP están bien asentadas debido al invierno, pero se observa que la remoción del HNO_3 inicia a partir del mes de junio y continua hasta inicios de septiembre. La remoción de HNO_3 gaseoso es una indicación de que este compuesto se condensa en la forma de nubes estratosféricas polares (ácido nítrico trihidratado, $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

En la segunda fila, el ácido clorhídrico (HCl) es removido, dado que reacciona con nitrato de cloro (ClONO_2) y forma cloro activo (Cl_2). Se puede apreciar como el ácido clorhídrico está siendo vaciado puesto que es convertido en partículas NEP. La conversión extensa del HCl ya ha tenido lugar a partir del 1 de julio hasta inicios de septiembre.

En la tercera fila; monóxido de cloro (ClO) es un buen indicador de la activación del vórtice. Sin embargo, se debe observar que el ClO se dimeriza y forma (ClO)₂. El dímero es fácilmente separado en la presencia de luz solar y el ClO estará presente en aquellos lugares donde el vórtice sea iluminado por el sol, mientras que las áreas oscuras serán continuaran con (ClO)₂, el cual no es observado por el satélite Aura-MLS, pero es calculado y asimilado por el modelo BASCOE. Observando la suma del monómero y dímero (ClOx) se puede obtener una mejor impresión del grado de activación del cloro. Los primeros signos de activación son ya visibles el 20 de junio. El grado máximo de activación tiene lugar durante del mes de agosto. Para el 20 de octubre se observa ya una disminución del ClOx que indica que poco a poco se consume por la destrucción de ozono.

En la cuarta fila, muestra la razón de mezcla del ozono (O_3) Donde se observa que a inicios del mes de septiembre ya inicio el proceso destrucción de ozono y se forma poco a poco el denominado agujero de ozono, y se observa en el anillo circundante, el exceso de ozono que se acumula y que el vórtice no permite que ingrese al interior.

Fuente de datos: <http://www.copernicus-stratosphere.eu/>

20 de Jun.

20 de Jul.

20 de Ago.

20 de Sep.

20 de Oct.

