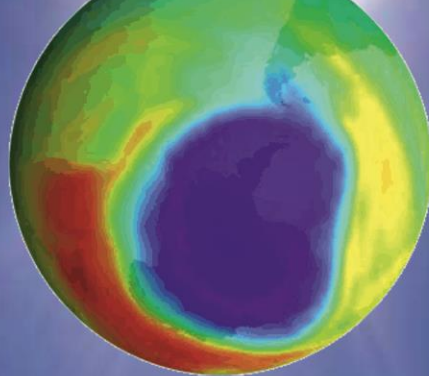




BOLETÍN ANUAL

OZONO ESTRATOSFÉRICO Y RADIACIÓN ULTRAVIOLETA
EN LA PENÍNSULA ANTÁRTICA



Dirección General
de Aeronáutica Civil



Dirección Meteorológica de Chile
Subdepartamento de Climatología
y Meteorología Aplicada

Índice	Pág.
Introducción	1
I. La capa de ozono, la radiación UV y su interacción.	2
Formación del Ozono.	
Protocolo de Montreal.	4
Distribución global del ozono.	5
Proceso de agotamiento del Ozono Estratosférico	
Condiciones necesarias para la formación del agujero de la Capa de ozono.	6
II. Monitoreo de la Capa de Ozono en la Región Antártica año 2015.	8
Temperaturas estratosféricas.	
Área de las NEPs.	9
Estabilidad del Vórtice.	10
Agujero de ozono y déficit de Masa.	
Radiación ultravioleta v/s Concentración de ozono.	11
III.- Observaciones Generales.	14
IV.- Referencias	15

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. Las altas concentraciones de clorofluorocarbonos y otros contaminantes atmosféricos agotadores del ozono estratosférico, conocidos como SAOs fueron los principales responsables de este efecto.

La pérdida global de ozono estratosférico se calcula en torno a un 3 %, lo cual 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 una medida global basada en normativas en el control del uso de las sustancias químicas nocivas para la capa de ozono. A diferencia de otros acuerdos internacionales, el Protocolo de Montreal ha sido exitoso, demostrándose ya en el informe conjunto de la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente “Evaluación científica de la disminución del Ozono, año 2014”, que las medidas aplicadas han permitido avanzar en la recuperación de la capa de Ozono.

Dicha evaluación se ha realizado con información que periódicamente se ha obtenido a partir de la observación de la atmósfera antártica desde el año 1979.

El presente boletín muestra los resultados de las observaciones realizadas durante el año 2015 por la NASA, el Instituto Real de Meteorología de Holanda (KNMI) y la información de radiación ultravioleta medida por las estaciones Carlos Ibáñez del Campo y Presidente Frei.

I. La capa de ozono, la 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 οζειν (ozein), que significa oler.

Es de muy baja concentración, solo se pueden observar 3 moléculas de ozono por millón de moléculas de aire. En 1920, el científico Gordon Dobson inventó un instrumento para medir el ozono atmosférico. Se determinó entonces que una unidad Dobson es equivalente a $2,69 \times 10^{16}$ molec/cm².

El conocido ozono bueno (Fig1) 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.

Un 10% del ozono se concentra en la tropósfera (ozono malo), la capa atmosférica más cercana a la superficie, sin embargo a este nivel es un gas tóxico para la salud humana. Se genera esencialmente de la contaminación vehicular.

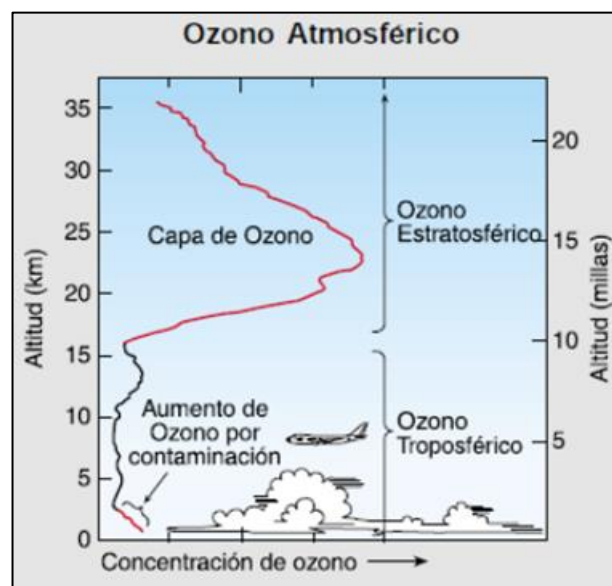
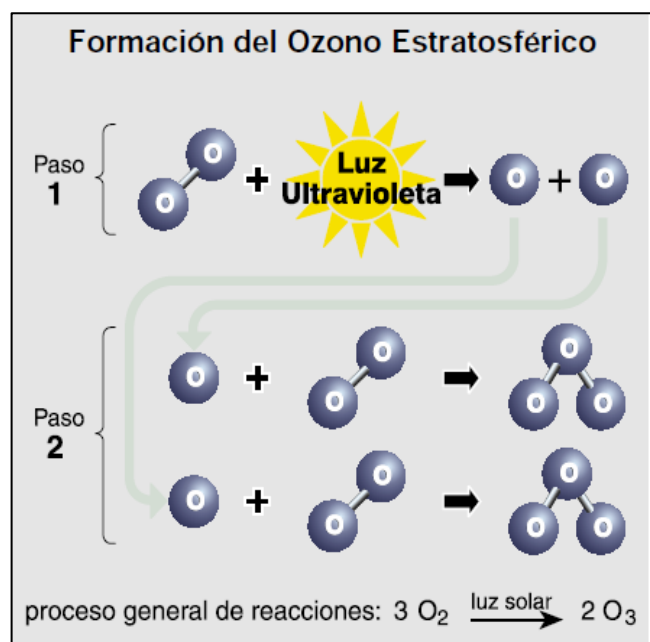


Fig. 1 Perfil de ozono atmosférico.

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 (O₂) para producir 2 átomos de oxígeno (2O), luego cada átomo se combina con una molécula de oxígeno para producir una molécula de ozono (O₃).

Estas reacciones se llevan a cabo en forma continua en presencia de radiación ultravioleta, y 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 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



Protocolo de Montreal

A mediados de la década de 1970, por medio de las observaciones atmosféricas, se constató la disminución primaveral de la capa de Ozono, siendo más severa sobre la Antártida, donde se conoce como agujero de la Capa de Ozono.

