

Junio 2023
vol. 06

**BOLETÍN MENSUAL
VIGILANCIA DEL OZONO
ATMOSFÉRICO EN EL
OBSERVATORIO DE
VIGILANCIA ATMOSFÉRICA
MARCAPOMACOCHA**



Introducción

La capa de ozono se encuentra dentro de la atmósfera terrestre y tiene la función de ser una capa protectora que preserva la vida del planeta Tierra, haciendo las veces de escudo contra la radiación proveniente del sol llamados UV o radiación ultravioleta, absorbiendo gran parte de ella. Se encuentra a una distancia de la superficie de la tierra de 15 a 50 kilómetros de altura en mayor concentración, aunque cercano al suelo también está presente.

Debido a los productos generados por los humanos y llamados halocarbonos, la disminución en la concentración de ozono se ha acelerado, en los últimos 30 años, en comparación a su ritmo natural. Esto provoca el adelgazamiento de la capa y se generen los mal denominados agujeros de ozono, con lo cual la tierra pierde protección contra la radiación solar. El paso de la radiación solar más intenso provoca en la vida humana enfermedades como el cáncer a la piel o las cataratas en los ojos, así como la reducción del sistema inmunológico.

Debido a estos procesos que ocurren en la atmósfera el Perú, como país miembro del Protocolo de Montreal, viene reduciendo poco a poco el consumo de los productos químicos que destruyen la capa de ozono y además por intermedio del SENAMHI viene monitoreando el estado de la capa de ozono en la región central del país con la finalidad de alertar a la comunidad científica nacional e internacional sobre su variabilidad temporal y posible deterioro así como su relación con los cambios climáticos que se vienen registrando en el mundo.

ANTECEDENTES

El SENAMHI cuenta con el Observatorio de Vigilancia Atmosférica (OVA) Marcapomacocha, ubicada en la sierra central del país (provincia de Yauli y departamento de Junín), asimismo, se encuentra a una altitud de 4,479 metros sobre el nivel del mar, a una latitud de 11°24'18"S y longitud de 76°19'31"O. Es una de las pocas estaciones a nivel mundial cercanas a la línea ecuatorial y en un medio natural megadiverso. A nivel sudamericano conjuntamente con las estaciones VAG de Natal (Brasil) y Chacaltaya (Bolivia) son las que reportan información continua de las propiedades físicas y químicas de la atmósfera en esta parte del continente.

Las actividades del OVA Marcapomacocha se enmarcan en las mediciones de la concentración de ozono total atmosférico en forma diaria realizadas con el Espectrofotómetro Dobson el cual contribuye con el Programa de Vigilancia de la Atmósfera Global - VAG de la Organización Meteorológica Mundial - OMM. Otras variables como la radiación ultravioleta, radiación solar global y parámetros meteorológicos también se vienen midiendo en dicho observatorio.

Con las mediciones realizadas desde 1964 en el Perú, se ha podido conocer el estado y evolución del espesor de la capa de ozono sobre el territorio peruano y en general sobre la porción de la atmósfera tropical sobre el continente sudamericano.

En el futuro el OVA Marcapomacocha también podrá realizar mediciones de dióxido de carbono (CO₂) (gas de efecto invernadero) y carbono negro (hollín).

