

DOS EVENTOS ATÍPICOS DEL AGUJERO DE OZONO SOBRE LA ANTÁRTIDA Y SU IMPACTO EN LA RADIACIÓN UV (2019 Y 2020).

Gerardo Carbajal Benítez^a, Héctor R. Estévez^b Pérez, Héctor Ochoa^c, y María E. Barlasina^a

^a*Servicio Meteorológico Nacional, ARGENTINA*

^b*Red Solarimétrica, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.MÉXICO.*

^c*Dirección Nacional del Antártico / Instituto Antártico Argentino. ARGENTINA.
, ARGENTINA*

e-mail: gcarbajal@smn.gov.ar

RESUMEN

Es sabido que los Compuestos Destruyores de Ozono (CDO), tal como los clorofluorocarbones (CFC's) son regulados por el Protocolo de Montreal y sienta las bases para entender que cuando existe voluntad política se pueden hacer bien al medio ambiente. El daño de los efectos del agujero de ozono, no solo es el impacto de la radiación ultravioleta, sino también en el clima tiene repercusiones, sobre todo en la Antártida. Con el descubrimiento del 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. El presente trabajo tiene como objetivo mostrar dos años atípicos de agujero de ozono sobre la Antártida, donde en el año 2019 se han presentado uno de los agujeros más pequeños que se tiene registro (Área entre el 7 de octubre - 13 de septiembre de 9,3 millones de km²) y el 2020 de los más profundos y más perseverantes (23,5 millones de km²), con la finalidad de analizar su impacto en la radiación solar en superficie. Esta situación expone al personal destinado en las bases Antárticas a elevados índices de radiación ultravioleta o a deficiencias en el desarrollo de la vitamina D por la falta de la misma. El análisis se realizará a través de las mediciones satelitales de las temperaturas mínimas en la estratosfera, la perturbación o quietud del vórtice polar (Potencial de Vorticidad), mecanismos de formación y destrucción de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) que contienen los CDO y la radiación ultravioleta. Se incluyen mediciones de las estaciones Antárticas Marambio, san Martín y Belgrano II.

Palabras Clave: *Ozono, Antártida, Ultravioleta, Medición.*

INTRODUCCIÓN

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 (Solomon, 2019).

La firma y aplicación del protocolo de Montreal (1989), ha tenido como resultado una reducción y control de la emisión antropogénica de sustancias potencialmente destructoras de la capa de ozono. Ello parece haber frenado el incremento y retroceso

del llamado agujero de ozono antártico, aunque es importante señalar que sustancias tales como los CFCs tienen tiempos de vida media extremadamente largos, por más de 50 años, inclusive. De tal manera, que la recuperación de la capa de ozono se muestre después del año 2030, aunque ya se presentan signos de recuperación sobre todo en la tendencia del tamaño del agujero de ozono desde hace 10 años aproximadamente (Gil et al 2006, Carbajal et al 2019, 2020).

La ecuación de continuidad para el ozono en la estratosfera es:

$$\frac{\partial [O_3]}{\partial t} = P - L[O_3] - \nabla \cdot V[O_3]$$

Donde:

P; es la producción de O₃ en unidad de volumen por segundo [U/s], U = m³, cm³, etc.

L[O₃]; Es la pérdida de O₃ y es el producto de la frecuencia de la pérdida por la abundancia de O₃.

∇•V [O₃]; Es la divergencia de O₃ que representa el transporte neto de X dentro o fuera de la unidad de volumen por movimientos atmosféricos, que pueden ser positivos o negativos.

Las reacciones químicas que dominan el equilibrio en la estratosfera respecto al ozono son:

Formación de ozono:



Destrucción de ozono:



Los CFC's son unos de los compuestos que rompen el equilibrio, de esta manera es mayor la destrucción que la formación.



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 (Banerjee et al 2020).

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) (Banerjee et al 2020; Solomon, 2020).

El Objetivo de este trabajo es analizar dos eventos extremos de agujero de ozono que se presentaron en año 2019, siendo uno de los más pequeños y 2020 que ha sido uno de los más profundos, con la finalidad de establecer y contribuir al entendimiento de los mecanismos y principales causas dinámicas y químicas de la estratosfera que rigen la oscilación año tras año de dicho fenómeno estratosférico.