Dicha disminución es consecuencia de la alta concentración de clorofluorocarbonos y otros contaminantes atmosféricos agotadores del ozono estratosférico, inyectados a la atmósfera especialmente por la industria química de la refrigeración, aire acondicionado, aerosoles, pesticidas, y la industria de la limpieza. Estos contaminantes son conocidos como sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAOs, de sus siglas en inglés). La pérdida global de ozono estratosférico se calcula en torno a un 3 %, lo cual 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 (Fig.2) como una medida global basada en normativas en el control del uso de las sustancias químicas nocivas para la capa de ozono, protocolo que ha sido exitoso, a diferencia de otros acuerdos internacionales, demostrándose ya en el informe conjunto de la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente "Evaluación científica de la disminución del Ozono, año 2014", que las medidas aplicadas han permitido avanzar en la recuperación de la capa de Ozono. Dicha evaluación se ha realizado con información que periódicamente se ha obtenido a partir de la observación desde el año 1979.

El Protocolo de Montreal tiene por objetivo la disminución de las concentraciones de Cloro y Bromo en la estratósfera. Sin el Protocolo, las sustancias halógenas estratosféricas habrían tenido un aumento significativo durante el siglo XXI.

El cuidado de la Capa de Ozono depende entonces, principalmente de la contribución de cada país firmante en cuanto a la disminución del uso y generación de sustancias químicas agotadoras del ozono y del constante monitoreo global de la atmósfera, en especial de las zonas cercanas a los Polos.

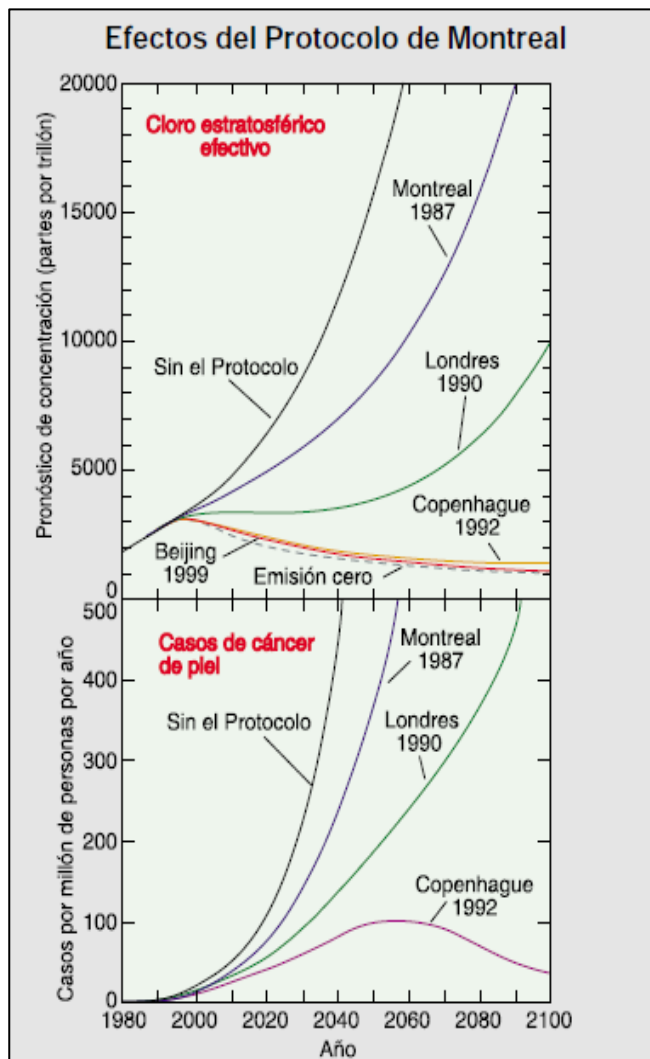


Fig. 2 Pronóstico de las concentraciones de cloro efectivo en la estratósfera 1) sin protocolo, 2) con protocolo de Montreal y 3) con Protocolo de Montreal, sus ajustes y enmiendas.

Dentro de los emitidos en forma natural, el cloruro de metilo es el mayor responsable de la inyección de cloro, con respecto a las de origen antrópico, los clorofluorocarbonos CFC's son los más abundantes.

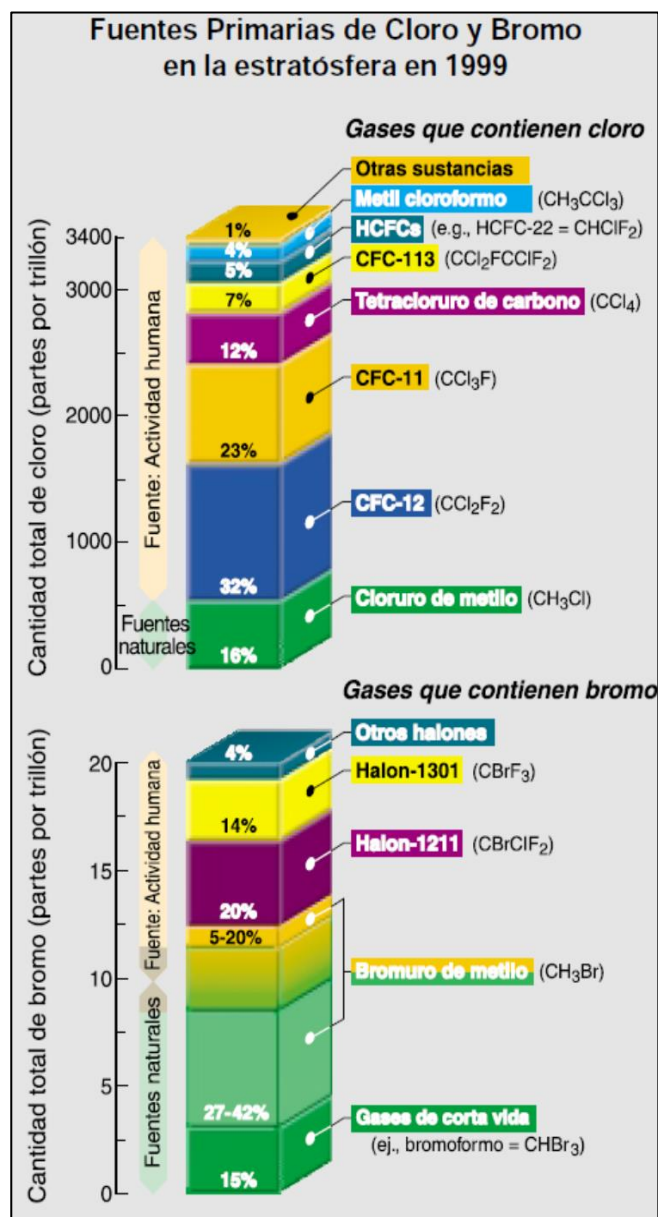


Fig. 3 Fuentes de gases estratosféricos. Compuestos halógenos emitidos por procesos naturales y por la actividad del hombre.