I.- CÁLCULO DEL OZONO ATMOSFÉRICO Y FUNCIONAMIENTO DEL ESPECTROFOTÓMETRO DOBSON

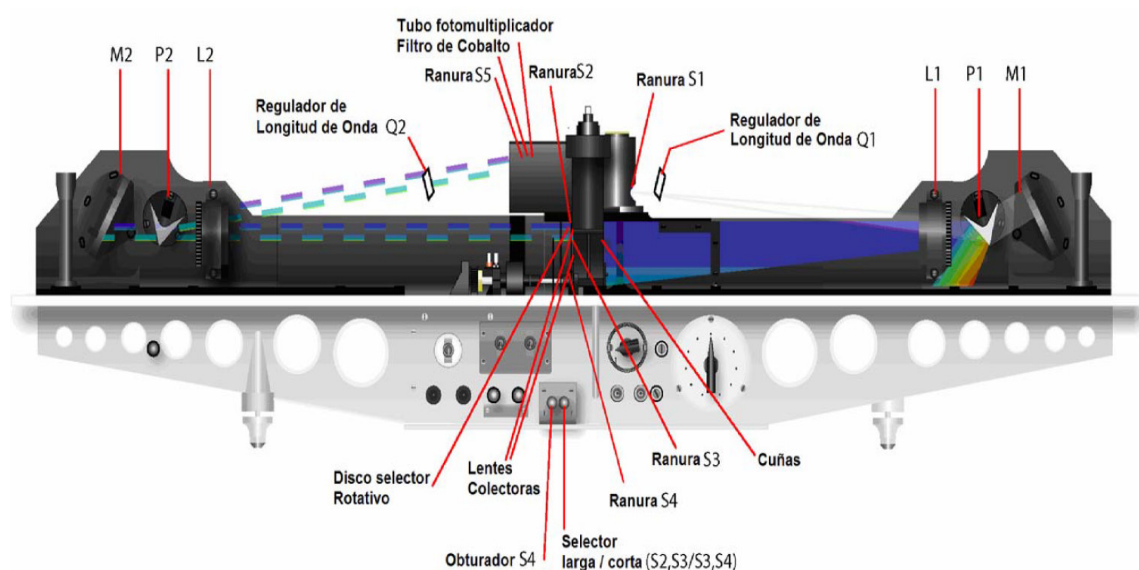
1.- MEDICION EN SUPERFICIE

El instrumento que permite medir las concentraciones de ozono total atmosférico se denomina Espectrofotómetro Dobson. Aunque las mediciones se realizan en forma indirecta porque lo que se mide son las intensidades relativas, de un par de longitudes de ondas (LDO), seleccionadas de antemano, siendo estas generadas y emanadas por el Sol o simplemente por el Zenith del cielo.

Su funcionamiento se basa en que la luz ingresa al instrumento a través de una ventana que se encuentra en la parte superior del mismo y después de su reflexión en un prisma incide en una ranura S1 (Figura 1) la cual consiste en un lente de cuarzo que hace que la luz sea paralela, un prisma que descompone la luz y un espejo que refleja la luz haciéndola volver al prisma y las lentes de tal manera que forma un espectro en el plano focal del instrumento. Las longitudes de onda que están involucradas se aíslan por medio de las ranuras S2, S3 y S4.

FIGURA N° 1

Funcionamiento del Espectrofotómetro Dobson



En la base o parte inferior del espectrofotómetro se encuentran dos palancas de obturación. La palanca S4 que se encuentra a la izquierda, se utiliza solamente cuando se realizan las pruebas, test o calibraciones al espectrofotómetro y deben ser introducidas en el instrumento, cuando se realicen las mediciones de ozono.

La selección de las longitudes de onda A, B, C o D cuando se efectúen las medidas de ozono se logra rotando las palancas a las posiciones Q1 y Q2 de acuerdo a la tabla Q propia del instrumento.

La cuña óptica se encuentra dentro del instrumento frente a la ranura S3. La posición de la cuña óptica se controla a través de un disco graduado que se encuentra en la parte superior del instrumento.

En cualquier posición del disco, la intensidad de la luz que pasa a través de la cuña óptica se reduce, la cual es determinada durante la calibración del instrumento.

Las intensidades relativas de las dos longitudes de onda en las cuales se efectúan las observaciones pueden obtenerse a partir de la lectura de la posición de equilibrio del disco y las tablas de calibración provistas con el instrumento.

2.- MEDICION DESDE SATÉLITE

Uno de los satélites que mide en forma continua la concentración de ozono es el satélite AURA el cual dispone de cuatro instrumentos para la medición de la tropósfera superior, estratósfera y mesósfera. El instrumento de monitoreo de ozono (OMI) continúa los 34 años de observación del ozono que comenzaron con el detector ultravioleta de retrodispersión (Backscatter Ultraviolet Detector, BUV) en 1970 y el espectrómetro de representación de la distribución de ozono total (Total Ozone Mapping Spectrometer, TOMS), en 1978. El OMI mide la luz solar reflejada y retrodispersada en las porciones ultravioleta y visible del espectro. Las capacidades hiperspectrales del instrumento (recopilación y procesamiento de la información a lo largo de todo el espectro electromagnético) mejoran la precisión y exactitud de las cantidades de ozono total.