MÉTODO

Las condiciones meteorológicas de la estratósfera antártica, durante el invierno austral (junio-agosto) sientan el escenario y las bases para la formación del agujero de ozono que ocurre año tras año en la Antártida, especialmente para el año 2019 y 2020 (WMO, 2016; Carbajal et al 2019; Carbajal et al 2020).

Se comparan dos años del agujero de ozono antártico que se consideran inusuales por la comunidad científica, 2019 y 2020, a través de los datos:

- De 1979–1992 son del instrumento TOMS a bordo del satélite NASA/NOAA Nimbus-7.
- De 1993–1994 son del instrumento TOMS a bordo del satélite Soviético Meteor-3.
- De 1996–octubre del 2004 son del instrumento TOMS del satélite de la NASA Earth Probe.
- De noviembre del 2004 – junio del 2016 del instrumento OMI (KNMI / NASA) a bordo del satélite Aura. Estos datos OMTO3d han sido procesados de manera similar que los datos del TOMS.
- Desde julio del 2016 son datos del instrumento OMPS a bordo del satélite Suomi NPP.

Y a través de los parámetros:

1. Temperatura mínima (altura 50 hPa) y Temperaturas latitudinales en la estratosfera de 60° a 90 ° (altura 50 y 10 hPa): Este parámetro determina, la formación de Nubes en la Estratósfera Polares (NEPs) que son reservas de sustancias destructoras del ozono estratosférico. Además, va a determinar la profundidad de la formación del agujero de ozono. Estas temperaturas son un buen indicador del enfriamiento y calentamiento estratosférico.

2. Área y volumen de las NEP's: Cuando las temperaturas continúan disminuyendo 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. Estas NEP actúan como catalizadores heterogéneos (en fase sólida) de las moléculas reservorio, y ello provoca que se liberen sustancias como la molécula de cloro (Cl_2) o el ácido hipocloroso (HOCl) a través de diversos ciclos catalíticos. Estas NEP inician su formación durante el invierno austral y permanecen en estado inactivo hasta llegada de la primavera y con de la luz del sol, las descomponen para dar cloro atómico y activo, que actúa como catalizador en la destrucción de ozono en la estratosfera.
3. Estabilidad del vórtice polar Antártico: La presencia del vórtice polar durante el invierno austral, provoca un descenso de las temperaturas en la estratosfera, por debajo de los -78°C (194.6°K). 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. Es decir, el flujo de calor que viene desde el trópico, puede indicarnos que tan fortalecido o debilitado el vórtice polar.
4. Área del agujero de ozono: Comparación con su media, máximos y mínimo, del periodo 1979 a 2018 (39 años).
5. Déficit de masa de ozono: El déficit de la masa de ozono se define como la cantidad de ozono medida en megatones que debe ser agregada al agujero, de tal manera que el ozono total llegue a 220 UD en aquellas regiones en las que se encuentra por debajo de este umbral. Este parámetro es también un indicativo de la profundidad que tiene el agujero de ozono y que está asociado al área y volumen de las NEP, así como al enfriamiento de la estratosfera.
6. Comparación de estaciones en superficie Marambio, Belgrano, San Martín y Ushuaia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la temperatura en la estratosfera antártica, muestra la gran diferencia entre el año 2019 y 2020 (ver Fig. 1).

El año 2019, las temperaturas venían oscilando alrededor de su media hasta inicios de del mes de septiembre, donde se observa un suceso inusual en la estratosfera antártica, un calentamiento súbito de la estratosfera, provocado por un fuerte transporte de flujo de calor desde la tropósfera tropical, hasta la estratosfera antártica, provocando temperaturas records e inclusive superando los máximos históricos del periodo 1979 a 2018, durante todo el mes de septiembre, este efecto se prolonga hasta mediados de noviembre.

Para el año 2020 sucede lo contrario al año 2019, un gran enfriamiento en la estratosfera, debido a un débil flujo de calor (cercano a la calma) desde la troposfera tropical hasta la estratosfera antártica. En el mes de octubre, se acentúa el enfriamiento por debajo de las mínimas históricas y en general se prolongan hasta fin de año,