Varios compuestos halógenos generados tanto por fuentes naturales (emisiones volcánicas) como por la actividad del hombre, son transportados en forma de cloro y bromo hacia la estratósfera,

Distribución global del ozono.

La cantidad de ozono varía con la latitud (Fig. 4). Los niveles más altos se encuentran en latitudes medias y altas, debido a la circulación atmosférica, que traslada el contenido de aire tropical con bastante contenido de ozono a zonas polares en otoño e invierno. El valor más bajo total, sin considerar el agujero de la capa de ozono se observa en los trópicos, donde esta capa es más delgada.

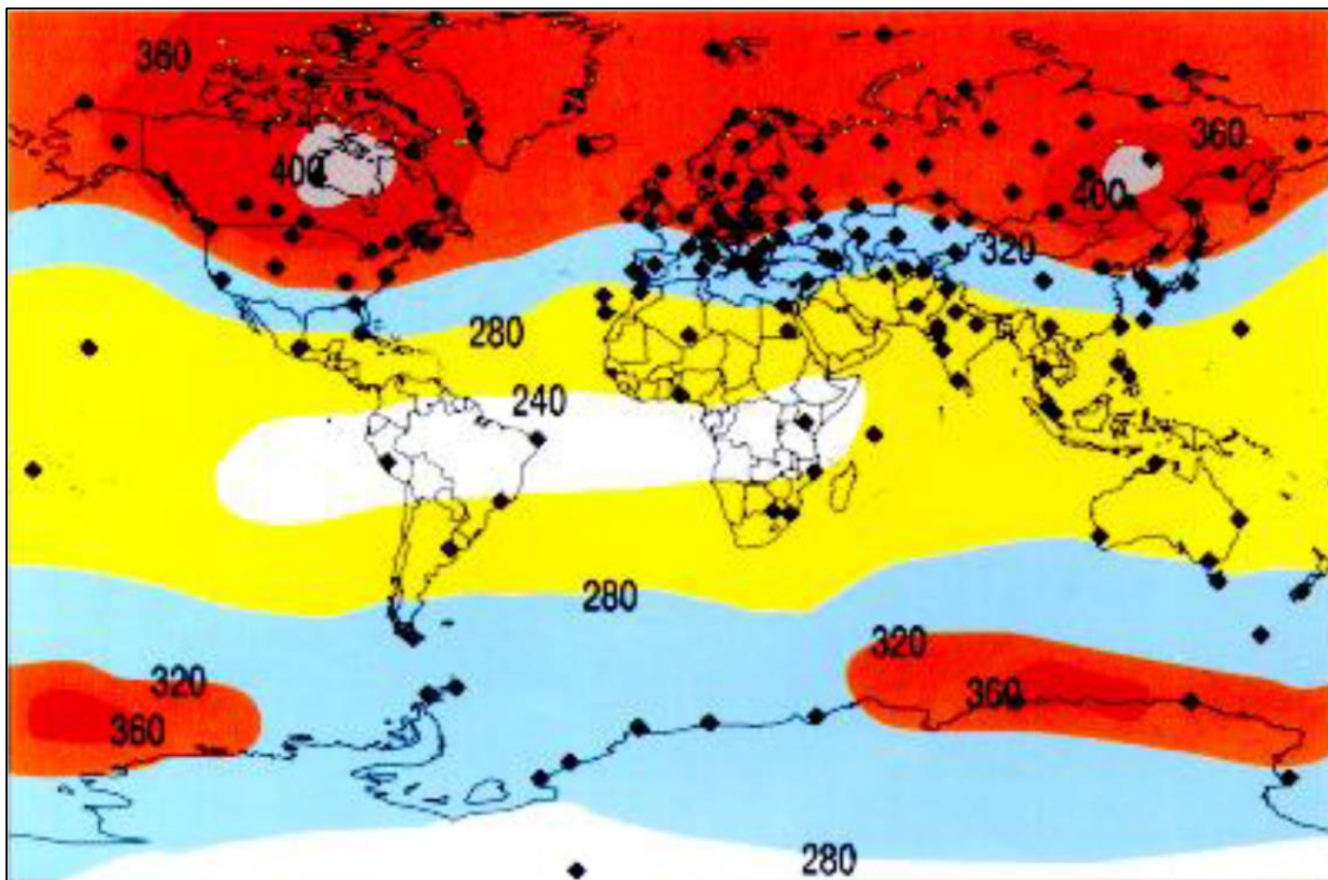


Fig. 4 Distribución media global del ozono en la estratosfera en unidades Dobson (UD). Fuente GAW. OMM.

Proceso de agotamiento del Ozono Estratosférico

Emisión, acumulación y transporte. El proceso comienza con la emisión de gases de fuentes de halógeno, manufacturados, en la superficie, tales como los que contienen cloro y bromo y que son liberados a la atmósfera por las diferentes actividades humanas. Estas sustancias se acumulan en la tropósfera y se distribuyen y transportan por la circulación, conocida como Brewer -

Dobson hacia la estratosfera.

Conversión, reacción y destrucción. Una vez que los gases fuentes de halógeno llegan a la estratosfera, se convierten en halógenos reactivos, por la acción de la radiación ultravioleta, tales como monóxido de cloro (ClO) y monóxido de Bromo (BrO). A su vez, estos gases reaccionan químicamente con el ozono, destruyéndolo. En los polos, la presencia de nubes estratosféricas polares aumenta considerablemente la concentración de los gases de halógeno reactivos, por lo que el ozono se agota tanto en invierno,

como en primavera. La gran circulación, luego de varios años, lleva los gases halógenos reactivos hacia la tropósfera, donde son convertidos químicamente (conversión troposférica), o removidos por precipitaciones y depositados sobre la superficie

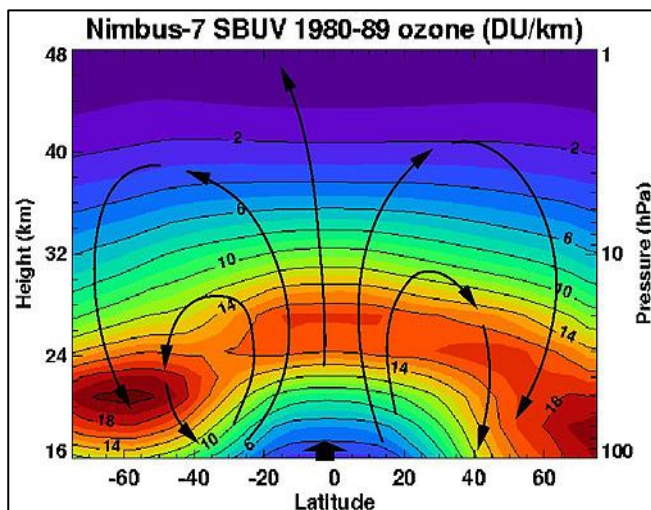


Fig. 5 Circulación Brewer – Dobson.

