



BOLETÍN ANUAL

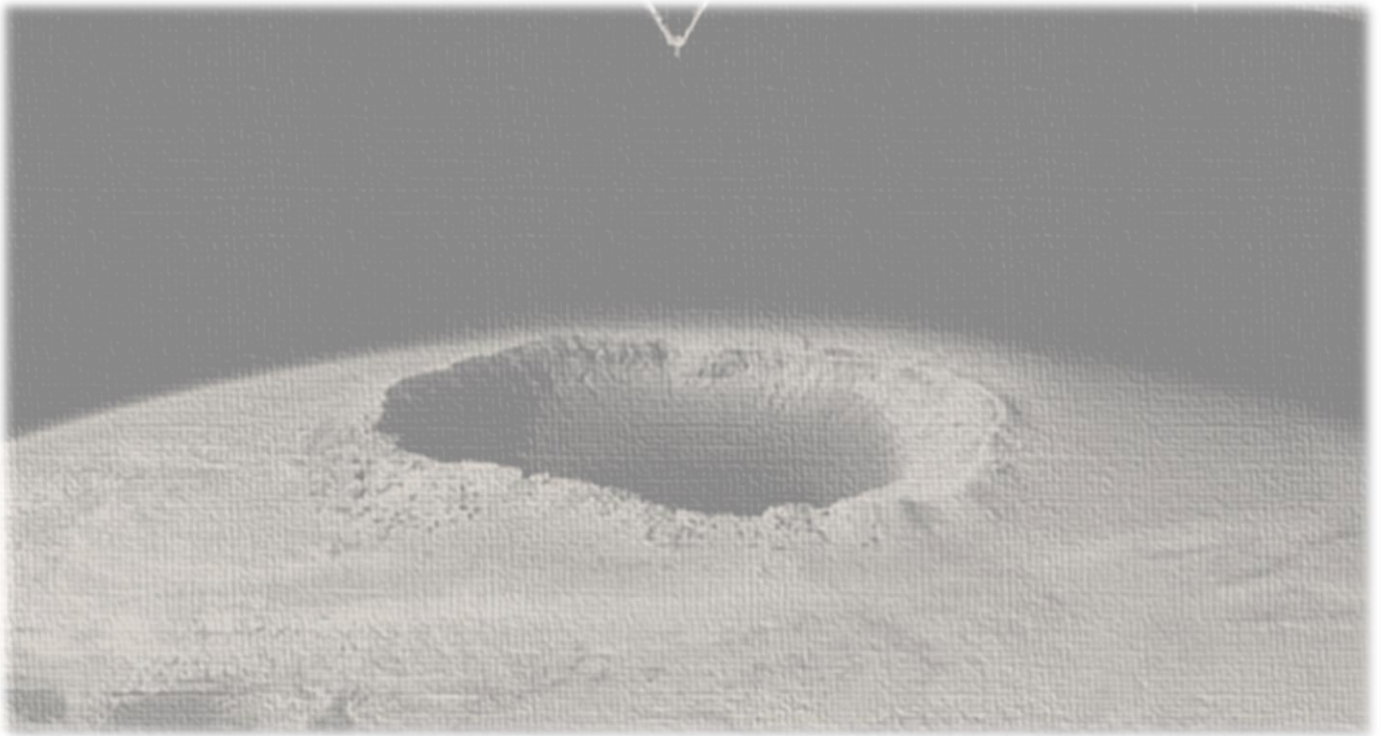
---

# OZONO ESTRATOSFÉRICO Y RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

Dirección Meteorológica de Chile  
Subdepartamento de Climatología y  
Meteorología Aplicada



AÑO  
**2021**



## Índice

	Pág.
1. Resumen.....	3
2. Introducción.....	4-5
3. Monitoreo del agujero de ozono antártico.....	6-7-8
4. Consecuencias del agotamiento del ozono en la radiación UV.....	9
5. Observaciones generales.....	10
6. Referencias.....	11

### ¿Cómo comunicarte con nosotros?

Sitio web: [www.meteochile.gob.cl/climatologia](http://www.meteochile.gob.cl/climatologia) Correo: [servicios\\_climatologicos@meteochoile.cl](mailto:servicios_climatologicos@meteochoile.cl)

### Información importante

Los datos usados para este boletín son provenientes de satélites de la NASA. Para mayor información se puede visitar <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>. También, información relevante es obtenida de COPERNICUS. Puedes encontrar mas detalles en <https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer>

**Boletín diseñado y elaborado por el meteorólogo Juan Crespo.**  
**Boletín editado por la meteoróloga y Jefa de la Of. De Servicios Climáticos Catalina Cortés.**

© Dirección Meteorológica de Chile - Dirección General de Aeronáutica Civil  
Avenida Portales 3450, Estación Central, Santiago.



/meteochoiledmc



@meteochoile\_dmc



@meteochoile



**Meteochile Blog**  
Blog oficial de la Dirección Meteorológica de Chile



1. Resumen

El agujero de ozono durante el año 2021 estuvo marcado por condiciones físicas y dinámicas que permitieron que adquiriera grandes dimensiones y una duración bastante más extensa que su ciclo habitual (desde principios de agosto a fines de diciembre). Los valores de mínimo de columna de ozono (Figura 1) se mantuvieron por debajo el promedio 1979-2021 desde septiembre, situación similar a lo ocurrido el año 2020.