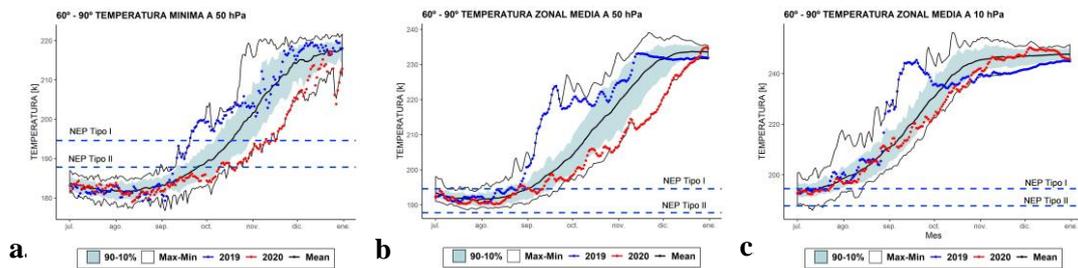


Figura 1. a. Temperatura mínima estratosférica entre el anillo de 60° a 90° de latitud a una altura de 50hPa. **b.** Temperatura zonal media entre los 60° a 90° latitud a una altura de 50hPa. **c.** Temperatura zonal media entre los 60° a 90° latitud a una altura de 10hPa. Las líneas horizontales muestran la temperatura a la cual se forman las NEP Tipo I y Tipo II.

Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) son reservorios para los compuestos destructores de ozono en la estratosfera (CDO) y se forman dependiendo del enfriamiento que alcance la estratosfera, tal como se mencionó en la parte de metodología (Ver fig. 2).

Para el año 2019, debido al calentamiento súbito en la estratosfera, fue muy poca la producción de NEP. Su área y volumen cayeron vertiginosamente durante septiembre, y a inicios de octubre, ya no había más NEP, comparado con la media histórica, estas normalmente terminan a finales de octubre. Por lo tanto, no había suficientes CDO disponibles para la destrucción de ozono.

Caso contrario, en el año 2020 las NEP tuvieron una mayor área y volumen que su media histórica, como resultado del enfriamiento estratosférico e incluso su producción se extendió hasta mediados de noviembre, lo que se convirtió en un gran reservorio de CDO.

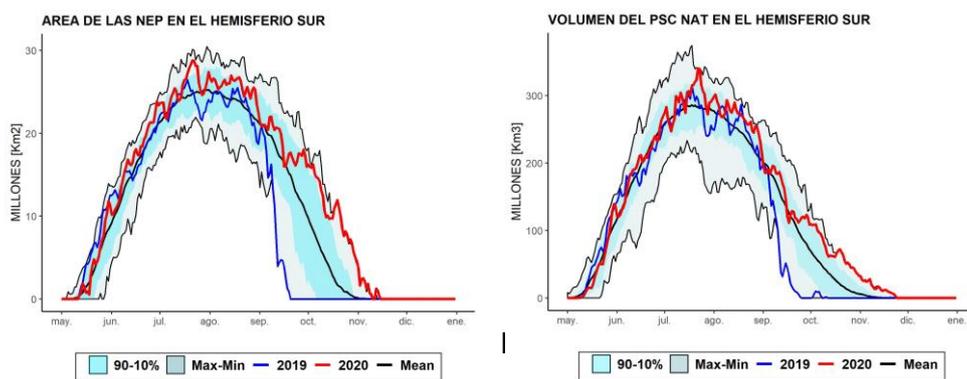


Figura 2. a. Área de las NEP. **b.** Volumen de las NEP.

El potencial e vorticidad es otro indicativo que muestra que tan intenso puede ser el agujero de ozono. Este parámetro nos muestra el vórtice polar que es el cinturón de vientos que circunda al oeste y se forma a partir de la noche polar. La temperatura dentro del vórtice va a depender que tan fortalecido el cinturón de vientos del oeste y entre más frío se encuentre al interior, habrá más temperaturas bajas y por lo tanto mayor formación de las NEP. En la Fig.3 se muestra el vórtice polar a través del potencial de vorticidad, donde se muestra el comparativo para ambos años, donde se observa que debido al calentamiento súbito en el año 2019, el vórtice se debilita y en el mes de noviembre y diciembre prácticamente se diluye. Mientras que en el 2020 se muestra un vórtice muy fortalecido que inclusive llega al mes de noviembre y poco a poco se diluye en el mes de diciembre.