II.-RESULTADOS.

Cabe mencionar que el mes de junio ha presentado características térmicas menores al mes pasado, debido a factores de circulación atmosférica en el hemisferio austral, como producto del inicio de la estación astronómica de invierno. Los sistemas atmosféricos, a nivel de alta tropósfera, que gobiernan el tiempo sobre nuestro país, como la Alta de Bolivia y la Zona de Convergencia Intertropical, se encuentran desplazados hacia el hemisferio norte para dar paso a otros sistemas característicos de la temporada como las DANA's (Depresión Aislada en Niveles Altos). Cabe mencionar que dada la ocurrencia del periodo cálido denominado Fenómeno El Niño sobre el Pacífico oriental y central de América del Sur permite que se incrementen las temperaturas afectando no solo a la tropósfera sino también a la estratósfera a través de la convección húmeda. Estos procesos llegan a tener incidencia en las propiedades físicas de la baja estratósfera permitiendo la variabilidad en la concentración de ozono atmosférico.

Un parámetro que conviene resaltar y que influye en el comportamiento del ozono es la denominada Oscilación Quasi Bienal (QBO siglas en inglés) el cual domina la variabilidad de la estratósfera ecuatorial (16 – 50 km) y fácilmente puede verse como regímenes de vientos del este y del oeste que se propagan hacia abajo, con un periodo variable que puede estar entre los 28 meses. Su estudio es inseparable de los movimientos de las ondas atmosféricas que lo impulsan y modulan. Los efectos de la QBO no se limitan a la dinámica atmosférica. Los componentes químicos como el ozono, vapor de agua, óxido nitroso, ácido clorhídrico y el metano, se ven afectados por los cambios de circulación inducidos por la QBO (mezcla de ozono estratosférico por la circulación secundaria).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, es importante tener en cuenta que esos regímenes de circulación, así como procesos que involucran el inicio de la estación de invierno, interactúan entre sí en las diferentes capas de la atmósfera. Siendo así, se analiza la capa de 70 hPa (día 13 de junio) dado de que es representativa de la baja estratósfera. En ella se ha podido observar, según el Modelo GFS, características algo similares al mes pasado, que los flujos de viento continúan siendo variables. Continúan registrándose vientos zonales, también es cierto que en ocasiones se han registrado vientos provenientes del hemisferio norte permitiendo que las concentraciones de ozono registren un ligero aumento. Los vientos zonales siguen siendo del oeste en gran parte del mes pero durante los días 22 y 23 de junio se formó un núcleo anticiclónico por el lado de Colombia y Venezuela permitiendo el arrastre de masas de aire del hemisferio norte hacia el sur. El movimiento de este sistema afectó las concentraciones de ozono sobre nuestro país. A esto hay que agregar, al igual que el mes pasado, que el potencial de reacciones

.....

fotoquímicas también disminuyó por efecto del mayor alejamiento de la tierra con respecto al sol. Durante el mes de junio, no se observaron sistemas anticiclónicos persistentes como en fechas anteriores sobre América del Sur, permitiendo que los flujos sean mayormente zonales y del oeste. Si bien es cierto, las deficiencias de ozono son característicos en este mes, la invasión de estas masas de aire provenientes del norte no permitió que fueran tan intensos, más bien hubo un ligero aumento. Figura 2.