Las temperaturas de formación de las nubes estratosféricas polares (NEPs), tanto para las de Tipo I como de Tipo II, estuvieron por debajo de valores medios para el período 1979 - 2021, entre agosto y diciembre, y siendo muy bajas para la época entre octubre y noviembre, favoreciendo la formación de NEPs por más tiempo de lo normal.

La corriente en chorro polar en tanto, principal factor de aislamiento del aire polar y fortalecimiento del vórtice, presentó intensidades superiores a la media desde fines de agosto hasta diciembre. A su vez, el transporte longitudinal de calor en 100 hPa, entre los 45° y 75°S, fue muy débil, lo que se tradujo en un vórtice estable y de larga duración.

Lo señalado anteriormente, **favoreció una mayor extensión del área del agujero y un tardío cierre (similar a lo ocurrido en 2020)**, llegando a los 25 millones de Km<sup>2</sup> aproximadamente en septiembre y octubre, y manteniendo una extensión cercana a los 20 millones de Km<sup>2</sup> hasta fines de noviembre (Figura 2 y 3). Esta situación, ubica a el **Agujero de Ozono de 2021 como uno de los más grandes y duraderos de los últimos años.**

Pese a que el Agujero de Ozono Antártico del año 2021 presentó valores de gran tamaño, duración y profundidad, su efecto en el país fue marginal. En septiembre y noviembre el aumento en los valores del Índice Ultravioleta (IUV) en las ciudades del extremo sur del país, están asociados a las condiciones naturales para la época, es decir, acorde a la estacionalidad. Sin embargo, un leve aumento de IUV se vivió entre el 15 y 17 de noviembre por una elongación del agujero.

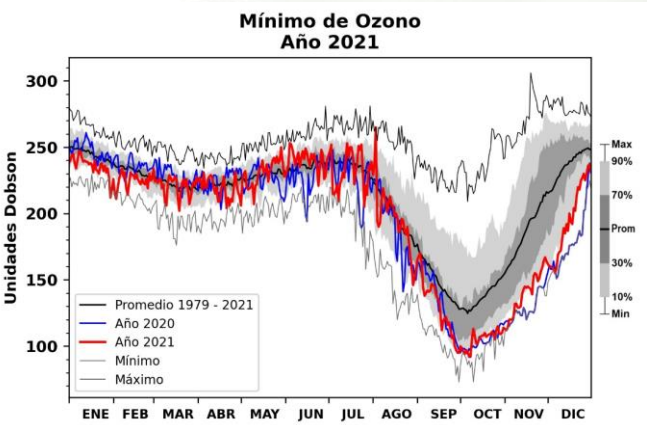


Figura 1. Mínimo de columna de ozono en unidades Dobson (DU). Fuente: NASA.

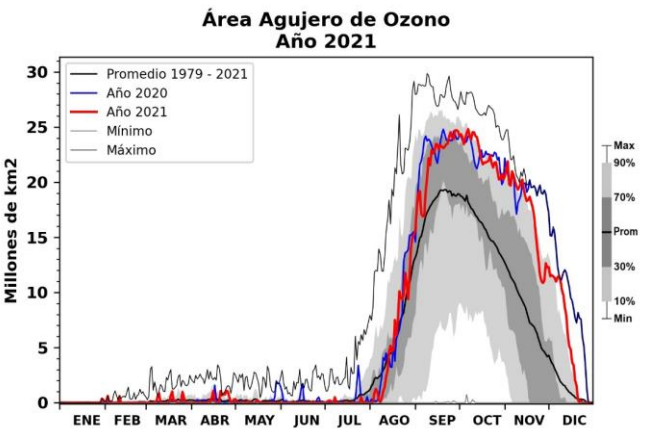


Figura 2. Tamaño del agujero de ozono en millones de km<sup>2</sup>. Fuente: NASA.

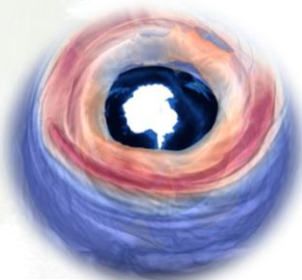


Figura 3. Agujero de Ozono el día 15 de septiembre de 2021. Fuente: Programa Copernicus.

2. Introducción

Las observaciones atmosféricas de mediados de la década de 1970, permitieron constatar la disminución primaveral de la capa de Ozono Antártico, denominada en los años siguientes como agujero de la capa de ozono (Figura 4). Las altas concentraciones de clorofluorocarbonos y otros contaminantes atmosféricos agotadores del ozono estratosférico, conocidos como SAOs, fueron los principales responsables de este efecto.