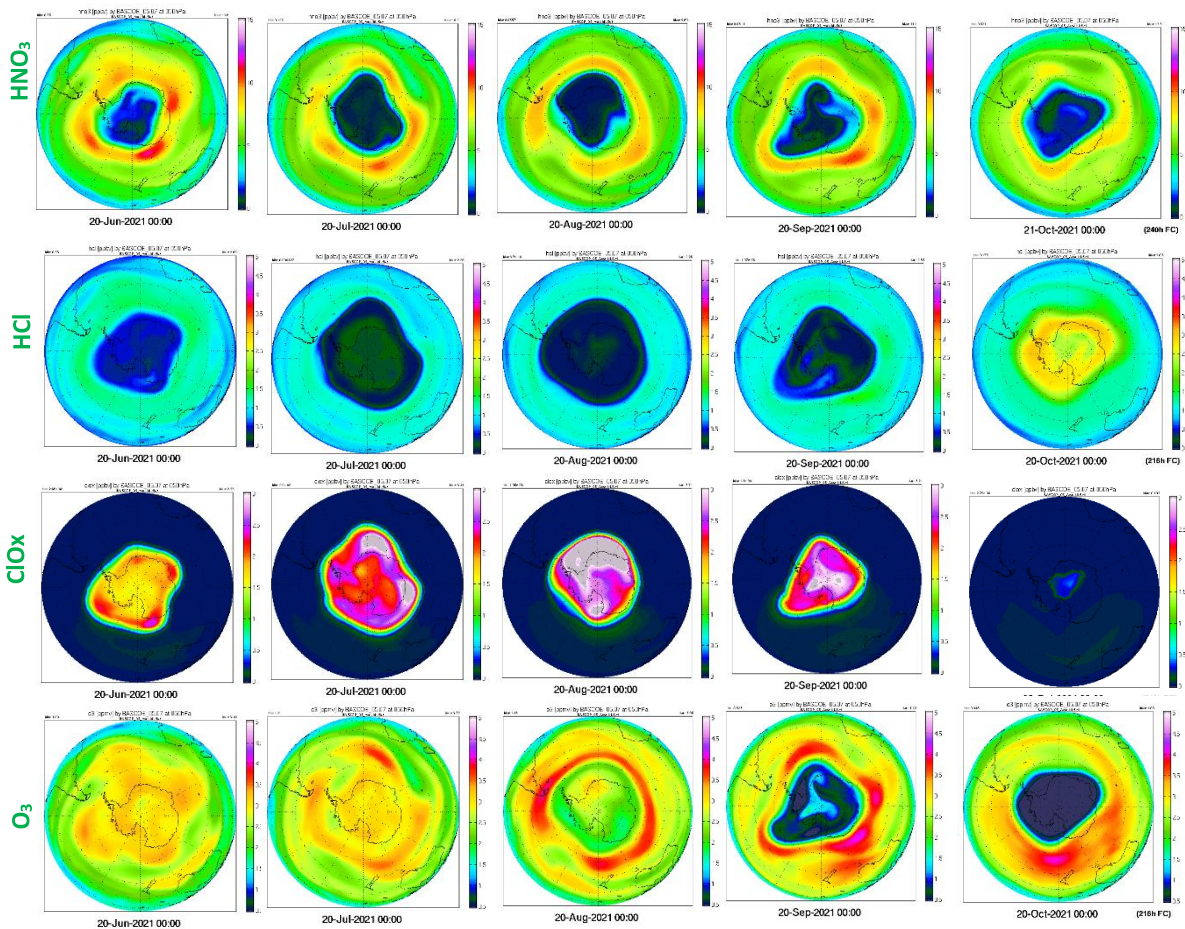


Figura 12. Resultados del modelo de asimilación BASCOE a 50 hPa. Este modelo se usa como parte del proyecto macc-II, ahora el NRT Análisis de ozono y especies relacionadas con el ozono. La primera fila muestra la relación de mezcla del ácido nítrico (HNO_3). La segunda fila muestra la relación de mezcla para el ácido clorhídrico (HCl). La tercera fila muestra la relación de mezcla para el óxido de cloro y su dímero ($\text{ClOx} = \text{ClO} + (\text{ClO})_2$). La última fila (abajo) muestra la relación de mezcla del ozono.

5. El Agujero de ozono

5.1 El área del agujero de ozono

En la **Figura 13** 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). Actualmente hasta el día 24 de octubre, el agujero tiene un área de 21.3 millones de Km^2 , comparado con la media del periodo 1979 al 2020 de 14,4 millones de Km^2 . La diferencia es 6,9 millones de Km^2 . La tendencia de la evolución hasta ahora, es muy similar al año 2020.

En la figura 14 se presenta el máximo del agujero de ozono para esta temporada, siendo el 7 de octubre, resultando 24.4 Millones de Km^2 y el lugar 19 de los 41 agujeros de ozono desde que se tiene registro (1979 -

2021). Pero si tomamos el promedio del área del agujero de ozono que oscila del 7 de septiembre al 13 de octubre (Fechas en que se presenta el máxima área) encontramos que su tamaño promedio es de 23.3 Millones de km², ocupando el lugar 14 de los 41 agujeros de ozono que se tienen registro.

Fuente de datos: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/SH.html> y <https://www.temis.nl/index.php>

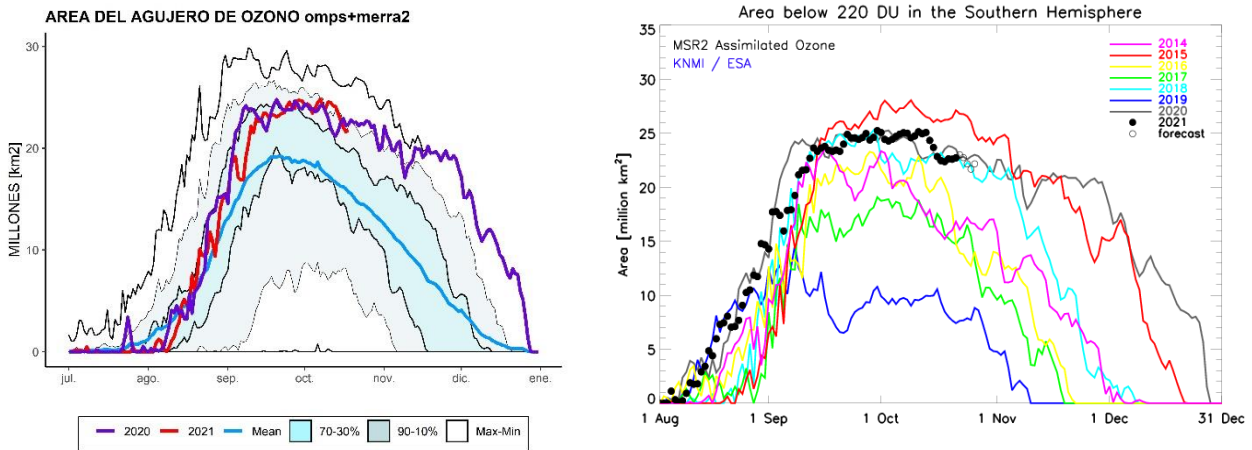


Figura 13.

Figura 13. Área (millones de km²) donde la columna total de ozono es menos de 220 unidades Dobson, hasta el 4 de septiembre. Izquierda; Satélites de la NASA, EEUU (TOMS+OMI+OMPS). Derecha; Datos de la ESA (Agencia Espacial Europea).