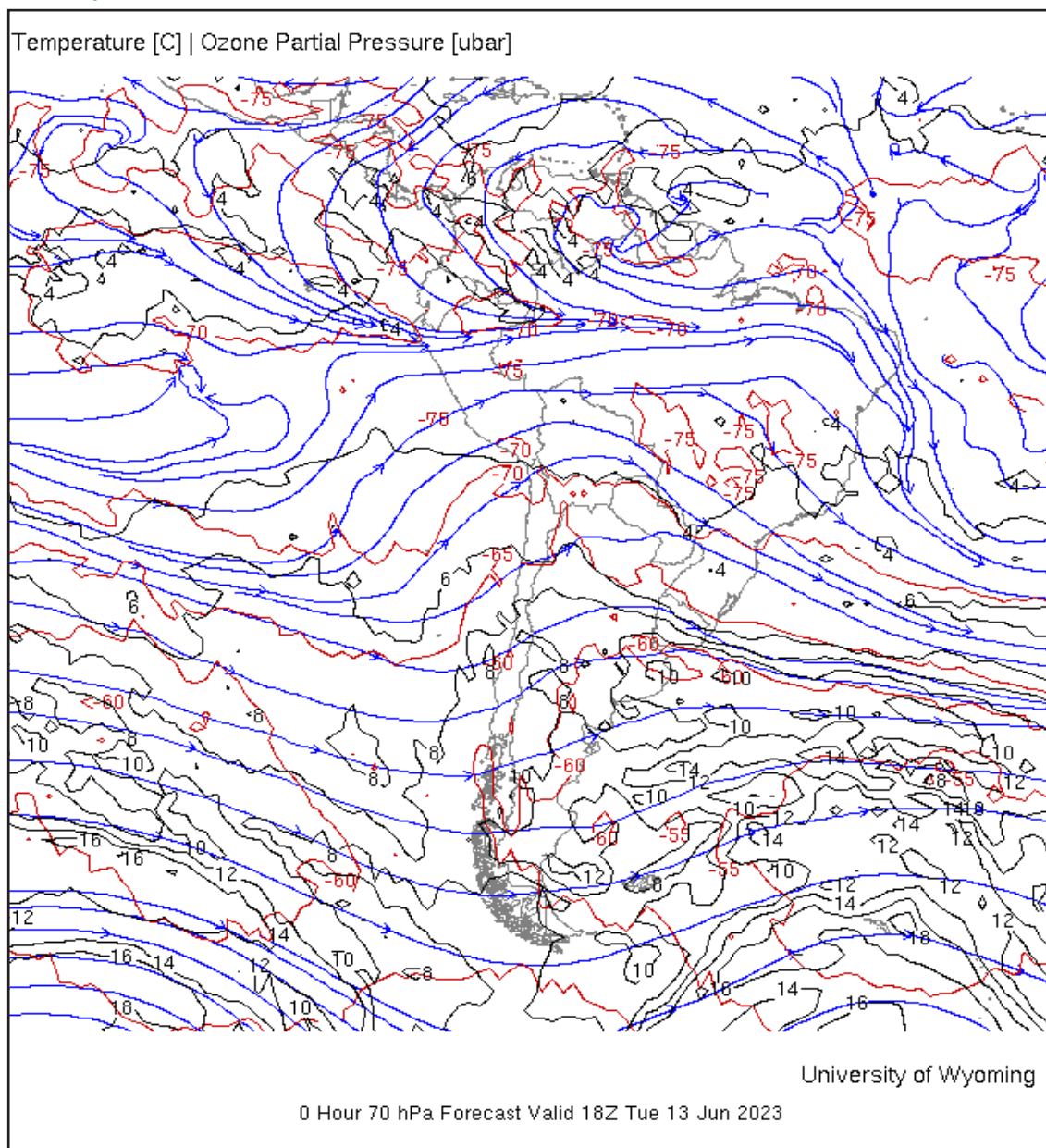
Con el fin de reforzar lo descrito a nivel de baja estratósfera, podemos mencionar que, de la vigilancia realizada en el mes de junio a nivel de superficie, en el OVA Marcapomacocha se observó que el comportamiento horario de la concentración de ozono atmosférico en general, estuvo oscilando entre 238.5 UD y 249.0 UD (UD = Unidades Dobson), valores ligeramente mayores a lo registrado en el mes anterior.

Se debe mencionar que en las primeras horas del día las concentraciones de ozono son relativamente altas debido a la nula actividad fotoquímica durante la noche y a medida que transcurren las horas hasta llegar al mediodía los valores empiezan a disminuir para luego en horas de la tarde volver a incrementarse. A veces el comportamiento es algo variable tanto en la mañana como en la tarde, pero siempre con la misma tendencia (disminuye y luego aumenta).