La vida atmosférica o tiempo necesario para eliminar o convertir el 60% de un gas, varía entre menos de un año a 100 años, en los principales gases que contienen cloro y bromo. Las sustancias emitidas de vida más corta son mayoritariamente destruidas en la tropósfera, por lo que solo una parte de ellas contribuyen al agotamiento de la capa de ozono.

Condiciones necesarias para la formación del agujero de la Capa de ozono.

Distribución de los gases halogenados.

Los gases de fuentes de halógenos se distribuyen a lo largo de la estratósfera en ambos hemisferios, a pesar que las mayores emisiones se encuentran en el Hemisferio norte.

Condiciones de aislamiento. Durante los meses de invierno, el aire de la estratósfera

polar sufre una suerte de aislamiento relativo, debido a los fuertes vientos que la circundan, evitando el intercambio de aire con las regiones estratosféricas de latitudes medias. Este aislamiento es más efectivo en la Antártida, siendo más prolongado.

Bajas temperaturas estratosféricas.

Durante los meses de invierno, las temperaturas del aire de la estratósfera baja, en ambos polos, alcanzan valores mínimos del orden de -90°C en julio y agosto en la Antártida y de -80°C durante los meses de enero y febrero en el Ártico. La diferencia entre las temperaturas de ambos polos se debe a la desigual distribución continental y oceánica, tierras bajas y montañas. La condición de aislamiento permite que las bajas temperaturas estratosféricas se mantengan por mayor tiempo.

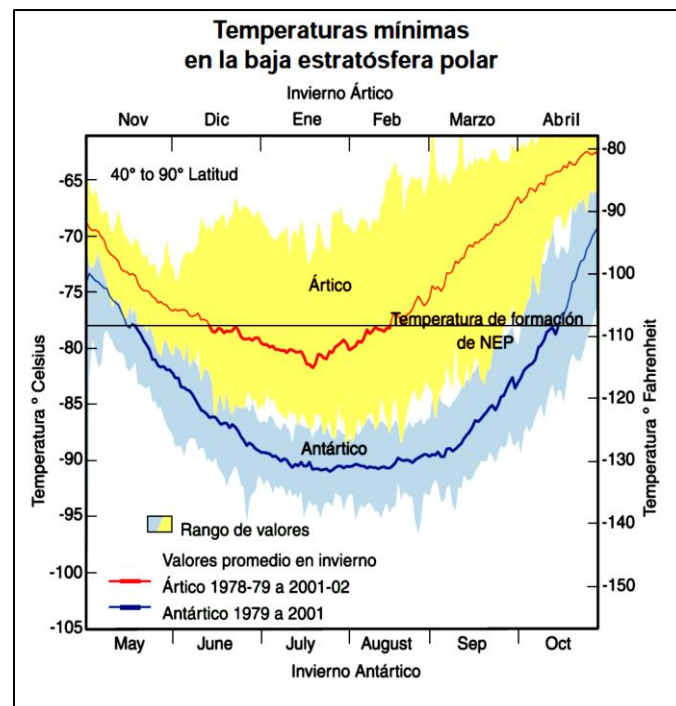


Fig. 6 Temperaturas mínimas estratosféricas de ambos polos. Se definen los valores umbrales para la formación de NEPs.

Nubes Estratosféricas Polares (NEPs). Se forman cuando la temperatura de la estratósfera polar se encuentra por debajo de los -78°C . A estas temperaturas el ácido nítrico (HNO_3) y sustancias sulfuradas se condensan con el vapor de agua para formar partículas sólidas y líquidas, las cuales crecen hasta formar nubes que son visibles desde la superficie terrestre, en especial cuando el sol está sobre el horizonte.

Dada su composición, las NEPs causan cambios en la concentración de los reservorios de sustancias de cloro reactivo, como nitrato de cloro (ClONO_2) y cloruro de hidrógeno HCl , transformándose en formas más reactivas para producir monóxido de cloro (ClO). Con el aumento del ClO , ciclos de reacciones catalíticas que involucran tanto ClO como al monóxido de bromo BrO , aceleran la destrucción química del ozono en presencia de luz solar.

Una vez que las temperaturas se elevan llegada la primavera, cesa la formación de NEPs y finaliza la producción de ClO .

Existen 2 tipos de NEPs, las Tipo II y las Tipo I. Las de Tipo II corresponden a nubes nacaradas, nubes de onda compuestas por cristales de hielo, que se forman a temperaturas por debajo de los -85°C . A menudo se encuentran a sotavento de las cordilleras, las que inducen las ondas de gravedad en la estratósfera inferior. Sus formas similares a una hoja ondulan lentamente y se extiende. Estas nubes también pueden estar asociadas con fuertes vientos superficiales que pueden indicar la presencia de vientos y ondas en la estratósfera.

Las nubes Tipo I en tanto, se presentan de formas más difusas. Se generan bajo los -75°C y se dividen en tres grupos según su composición: Tipo Ia, nubes cristalinas compuestas agua y ácido nítrico, principalmente en la forma de ácido nítrico trihidrato, más conocido como NAT, Tipo Ib, pequeñas gotas compuestas de una solución de ácidos nítrico y sulfúrico y las Tipo Ic compuestas de pequeñas partículas metaestables de ácido nítrico en fase acuosa.



Fig. 7 Nubes estratosféricas Polares.

II. Monitoreo de la Capa de Ozono en la Región Antártica año 2015.

La zona donde las concentraciones de ozono son menores a 220 UD, conocida como agujero de ozono presentó durante el año 2015, una de las 3 mayores superficies registradas, 26,9 millones de Km² según mediciones de la NASA. Este valor se obtiene luego de promediar los valores de los 30 días consecutivos con valores mínimos. Un gran, estable y concéntrico vórtice alrededor del polo sur, caracterizado por bajas temperaturas permitió que el agujero del 2015 fuese el más grande desde el año 2006.

Temperaturas estratosféricas.

Los datos MERRA del GMAO¹, mostraron que las temperaturas estratosféricas sobre la Antártica estuvieron por debajo del umbral de temperaturas de las NEPs tipo I de 194.6K desde el 11 de mayo de 2015, y por debajo del umbral de las temperaturas de 187.8 de las NEPs tipo II, desde el 3 de junio, tal como se observa en la fig 8 que muestra las temperaturas mínimas al sur de los 50°S, en los niveles de 10, 50 y 100 hPa.