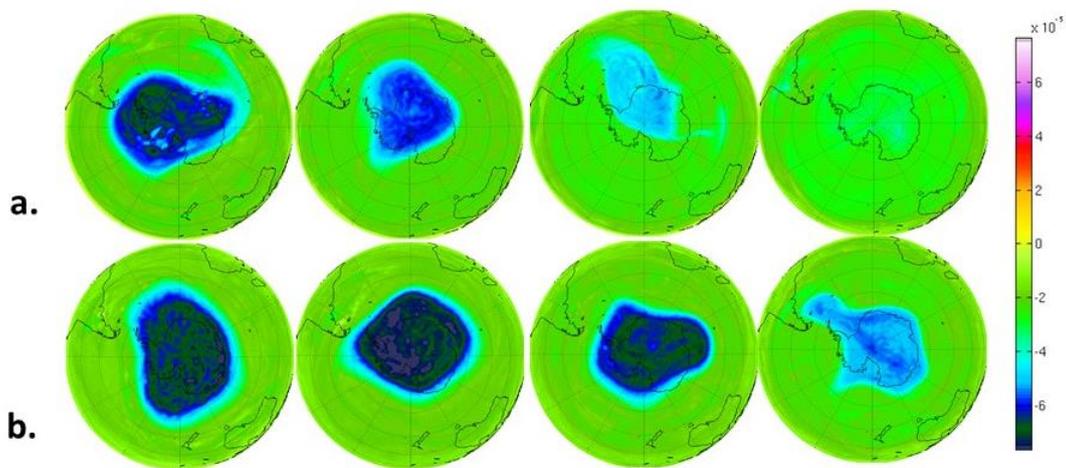


Figura 3. Mapas de vorticidad potencial (PV) mes a mes, a una altura isentrópica de 485 K, iniciando en el mes de septiembre y finalizando en diciembre. Los valores negativos más cercanos a cero, indican un vórtice débil (tono de color más claro), caso contrario los valores más negativos que se alejan del cero indica un vórtice muy fortalecido (Tono oscuro) **a.** año 2019. **b.** Año 2020.

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, note en la Fig.4 que un gran número negativo significa un gran flujo de calor. El calentamiento súbito de la temperatura en año 2019, se debe a un gran flujo de calor proveniente de la zona tropical, que permea el vórtice polar, inclusive por debajo esa de los valores, es decir la actividad fue más grande del periodo 1979 a 2018. Caso contrario para el año 2020, se observa muy poca actividad en cuanto al flujo de calor y muy cercano a la calma, lo cual tiene como consecuencia una gran estabilidad del vórtice polar (Fig. 4)

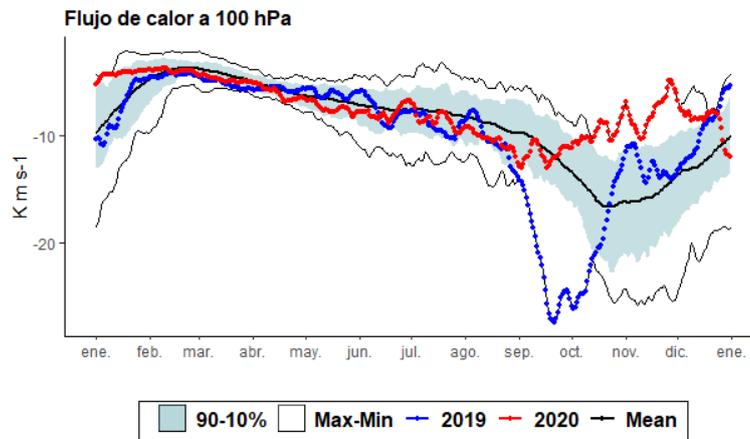


Figura 4. Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. Los puntos azules muestran los datos para 2019. Los puntos rojos muestran el año 2020.

Al comparar el los mínimos de ozono en el hemisferio sur (Fig. 5), es obvio que para el año 2019, hay menor destrucción de ozono, debido a la poca formación de NEP que son los reservorios de CDO, mientras que para el año 2020 con muy bajas temperaturas y una gran formación de NEP, se observa gran destrucción de ozono, casi alcanzando valores mínimos históricos y en algunos casos caso por debajo del periodo 1979 a 2018