Este proceso físico, se enmarca en que durante las mañanas la incidencia de la radiación ultravioleta es baja, por ende las concentraciones de ozono son relativamente altas (debido al ozono residual), a medida que la intensidad de la radiación ultravioleta se incrementa en forma paulatina hacia el mediodía, donde los valores son altos (en los meses de primavera y verano son mayores), permite una reducción del ozono y en horas de la tarde a medida que el sol va llegando al ocaso (disminución de la intensidad de la radiación solar) las concentraciones de ozono vuelven a incrementarse. Este comportamiento horario también va a depender de otros factores como los ambientales (efectos residuales de ozono del día anterior a nivel de tropósfera) y meteorológicos (transporte de ozono de y hacia otras latitudes). Un punto importante a remarcar es el proceso de formación y destrucción del ozono por efectos fotoquímicos, mientras que la intensidad de la radiación solar se incrementa, dicha actividad será mayor y viceversa. En el periodo analizado, la intensidad de la radiación ultravioleta ha continuado registrando una disminución en forma ligera con respecto al mes de mayo, en ese sentido las reacciones fotoquímicas han sido menores al mes anterior con una tendencia a la disminución debido al inicio de la estación de invierno.

FIGURA N° 2

Flujos de masas de aire variables



Por otro lado, el comportamiento de la concentración de ozono atmosférico promedio diario mensual multianual (2000-2020) del mes de junio oscila entre 238.2 UD y 242.2 UD aproximadamente (Figura 3), mientras que los medidos en el mes de junio del presente año, oscilaron entre 240.7 UD y 249.7 UD. En la figura se aprecia que los valores registrados en el presente mes, estuvieron un 97% por encima de sus valores climáticos y el otro 3%, por debajo.

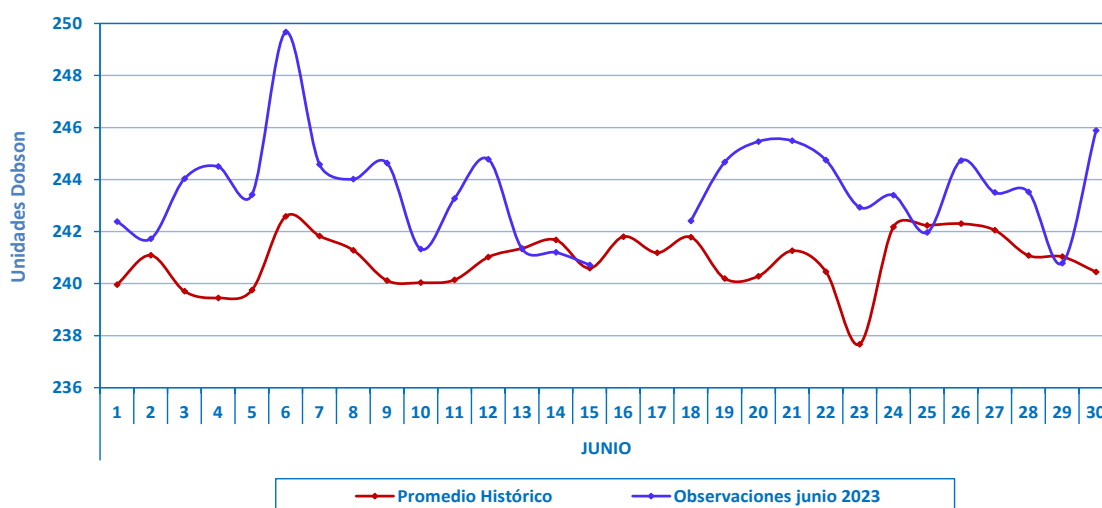
Cuando se comparan ambas series se ha observado un comportamiento bastante variable, con valores que en algunos momentos se acercan a sus normales y en otros más bien alejándose (por encima mayormente), lo cual

puede atribuirse a los procesos tanto físicos como químicos, así como a los cambios en la circulación atmosférica, ahora mucho más por el Fenómeno El Niño,. La tendencia de las concentraciones de ozono sobre nuestro país, con respecto al mes de mayo fue a un ligero aumento a lo largo del mes, debido a factores de relación de mezcla y de circulación atmosférica aleatoria tanto vertical como horizontal.

En la estratósfera, la temperatura y las concentraciones de ozono van de la mano, de acuerdo a ello, se puede mencionar que, en el mes de junio, en prácticamente todas las capas de la estratósfera las temperaturas continúan por debajo de sus valores normales permitiendo que haya menos ozono atmosférico, pero lo que equilibra esta disminución son los vientos provenientes del hemisferio norte al nivel de baja estratósfera.