Asimismo, las temperaturas promedio zonales sobre la región comprendida entre los 60° y 90° de latitud Sur, en los mismos niveles, oscilaron en torno a la media de la serie de tiempo hasta el mes de julio, luego de lo cual se presentaron por debajo de este valor, Fig. 9.

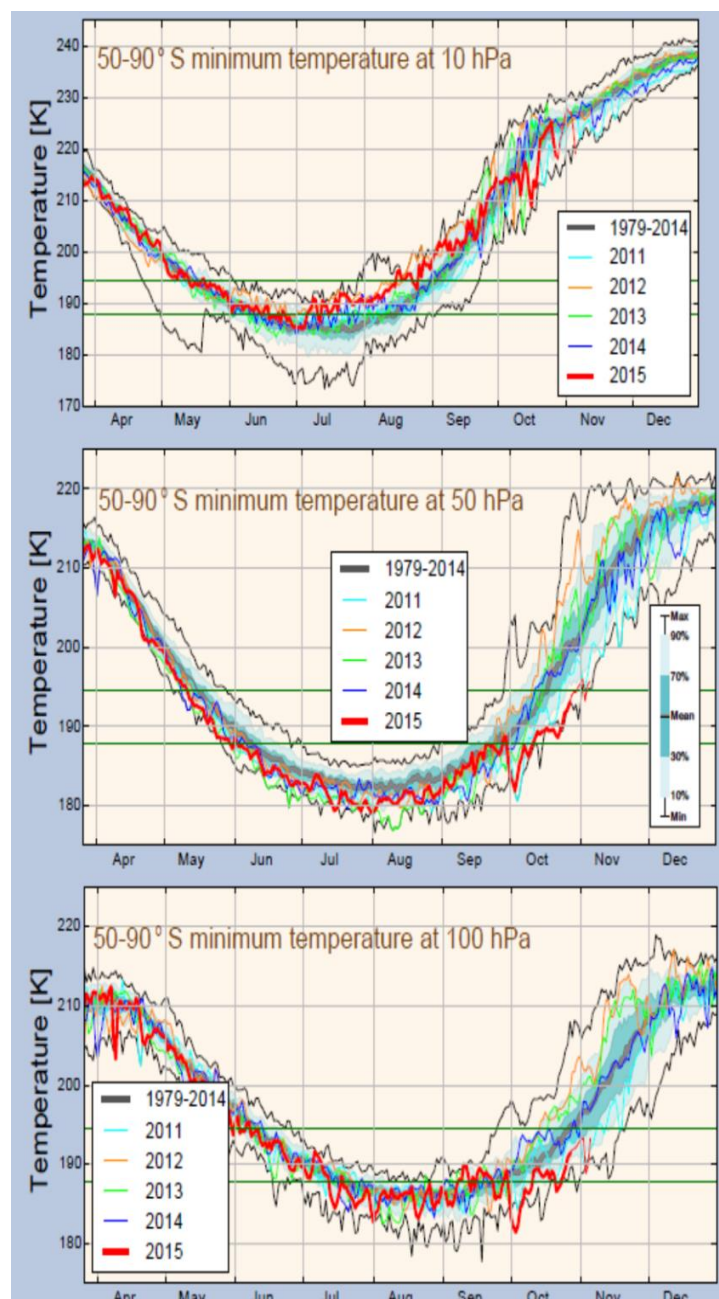


Fig. 8 Temperaturas mínimas estratosféricas a 10, 50, y 100 hPa, entre las latitudes 50° y 90° S.

¹ MERRA: Análisis retrospectivo moderno para investigación y Aplicaciones. GMAO Asimilación de datos del Sistema de Observación de la Tierra.

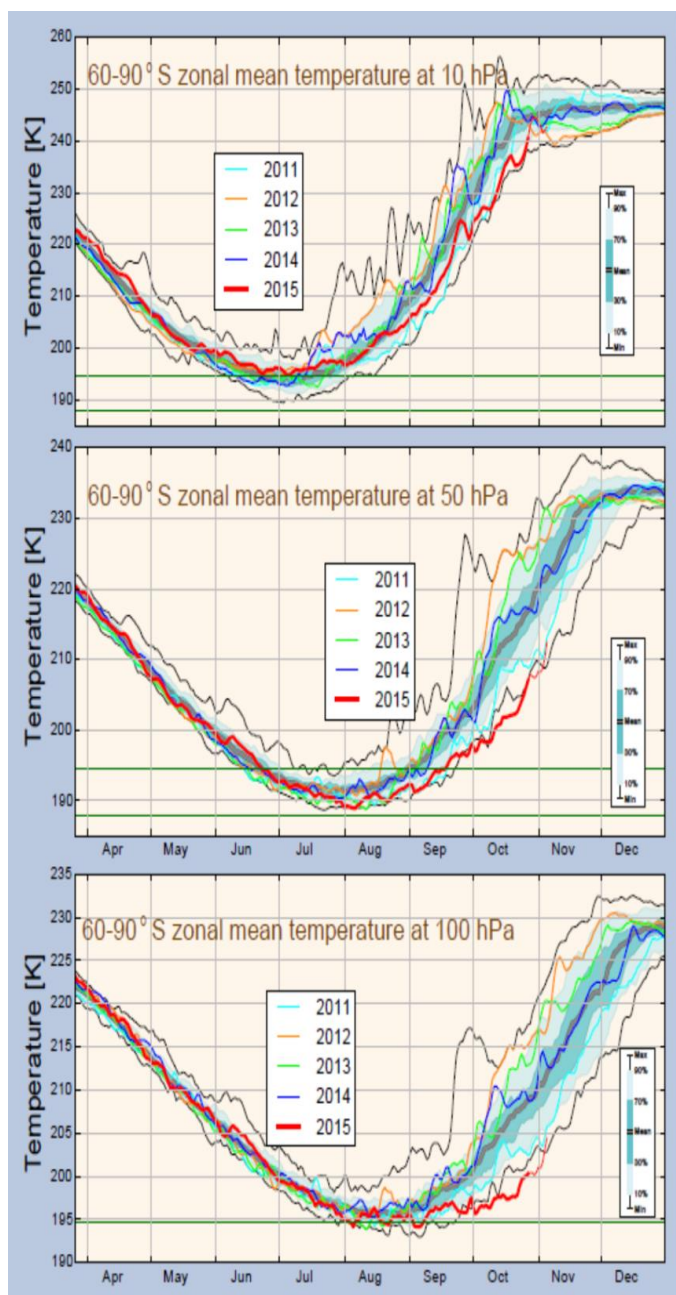


Fig. 9 Temperaturas estratosféricas medias zonales a 10, 50 y 100 hPa entre las latitudes 60° y 90° S.