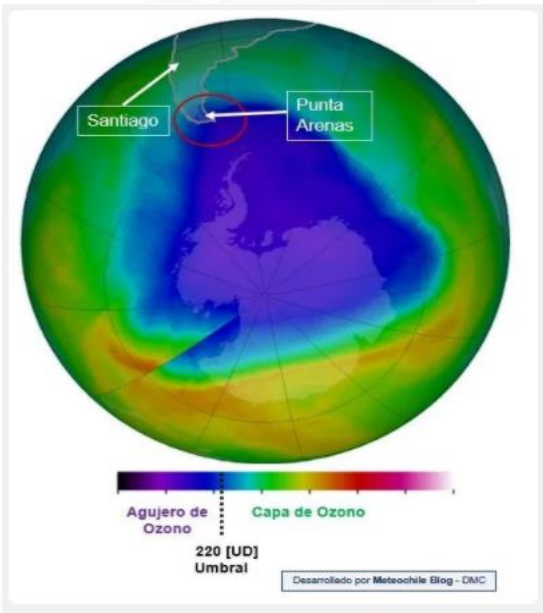


Figura 4. Columna de ozono total. Fuente: NASA.

La pérdida global de ozono estratosférico genera un incremento importante en la incidencia de los Rayos UV y el consiguiente incremento en las afecciones a la piel. En respuesta a este problema, los gobiernos de diferentes países del mundo firmaron en 1987 el Protocolo de Montreal, como un compromiso global basado en normativas para el control del uso de las sustancias químicas nocivas para la capa de ozono. Este acuerdo internacional ha sido exitoso, ya que las medidas aplicadas han permitido avanzar en la recuperación de la capa de Ozono, como se puede constatar en el informe conjunto desarrollado por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente “Evaluación científica de la disminución del Ozono, año 2014”, donde se prevé una recuperación total alrededor del año 2050.

El protocolo de Montreal ha sido revisado y modificado en la reunión realizada en Kigali, Ruanda (2016), a través de la llamada “Enmienda de Kigali” que busca reducir los hidrofluorocarbonos (HCFC) al año 2025. Chile ha sido el séptimo país del mundo en ratificar esta enmienda, iniciando su puesta en marcha el 1 de enero de 2019. El presente boletín muestra los resultados de las observaciones realizadas durante el año 2021 por la NASA, el Instituto Real de Meteorología de Holanda (KNMI) y la información de radiación ultravioleta medida por las estaciones del sur y extremo sur del país.

Capa de ozono, radiación UV y su interacción

El ozono es un gas inerte, que está presente en forma natural en la atmósfera. Fue descubierto en 1840 por el químico alemán Friedrich Shönbein, por medio de descargas eléctricas en el aire. Su nombre proviene del vocablo griego ὄζειν (ozein), que significa oler. Es de muy baja concentración, solo se pueden observar 3 moléculas de ozono por millón de moléculas de aire.

El ozono posee dos caras, una “buena” y una “mala”. El bueno se concentra en la estratósfera, entre los 10 y los 50 Km, con un máximo alrededor de los 30 km, zona conocida como Capa de Ozono. Esta es responsable de filtrar el 90% de la Radiación Ultravioleta más nociva para la vida en la tierra (Figura 5). El ozono conocido como malo, en tanto, se concentra en la tropósfera, la capa atmosférica más cercana a la superficie, representando el 10% restante. A este nivel es un gas tóxico para la salud humana. Se genera esencialmente de la contaminación vehicular.



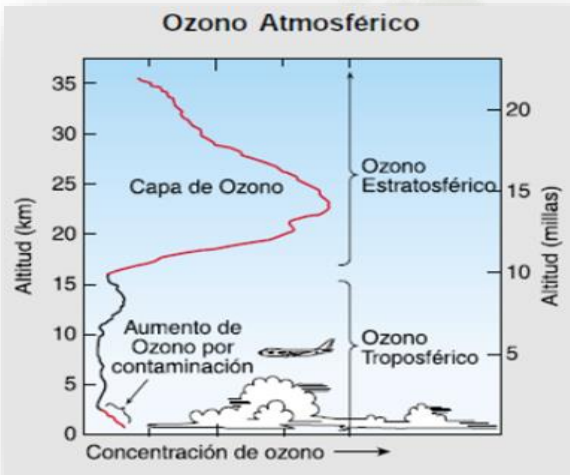


Figura 5. Perfil de ozono atmosférico. Fuente: NOAA.

Formación del ozono

El ozono se forma naturalmente en la estratósfera, a través de una serie de reacciones fotoquímicas en la que los rayos solares ultravioleta rompen la molécula de oxígeno(O<sub>2</sub>) para producir 2 átomos de oxígeno (2O). Luego, cada átomo se combina con una molécula de oxígeno para producir una molécula de ozono (O<sub>3</sub>). (Figura 6)

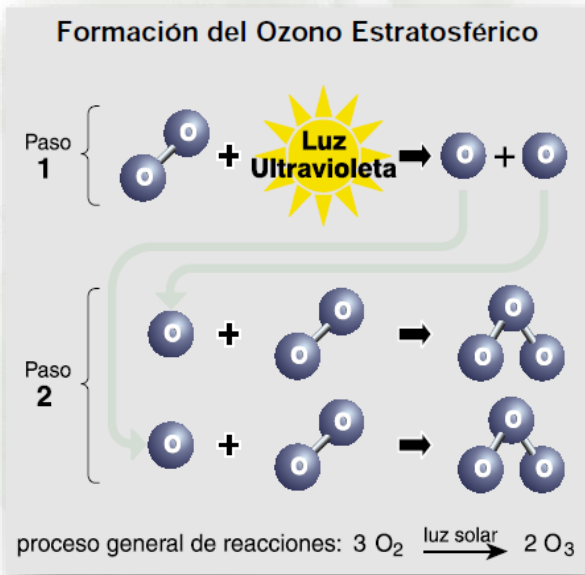


Figura 6. Esquema de formación del ozono atmosférico. Fuente: NOAA.