FIGURA N° 3

Comportamiento temporal de la concentración de ozono atmosférico en el OVA Marcapomacocha. Junio 2023.



Ahora bien, es importante conocer también la variación temporal multianual de la concentración de ozono (climático) y poder relacionarlos con los procesos que generan los diferentes sistemas atmosféricos que gobiernan sobre nuestro país. En el OVA Marcapomacocha se presentan dos picos, uno en el mes de marzo con un valor de 244.5 UD y el otro, mucho mayor, en el mes de setiembre con un valor de 251.3 UD. Por otro lado, los valores bajos de ozono se registran climáticamente en los meses de enero con valores de 242.2 UD y otro entre los meses de mayo y junio con valores de 240.9 UD y 240.8 UD respectivamente. El promedio mensual de ozono en el presente mes fue de 243.6 UD superior en 2.8 UD al promedio mensual multianual (240.8 UD).

Se debe tener presente que, en la región tropical durante los meses de finalización del otoño e inicio del invierno austral, vale decir junio-julio hasta setiembre, las concentraciones de ozono empiezan a incrementarse, por efectos de circulación al nivel de baja estratósfera así como también por efectos térmicos. Por otro lado, la circulación de los vientos, a nivel vertical, desde la tropósfera hacia la estratósfera permite el traslado de cantidades de ozono los cuales a lo largo de los meses lo van redistribuyendo hacia latitudes mayores (Circulación Brewer-Dobson), lo cual permite el déficit de ozono atmosférico en latitudes bajas (mucho más en estos meses). Cabe remarcar que esta circulación está conducida por ondas atmosféricas lo cual puede ser acelerada por el cambio climático repercutiendo en la distribución global de las concentraciones de ozono.

Debido al proceso de calentamiento en la tropósfera por efecto de El Niño que se viene presentando, es importante mencionar los flujos verticales por advecciones húmedas los cuales transportan vapor de agua hacia la alta tropósfera pudiendo llegar inclusive hasta la estratósfera, modificando las concentraciones de ozono atmosférico en la región.

Al igual que la información de superficie, lo que proviene de los satélites es muy importante ante la falta de cobertura por parte de los primeros. En ese sentido, al realizar la comparación de los datos de ozono atmosférico provenientes de los satélites AURA (Plataforma OMI) y SUOMI (Plataforma OMPS) con lo registrado en superficie, se observó un desfase entre ellos. Con respecto a la información proveniente del AURA/OMI, durante el 70% de días del mes de junio los valores de ozono diario medidos estuvieron por debajo de lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson. Para el caso de SUOMI/OMPS, ocurre que durante el 71% de días del mes estuvieron por debajo de lo registrado en superficie. Figura 4.

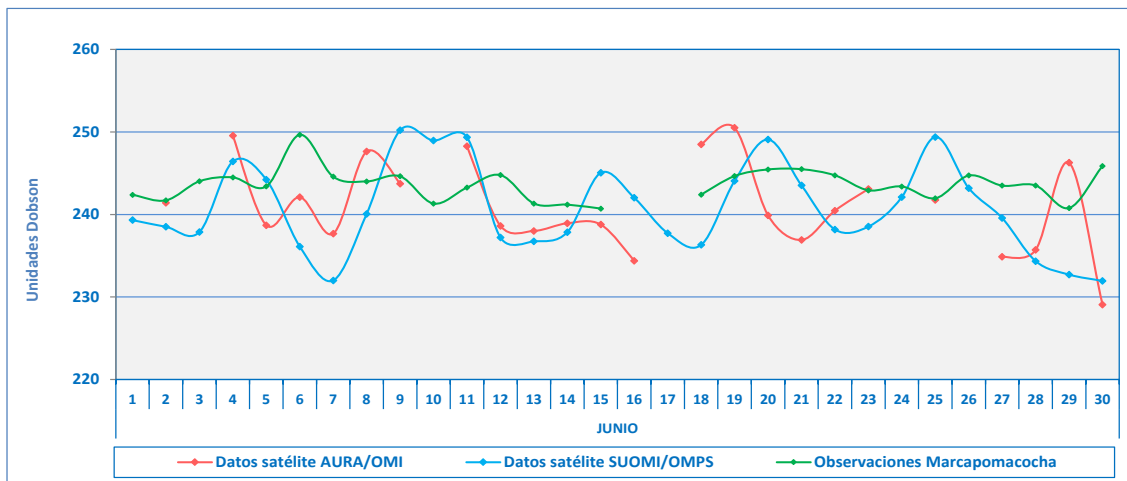
De este análisis podemos decir que la información proveniente de estos dos satélites se encuentra mayormente por debajo de lo registrado en superficie. Existen días donde las diferencias entre los valores registrados por el satélite y el medido en superficie, son bastante altas en el orden de 1 a 16 UD.