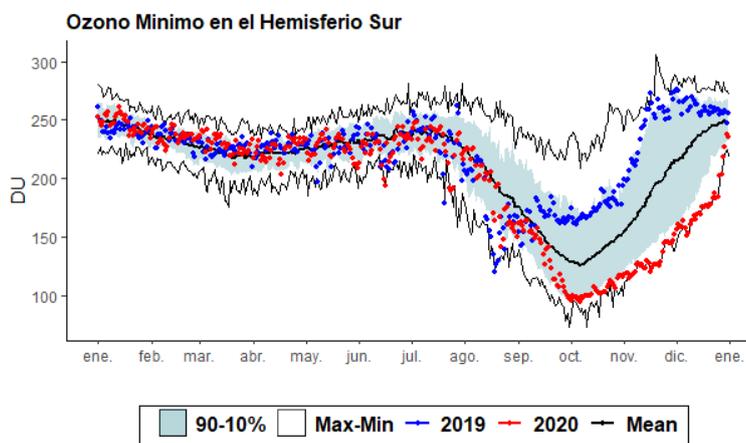


Figura 5. Serie de tiempo de valores mínimos de ozono. Los puntos azules muestran los datos para 2019. Los puntos rojos muestran el año 2020.

Si tomamos el valor máximo que se presenta año a año del tamaño del agujero de ozono, el agujero de ozono para el año 2019 ocupa el 34° lugar del periodo de 1979 a 2020 (41 años) con un máximo de 16,4 millones de kilómetros cuadrados, esto si tomamos del mayor a menor agujero de ozono. Mientras que el año 2020 ocupa el lugar 17° lugar del mismo periodo.

Ahora bien, el tamaño máximo del agujero de ozono, no se presenta el mismo día de cada año, éste va fluctuando del 7 de septiembre al 13 de octubre, si tomemos un promedio para esas fechas, obtenemos que el año 2019 tiene un área promedio de 9,3 millones de kilómetros cuadrados, ocupando el lugar 37° de mayor a menor del periodo 1979 a 2020. Mientras el año 2020 tiene un área promedio de 23,5 millones de kilómetros cuadrados ocupando el 12° lugar para el mismo periodo.

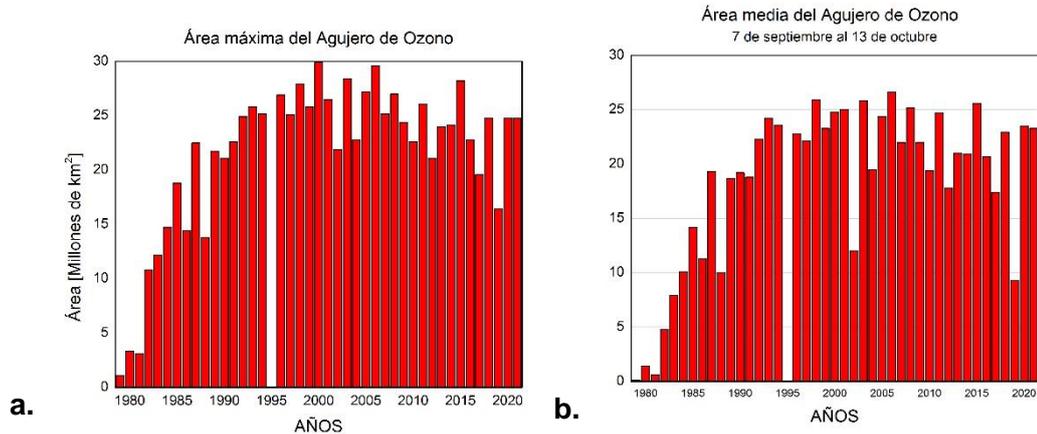


Figura 6. a. Área Máxima del de los agujeros de ozono y **b.** Área promedio del 7 de septiembre al 13 de octubre.

En la Fig. 7 se observa el comparativo de los dos agujeros de ozono y es clara la diferencia, remarcando que son dos años consecutivos.

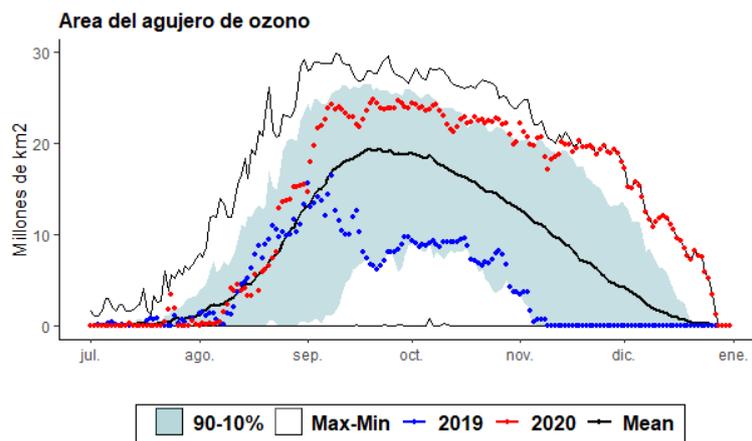


Figura 7. Evolución y desarrollo de los dos agujeros de ozono, durante sus respectivos años.