Área de las NEPs.

Desde el 29 de junio de 2015, las temperaturas suficientemente bajas para la formación del ácido nítrico trihidrato (NAT o NEPs Tipo I) cubrió una superficie mayor a 20 millones de kilómetros cuadrados en el nivel isentrópico de 460 K. Fig 10

encima de la media climatológica. El 5 de agosto alcanzó su máximo estacional, con 28.2 millones de Km². Los valores se mantuvieron sobre la medias hasta el final del período, comenzando noviembre. Sin embargo, al observa la atmósfera de manera continua, a través del volumen de aire donde se encuentran concentradas las temperaturas suficientemente bajas para la formación de NAT, se advierte que el volumen de esta se encontró por debajo del promedio de la serie de tiempo del período 1979 – 2014, entre junio y septiembre, aumentando sobre la media en octubre.

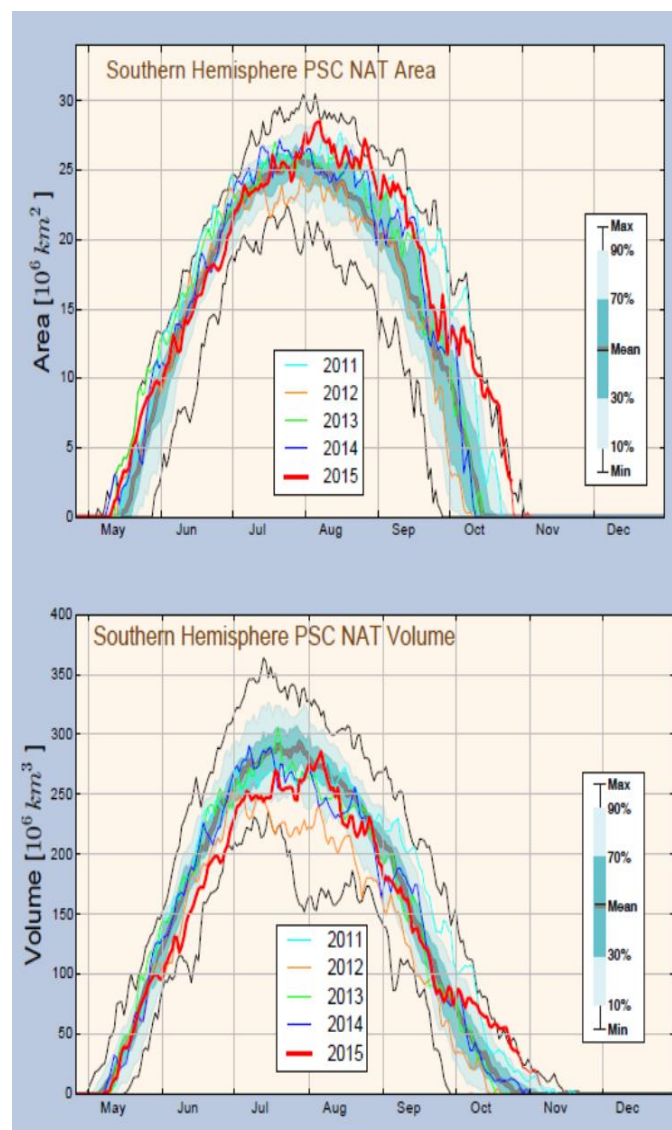


Fig. 10 área de las nubes estratosféricas polares Tipo I.

Estabilidad del Vórtice.

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 fig. 13, se puede observar que durante mayo, la media de 45 días del flujo de calor, en el nivel de los 100 hPa, se encontró por debajo y cercana al valor medio del período 1979 – 2014. Durante julio y agosto fue notablemente menor, aumentando comparativamente en septiembre. En octubre los valores se encontraron cercanos al percentil 90. En conclusión, existió un débil intercambio de calor durante el período, lo que indica un vórtice estable.

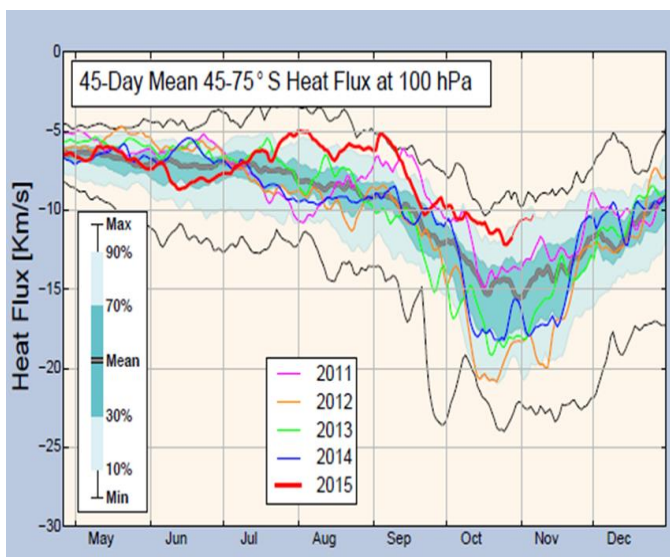


Fig. 11 Flujo longitudinal de calor en el nivel de 100 hPa.

Agujero de ozono y déficit de Masa.

Las observaciones satelitales, realizadas tanto por el Instituto Real de Meteorología de Holanda (KNMI) como por la NASA, mostraron un retraso en la apertura del agujero, con respecto a años anteriores. El área del agujero de ozono creció lentamente durante las tres primeras

semanas de agosto y se incrementó rápidamente durante el mes de septiembre. El área máxima se observó el día 4 de octubre, con un valor de 28,4 millones de Km².

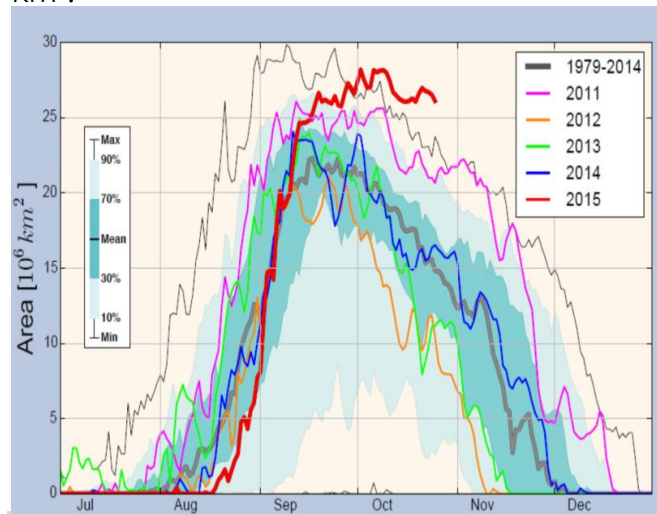


Fig.12 área cubierta por el agujero de la capa de ozono.