Estas reacciones se llevan a cabo en forma continua en presencia de radiación ultravioleta; la producción de ozono es balanceada por su destrucción en las mismas reacciones químicas. Este balance está determinado por la cantidad de gases reactivos, compuestos por cloro y bromo principalmente y la efectividad de sus reacciones, que dependen de la intensidad de la radiación solar, ubicación en la atmósfera, temperatura y otros factores. Sin embargo, en la estratósfera existe una gran cantidad de sustancias químicas naturales y generadas por el hombre, principalmente gases compuestos por cloro y bromo, que reaccionan con las moléculas de ozono, destruyéndolas para formar otros compuestos químicos.

Condiciones necesarias para la formación del agujero de ozono

Para que se produzca el agotamiento de la capa de ozono durante la primavera sobre el Polo Sur se necesitan las siguientes condiciones atmosféricas: Presencia de gases halogenados (CFCs, HCFC), aislamiento de la estratósfera polar (vientos intensos alrededor del Polo), bajas temperaturas en la estratósfera (en consecuencia del aislamiento del polo con latitudes mas bajas donde las temperaturas son mas altas) y formación de Nubes Estratosféricas Polares (NEPs, se forman cuando la temperatura baja de los -78° C y son las principales destructoras del ozono (Figura 7).

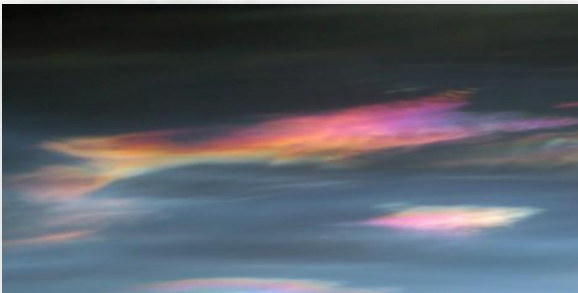


Figura 7. Nubes estratosféricas Polares.

3. Monitoreo del agujero de ozono Antártico.

Anomalía de temperatura y viento en la estratósfera

La figura 8 muestra la anomalía de temperatura en la estratósfera entre septiembre y noviembre de 2021. En ella se observa un marcado núcleo de anomalías negativas sobre la estratósfera polar, justamente sobre territorio antártico. Los valores negativos de anomalía superan los 10°C en el centro del continente antártico. El resto del hemisferio sur también se observó con temperaturas más frías de lo normal, sin embargo estas no fueron tan bajas como sobre el polo.

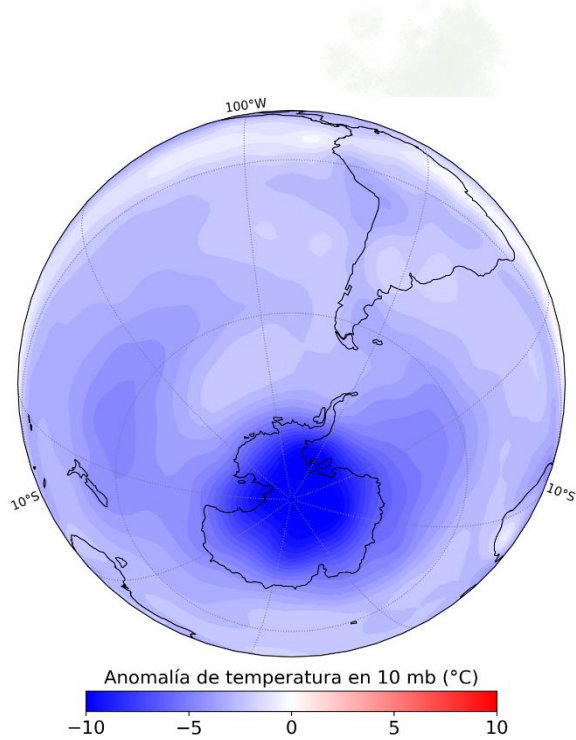


Figura 8. Anomalía de temperatura en los 10 mb durante septiembre, octubre y noviembre de 2021. Período de referencia para el cálculo de anomalía 1981-2010. Fuente: Reanálisis NCEP/NCAR.

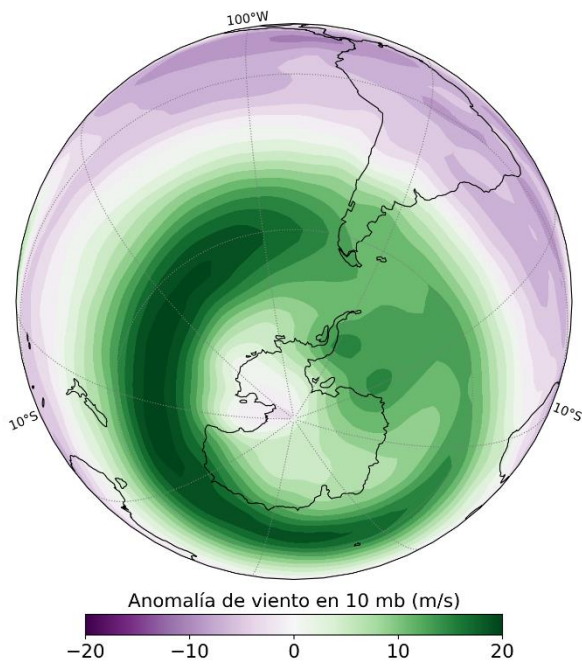


Figura 9. Anomalía de viento zonal en los 10 mb durante septiembre, octubre y noviembre de 2021. Período de referencia para el cálculo de anomalía 1981-2010. Fuente: Reanálisis NCEP/NCAR.