En la Fig. 8 se comparan los dos agujeros de ozono, respecto a su anomalía y se puede observar mejor la diferencia que hay entre ellos

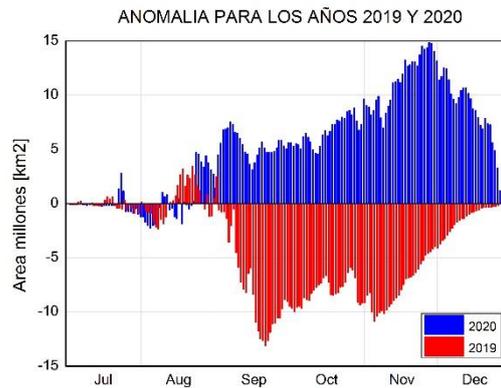


Figura 8. Comparación directa de los dos agujeros de ozono, a través de anomalía.

CONCLUSIONES

Los años 2019 y 2020 de las temporadas del agujero de ozono han sido comparados, los cuales son consecutivos y marcan entre ellos una gran diferencia.

En el año 2019, la evolución del vórtice venía normalmente, acompañado de temperaturas mínimas bajas en la estratosfera y con ello la producción de las NEP, pero a inicios del mes de septiembre, se desarrolla un calentamiento súbito en la estratosfera, muy probablemente al gran transporte de calor desde el trópico, tan intenso que pudo perturbar la estratosfera y con ello inhibir la producción de las NEP por lo que hay muy poca destrucción de ozono e incluso el agujero de ozono se cierra antes de lo normal el día 8 de noviembre, situación que no se tiene registro.

Para el año 2020, el vórtice polar se desarrolla y evoluciona normalmente, pero se intensifica debido a que las condiciones de flujo de calor son muy bajas, e incluso muy cercanos a la calma, esto provoca un enfriamiento en la estratosfera con valores muy por debajo de la media histórica, inclusive en algunos momentos por debajo de los valores mínimos históricos. Este es el condimento esencial para un gran desarrollo de las NEP y como resultado gran destrucción de ozono muy por debajo de su media histórica y por momentos debajo de los valores mínimos históricos lo que produce un agujero de ozono muy profundo y muy persistente en el tiempo, esto como resultado de que las temperaturas mínimas en la estratosfera perduran hasta mediados de noviembre al igual que la producción de las NEP, cerrándose el agujero de ozono el 27 de diciembre, situación inédita de los 41 años que se tenían registro.

En términos generales, las condiciones meteorológicas y la dinámica de la estratosfera sientan las bases para el desarrollo de la NEP que contienen a los CDO, mientras que estos compuestos son los que destruyen directamente al ozono a través de ciclos catalíticos (química de la estratosfera)

Si bien existe una tendencia a la disminución del agujero de ozono en la Antártida, debido a la regulación de los clorofluorocarbones (CFC's) por el protocolo de Montreal, aún hay que realizar estudios y su monitoreo para continuar con su entrenamiento.

REFERENCIAS

- 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, 2020.
- 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. *Repositorio Institucional del Servicio Meteorológico Nacional, Argentina*.
- Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines 1, 2, 3, 4 y 5. Temporada del Agujero de Ozono 2020. *Repositorio Institucional del Servicio Meteorológico Nacional, Argentina*.
- 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. *EICES9*, ISBN 978-987-1323-36-4.
- Gerardo Carbajal Benítez, Héctor Estévez, Eduardo Luccini, Facundo Orte, Héctor Ochoa, Elian Wolfram, María Elea Barlasina, Lino Condori y Fernando Nollas. Pattern analysis of seven total ozone column measuring stations in the center, southern of South America and Antarctica. *Proceeding of Quadrennial Ozone Symposium (QOS) 2021*.
- Manuel Gil Ojeda “El ozono estratosférico” *Tethys*, 3, 47–58, 2006.
- Solomon, S. The discovery of the Antarctic ozone hole, *Nature*, Vol 575, 46-47, (2019).
- WMO “Ozone Hole Bulletin Antarctic” 2016.
- WMO “Ozone Hole Bulletin Arctic” 2016.