El déficit de masa de ozono, 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. Este valor, calculado tanto por el KNMI como por la NASA. Esta pérdida de masa alcanzó su máximo el 9 de octubre de 2015, con 30.8 megatoneladas según el KNMI. Según los análisis de la NASA, el máximo se alcanzó el 10 de octubre, con 37.1 megatoneladas.

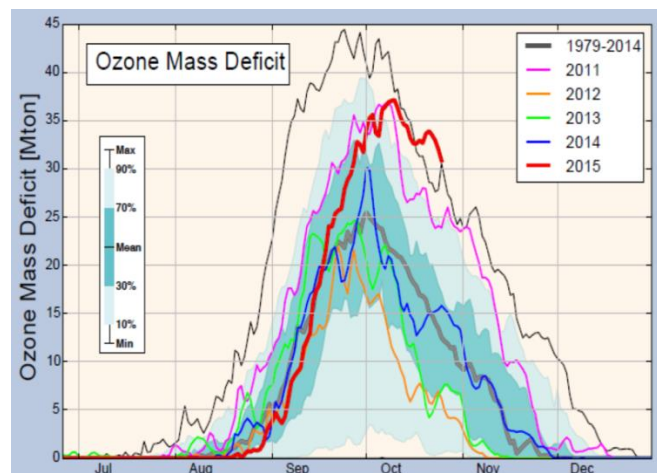
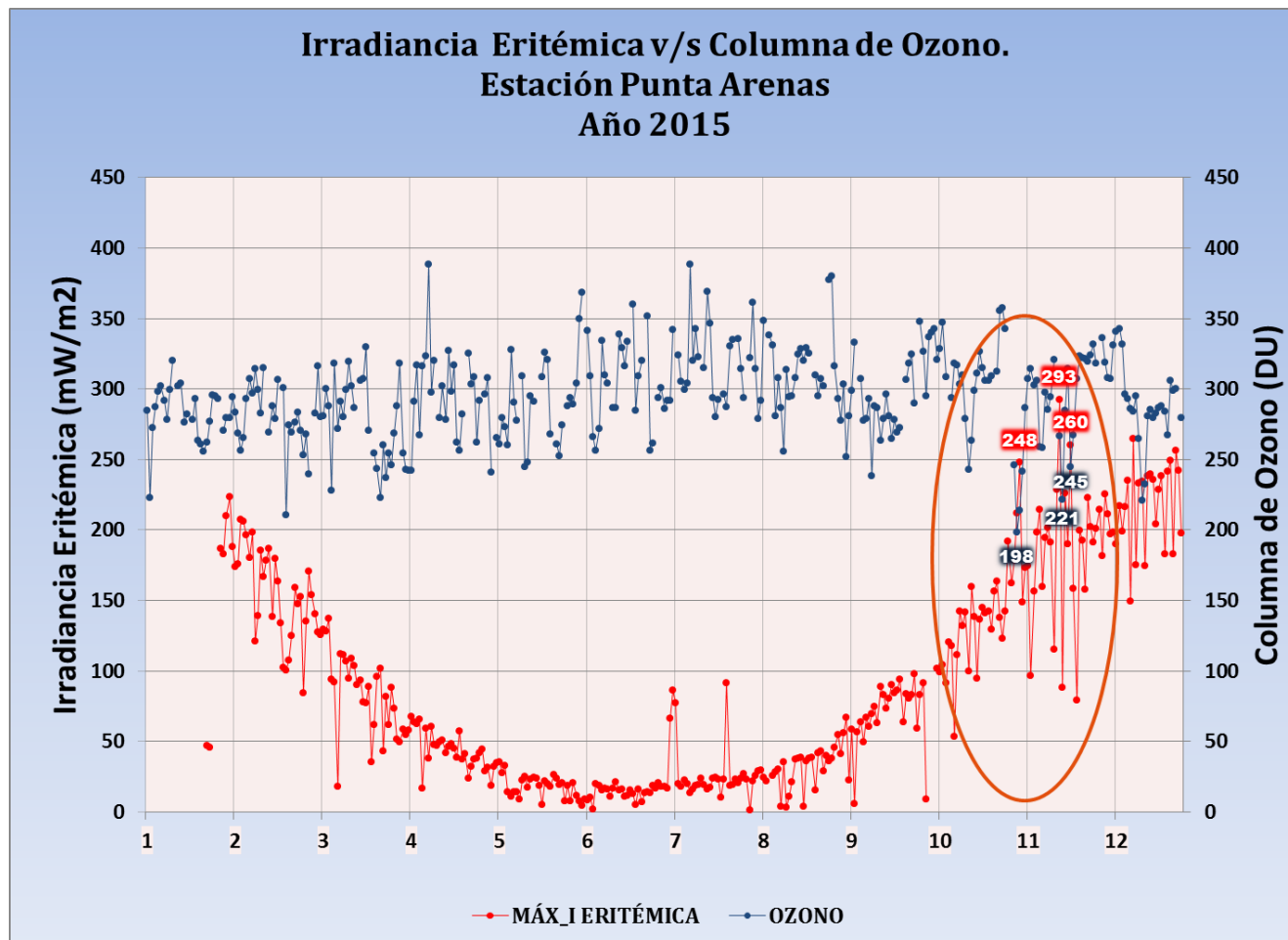


Fig. 13 Déficit de masa de ozono.