La anomalía de viento en 10 mb para el período de septiembre a noviembre de 2021 se puede apreciar en la figura 9. Se distingue un marcado núcleo de anomalías positivas de viento alrededor del polo, esto evidencia que los vientos del oeste están mas intensos de lo normal en esa zona. Los valores positivos de anomalía superan los 20 m/s en el borde del continente antártico. En el resto del hemisferio sur, en latitudes mas bajas, la situación fue diferente ya que se registraron anomalías de viento negativas, lo que significa un debilitamiento de los vientos del oeste.



Temperaturas en la estratósfera

Las temperaturas en la estratósfera polar (Figura 10) superaron su mínimo de invierno a fines de julio, pero permanecieron por debajo del umbral de -78°C para formación de NEPs\* Tipo I hasta inicios de noviembre y del Tipo II entre junio y septiembre. En general las temperaturas estuvieron en torno a valores normales hasta mediados de agosto. Entre septiembre y octubre no aumentaron como lo hacen normalmente, mas bien se mantuvieron por **debajo los valores normales**. En noviembre continuaron bastante bajas hasta mediados de mes, **para luego aumentar rápidamente hasta alcanzar valores normales para la época**.

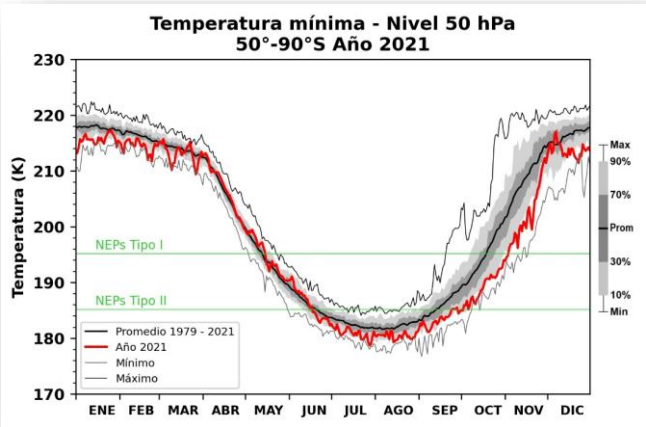


Figura 10. Temperatura mínima registrada entre los 50° y 90°S al nivel de 50 hPa (línea roja). Fuente: NASA-MERRA 2.

Corriente en chorro polar

El continente antártico está rodeado por una fuerte corriente de chorro en la estratósfera (por encima de 12 km o 39.000 pies), que fluye alrededor de la Antártida en el sentido de las agujas del reloj. Esta corriente de chorro aísla el aire sobre la Antártida, del de latitudes medias.

\*NEPs: Nubes Estratosféricas Polares

La región polar delimitada por esta corriente de chorro se denomina *vórtice polar antártico*. Un flujo de chorro más intenso produce un mayor aislamiento del aire polar (disminuye la mezcla), razón por la que el aire dentro del vórtice polar antártico es también mucho más frío que el aire de latitudes medias.

Durante el año 2021 (Figura 11) el viento asociado al chorro polar osciló en rangos esperados hasta el mes de agosto, sin embargo, hacia fines del mes un aumento sostenido en la intensidad **permitió que los registros se mantuvieran por sobre lo normal para la época hasta diciembre**, alcanzando valores históricos desde que se tienen registros.

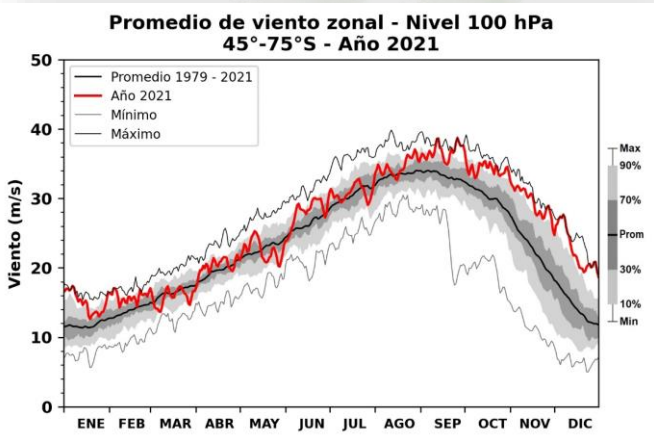


Figura 11. Viento zonal entre los 45° S y 75° S en el nivel de 100 hPa, expresado en m/s. Fuente: NASA

Estabilidad del vórtice polar

El flujo longitudinal medio de calor, entre los 45° S y los 75° S es un indicativo del grado de perturbación de la atmósfera. En la Figura 12, se puede observar que entre octubre y noviembre, los meses donde se espera un mayor flujo de calor (valores mas negativos), durante el año 2021 esto no ocurrió, el flujo fue muy débil hacia el vórtice polar (valores menos negativos) desde fines de septiembre hasta comienzos de diciembre, alcanzando, por momentos, valores históricos para la época. **Por lo anterior, el vórtice tuvo gran estabilidad y mayor duración.** Otro peak de flujo de calor debilitado se registró entre junio y julio.