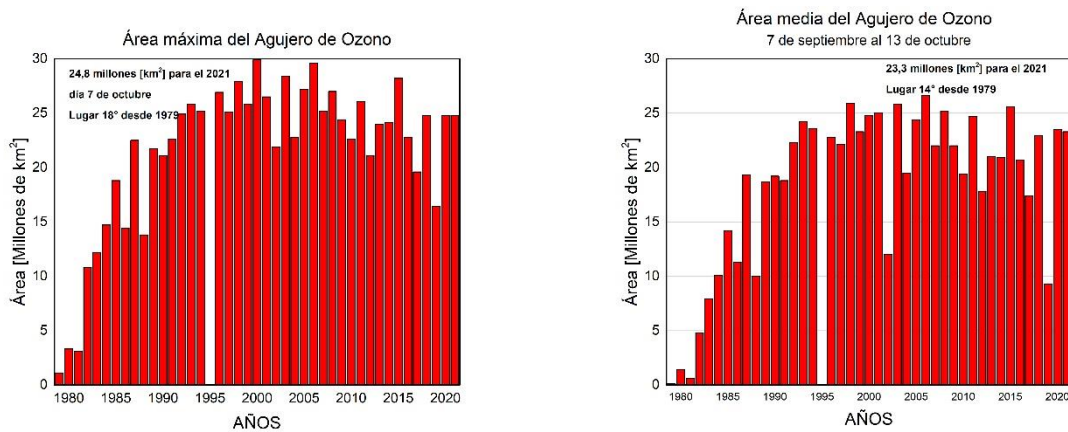


FIGURA 14. ÁREAS MÁXIMAS PARA EL AGUJERO DE OZONO 2021.

En la figura 15, se observa de manera global, el crecimiento del agujero de ozono durante los próximos 5 días (22 al 26 de octubre).

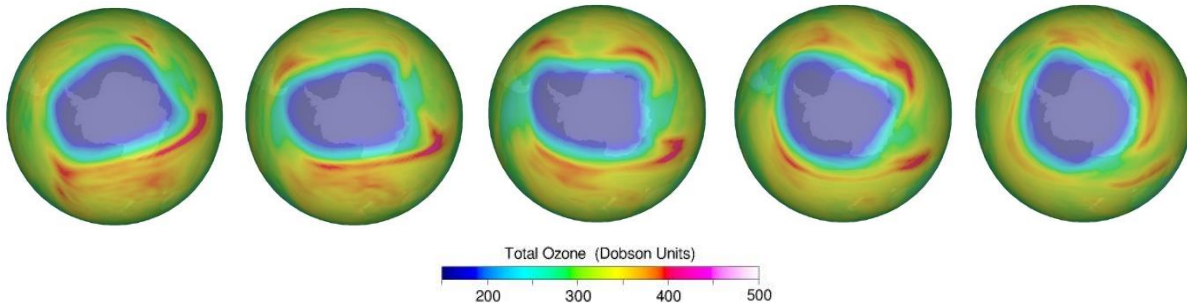


Figura 15. Proyecciones para los próximos 5 días que muestran la evolución y crecimiento del agujero de ozono.

Animación de la evolución del agujero de ozono, sede 1 de Julio hasta a fecha: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/ozone_maps/movies/OZONE_D2021-07-01%25P1D_G%5e1280X720.IOMPS_PNPP_V21_MMERRA2_LSH.mp4

6. CONCLUSION

La destrucción de ozono en la estratosfera antártica es continua y es muy similar al 2020, pero viene en decrecimiento. 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, para formar el agujero de ozono antártico.

Las temperaturas mínimas muestran que el enfriamiento en la estratosfera antártica continúa y muy cercana a las mínimas históricas y las proyecciones muestran la misma tendencia.

Las NEP todavía se están formando y se encuentran por arriba de la media histórica, inclusive muy cerca de la curva del año pasado, aunque la tendencia muestra que dejarían de formarse antes de la segunda semana de noviembre, de tal manera que vendría disminuyendo la activación química del agujero de ozono, es decir especies de cloro han podrían ir finalizando las reacciones catalíticas de destrucción de ozono.

Las observaciones en superficie y satelitales, muestran la destrucción de ozono y son capaces de reproducir la profundidad del agujero de ozono, que es uno de los mayores desde que se tiene registro.

El área del agujero de ozono se encuentra en decrecimiento, pero alcanzó en su punto máximo los 24.8 km² (lugar 18° desde que se tiene registro), capaz de cubrir el territorio más grande del mundo, que es Rusia. En el área promedio que oscila entre el 7° de septiembre al 13 de octubre, muestra un área de 23.3 Millones de km², ocupando el lugar 14 desde que se tiene registro.

El informe final se actualizará aproximadamente, antes del día 10 de noviembre 2021.

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).

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 Instituto Finlandés de Meteorología, por el soporte de las ozonsondas en la Estación Antártica Marambio (Convenio con el SMN).

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. Pedro Díaz y Diego Bordón.**

Se agradece a los observadores Antárticos de San Martín del Laboratorio LASAN: **Ing. Rodrigo Azpilcueta y al Ing. Alvaro Martín Errasquin.**

Se agradece a los observadores Antárticos de Belgrano II del Laboratorio LABEL; **Ing. Heraldito Ivan Vilca, Téc. Sebastian Firpo y al Téc. Santiago Kyanka.**

8. 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 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.
-
- 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