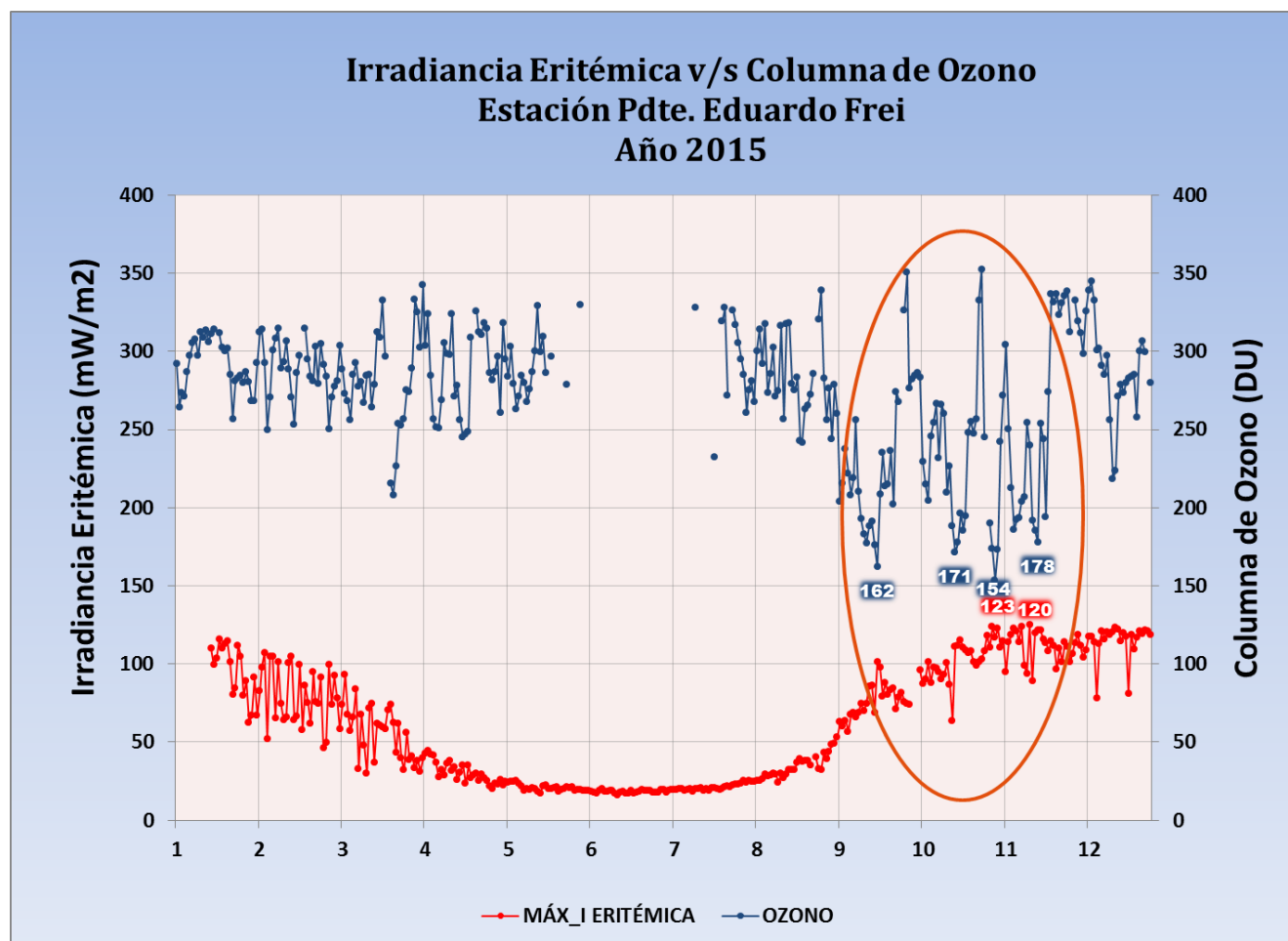
Radiación ultravioleta v/s Concentración de ozono.

Con el fin de monitorear la información de columna de ozono, se obtuvo datos desde el instrumento de monitoreo de ozono (OMI). OMI es un espectrómetro incorporado en el sistema de observación de la Tierra (EOS), del satélite AURA perteneciente a la NASA. Los datos muestran un comportamiento bastante regular, en torno a 300 UD en el caso de Punta Arenas² entre enero y octubre, con un aumento de las concentraciones entre los meses de junio y agosto. A comienzos de noviembre, se observaron 2 días con bajas considerables de ozono, de 198UD (3 de noviembre) y 214UD (4 de noviembre), respectivamente, reflejándose en los valores de irradiancia eritémica de 248 mW/m² (8.5 IUV) y 248 mW/m² (9.9 IUV), valores bastante inusuales para la época y zona geográfica, pero esperables durante eventos de disminución de ozono primaveral. Otros eventos de importancia ocurrieron durante noviembre, con valores de columna de ozono entre 260 y 290 UD, siendo el más importante el día 18 de noviembre, con 267 UD y un valor de Irradiancia eritémica de 293 mW/m² (11,7 IUV), valor más alto registrado por la red DMC, para la zona y época del año.



² Información interpolada para los puntos geográficos definidos por las estaciones meteorológicas Carlos Ibáñez del Campo (Punta Arenas) y Pdte. Eduardo Frei Montalva (Territorio Antártico).

Si bien en Punta Arenas la disminución de ozono no fue tan evidente, si lo fue en la zona antártica, donde se observaron 39 días con valores de columna de ozono menores a 180 UD desde mediados de septiembre hasta mediados de noviembre, momento en que la capa de ozono se recuperó. Sin embargo, dado que durante este período los cielos se presentaron mayormente cubiertos, la irradiancia eritémica no superó los 125 mW/m² (5,0 IUV).



III. Observaciones Generales.

A pesar de los buenos augurios, con respecto a la recuperación de la capa de ozono en los próximos 30 años, surgidos de las mediciones asociadas a la disminución primaveral del ozono estratosférico antártico del período 2014, las condiciones atmosféricas de la estratósfera durante el año 2015, propiciaron la apertura de un "agujero de la capa de ozono antártico" de grandes proporciones.

Las bajas temperaturas de la alta estratósfera, el fortalecimiento del vórtice polar, la baja transferencia de calor longitudinal, indicador de la estabilidad del mismo, permitieron el desarrollo de una extensa área de nubes estratosféricas polares, con su consecuente generación de reacciones catalíticas destructoras del ozono. Como consecuencia, el agujero de la capa de ozono alcanzó su extensión máxima el 5 de noviembre con 28.2 millones de Km², llegando incluso hasta la zona de Puerto Montt. Este registro se encuentra en el segundo lugar desde el año 2006, y el cuarto valor más alto considerando los registros desde el año 1979.

Sin embargo, las condiciones meteorológicas imperantes tanto en Punta Arenas como en la Península Antártica, con días predominantemente nublados y cubiertos, atenuaron los efectos de la radiación ultravioleta, registrándose valores moderados de índice UV.

Referencias.

Fahey, D. *Veinte Preguntas y Respuestas sobre la Capa de Ozono*. Documento basado, en la evaluación científica del agotamiento de ozono 2002.

Red Radiométrica DMC. Datos de Irradiancia Eritémica e Índice UV.

Total Ozone Mapping Spectrometer-Earth Probe (TOMS-EP), NASA. Datos de columna de ozono diarios,

WMO. *Antartic Ozone Bulletin N°4*. Octubre de 2015.