# OZONO ESTRATOSFÉRICO Y RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

## AÑO 2021

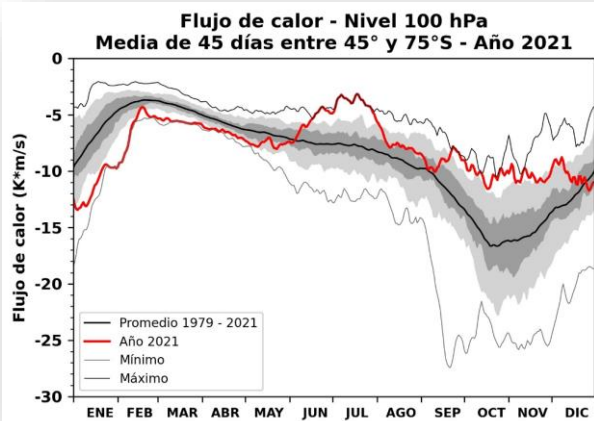


Figura 12. Flujo longitudinal de calor en el nivel de 100 hPa, expresado en K\*m/s. Mientras mas negativos los valores, mayor flujo de calor. Fuente: NASA

### Déficit de masa de ozono

El déficit de masa de ozono (Figura 13) corresponde a la cantidad de este gas, en millones de toneladas, que es necesario agregar al agujero para alcanzar el valor umbral de 220 UD.

En septiembre, un rápido aumento en el déficit de masa de ozono elevó el valor máximo a 36 millones de toneladas hacia finales del mes. Entre mediados de octubre y fines de diciembre, el déficit de masa de ozono se mantuvo por sobre el percentil 90 de los valores climatológicos durante gran parte del tiempo, acercándose a valores históricos durante los primeros días de noviembre.

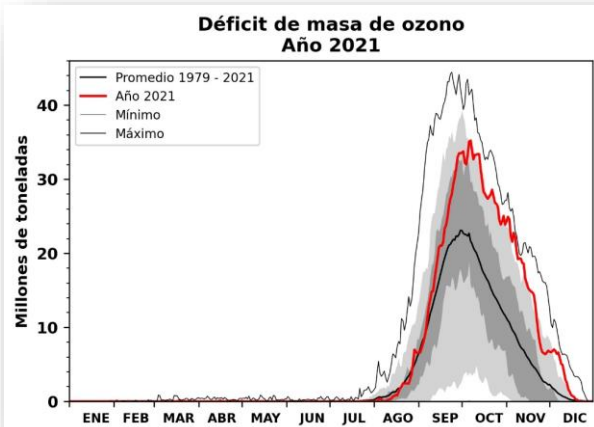


Figura 13. Déficit de masa de ozono, en unidades de millones de toneladas. Fuente: NASA

### Área y volumen de NEPs

El máximo tamaño de NEPs ocurrió en agosto con cerca de 30 millones de km<sup>2</sup>. Prácticamente durante todo su ciclo, los valores de área de NEPs estuvieron por sobre el promedio, agudizándose este escenario entre julio y agosto, y septiembre y octubre (Figura 14). Estos valores lograron posicionarse, en algunas ocasiones del año 2021, como valores máximos históricos.

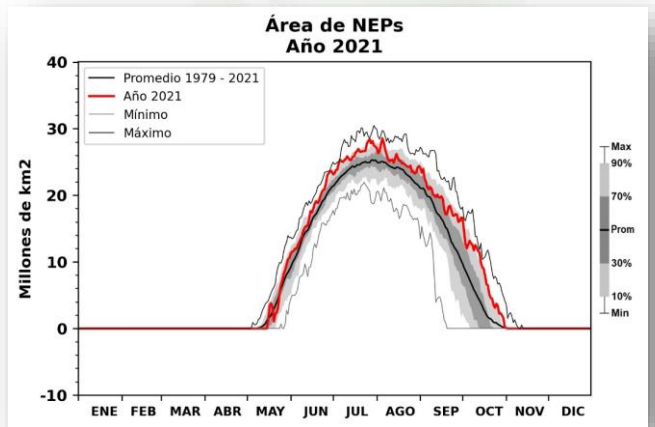


Figura 14. Área de Nubes Estratosféricas Polares Tipo I. Fuente: NASA

Al monitorear el volumen NEPs, se observa que se mantuvo cercano a la media de largo plazo hasta el mes de mayo, mientras que entre junio-julio y septiembre-octubre los valores estuvieron por sobre la media. El volumen máximo se alcanzó a inicios de agosto con aproximadamente 330 millones de km<sup>3</sup> (Figura 15).

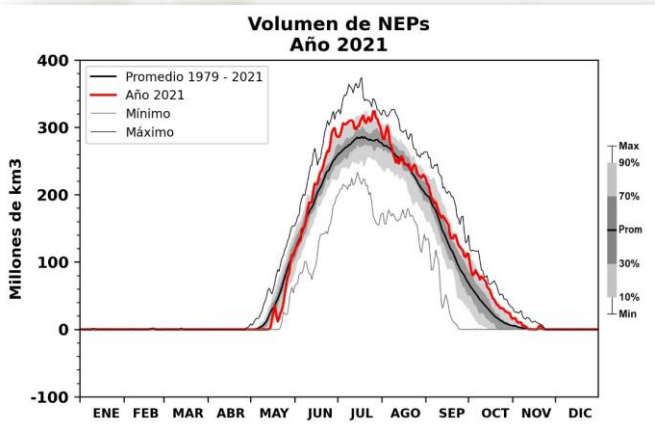


Figura 15. Volumen de Nubes Estratosféricas Polares, Tipo I. Fuente: NASA



4. Consecuencias del agotamiento de ozono en la radiación UV

La Figura 16 muestra que durante septiembre y octubre la disminución de Ozono no tuvo gran impacto en el aumento de los valores de Índice Ultravioleta. Los aumentos que se produjeron en las distintas ciudades del país están más bien asociados a las condiciones naturales durante la época, donde los valores de Índice UV aumentaron acorde a la estacionalidad de la zona.

Durante noviembre, entre los días 15 y 17, el paso de una elongación del Agujero de Ozono sobre Punta Arenas elevó los valores de Índice Ultravioleta entre 1 y 2 unidades por sobre lo esperado, alcanzando 10 unidades de índice UV.

Pese al gran tamaño y profundidad que ha alcanzado el Agujero de Ozono durante su ciclo 2021, esto no tuvo impacto en el aumento de los valores de Índice Ultravioleta en las ciudades del sur del país. Los registros alcanzados en rangos Muy Alto y Extremo son acordes a la época del año.

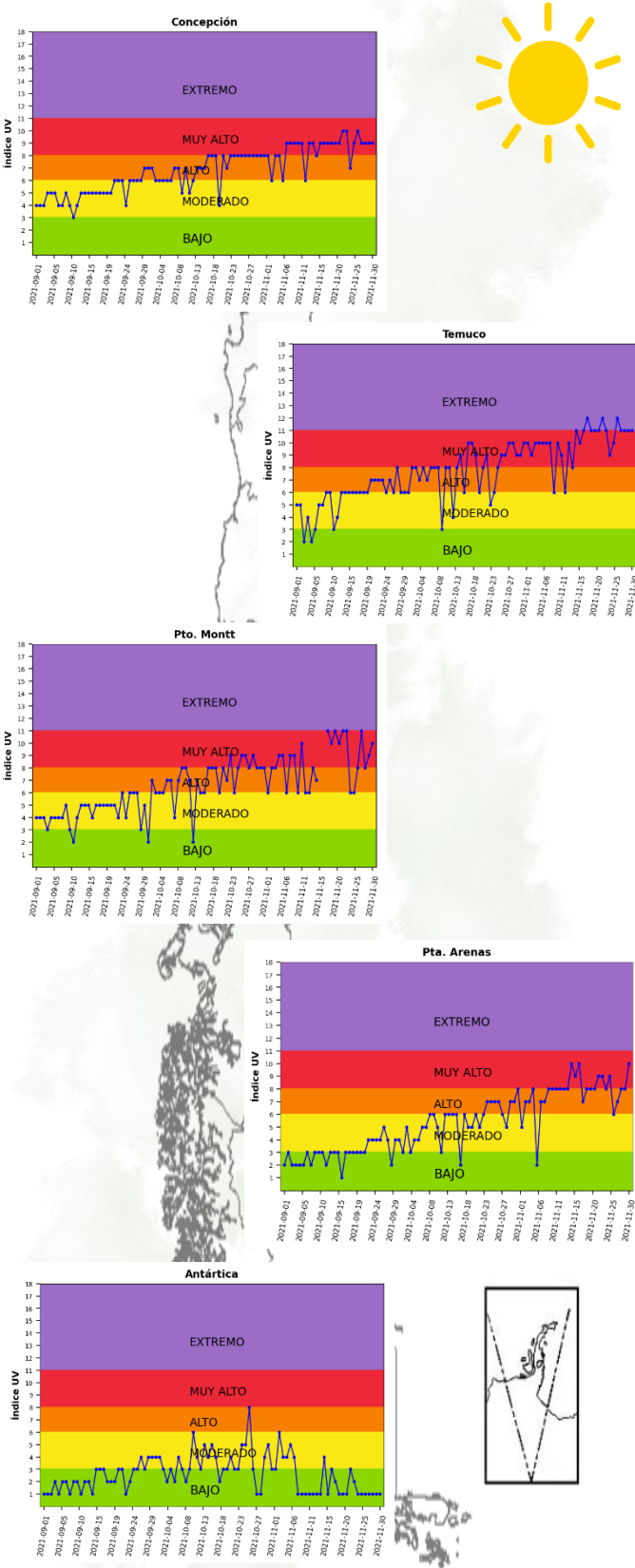
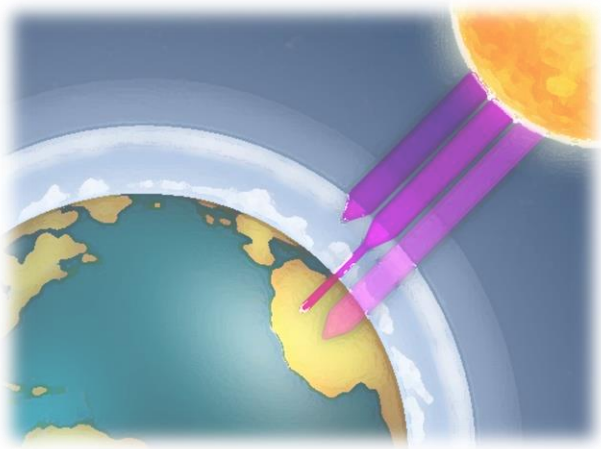


Figura 16. Valores de Índice Ultravioleta durante septiembre a noviembre de 2021 en ciudades del sur del país. Fuente: DMC

5. Observaciones generales

los valores del área del Agujero de Ozono estuvieron en torno a valores normales de su ciclo hasta fines de agosto, sin embargo durante septiembre, octubre y parte de noviembre se ha manifestado mucho mas grande de lo habitual, bordeando los 20 millones de km2 a comienzos de noviembre, valor que es muy alto para la época. Esta situación es muy similar al ciclo registrado durante el año 2020. Por otro lado, el proceso de cierre fue lento y tardío.

En general las **temperaturas estuvieron por debajo de los valores normales, incluso por momentos acercándose a valores mínimos históricos para la época**, situación que condicionó directamente en la evolución del Agujero de Ozono 2021.

La Figura 17 muestra la evolución del agujero durante el año 2021, los tonos azules corresponden al área dónde los valores de columna total de ozono están por debajo las 220 DU, umbral que define el área del agujero de ozono.

Durante octubre, noviembre y diciembre todas las condiciones fueron favorables para que el agujero de ozono se mantuviera con una mayor área de lo habitual, y además, extendiera su ciclo hasta fines de diciembre. **Desde octubre en adelante, los valores del tamaño del agujero se mantuvieron por sobre el percentil 90, incluso cercano a los registros históricos en algunos períodos de su ciclo.**

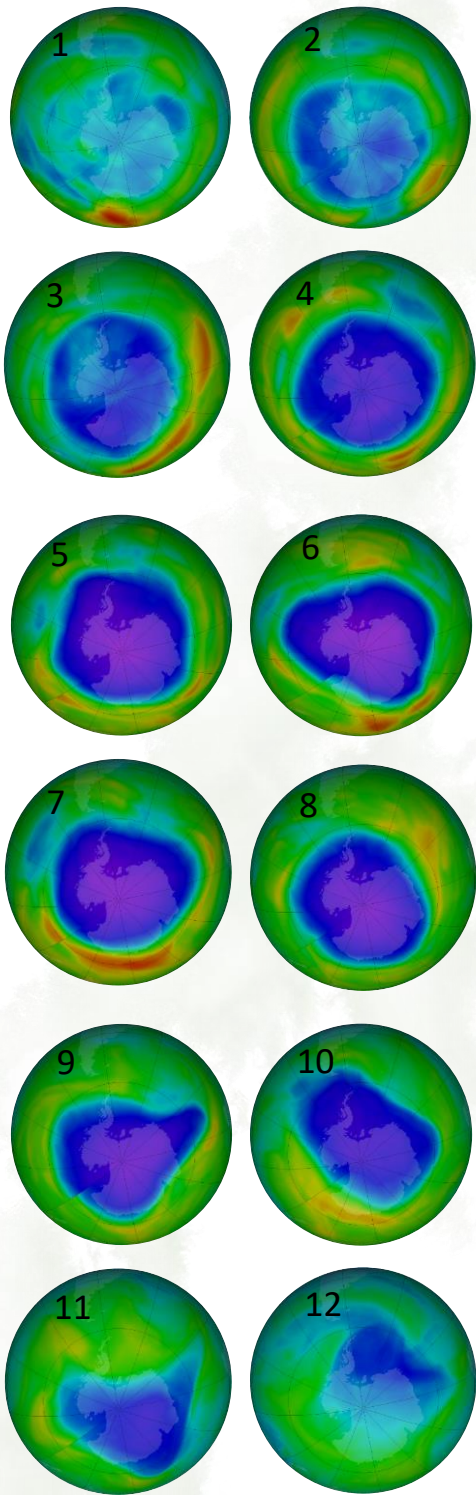


Figura 17. Columna de ozono total para los días 1) 01-agosto, 2) 15-agosto, 3) 30-agosto, 4) 15-septiembre, 5) 30-septiembre, 6) 5-octubre, 7) 15-octubre, 8) 30-octubre, 9) 05-noviembre, 10) 15-noviembre, 11) 30-noviembre y 12) 15-diciembre de 2021. Fuente: NASA.



## 6. Referencias

- Fahey, D. *Veinte Preguntas y Respuestas sobre la Capa de Ozono*. Documento basado, en la evaluación científica del agotamiento de ozono 2002, NOAA.
- Ozone Hole Watch. National Aeronautics and Space Administration. Goddard Space Flight Center  
<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/>
- <https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer>
- Red Radiométrica DMC. Datos de Índice UV.
- Total Ozone Mapping Spectrometer-Earth Probe (TOMS-EP), NASA. Datos de columna de ozono diarios.
- <https://blog.meteochile.gob.cl/>