Cabe mencionar, que la tendencia de las concentraciones de ozono medidos en superficie ha sido relativamente estable en el tiempo mientras que los medidos con los satélites, continúan siendo variables.

La tendencia, de acuerdo a la climatología, es que las concentraciones de ozono empiecen a incrementarse a partir del mes de julio.

FIGURA N° 4

Comparación de información proveniente de los satélites AURA y SUOMI con lo registrado en superficie, en el OVA Marcapomacocha.



Perfil Vertical de Ozono Atmosférico

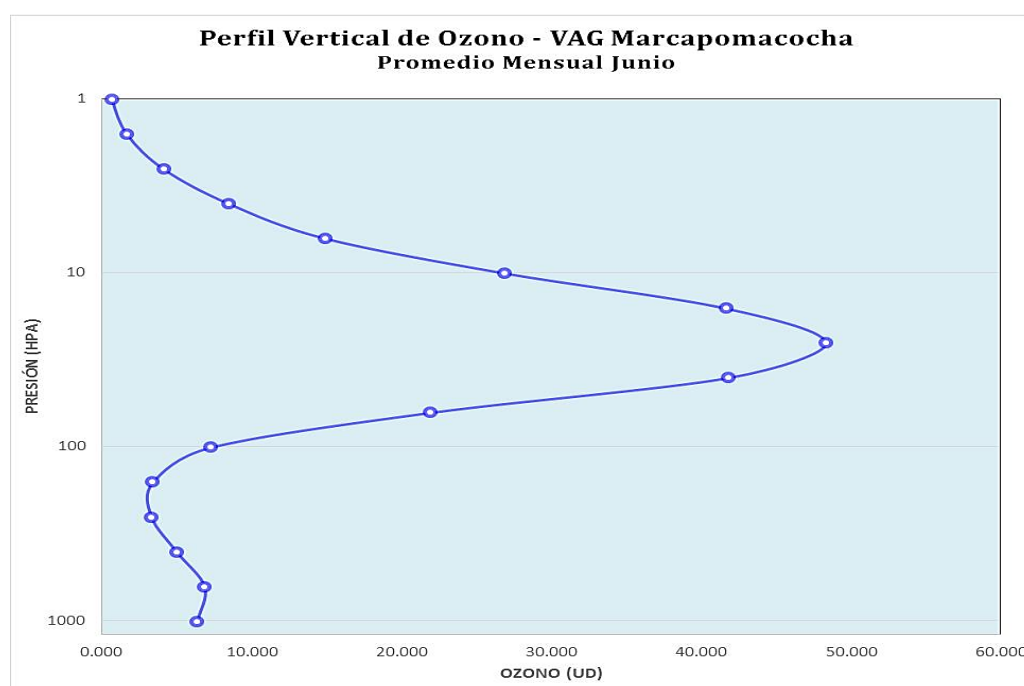
Debemos saber que el 10% de la concentración de ozono se encuentra en la tropósfera y el otro 90% en la estratósfera. Es importante monitorear el comportamiento vertical de este gas en diferentes niveles de la atmósfera para conocer su variabilidad en el tiempo y poder relacionarlos con posibles cambios en los sistemas atmosféricos característicos de la región. En los últimos 30 años aumentaron, mucho más, las sustancias agotadoras de ozono, así como los gases de efecto invernadero los cuales tienen efecto en el comportamiento del ozono principalmente en la baja estratósfera debido a los efectos de la dinámica atmosférica, así como de las reacciones fotoquímicas. A esto se le debe agregar el evento cálido que se viene registrando a nivel global debido al Fenómeno El Niño, los cuales tienen repercusión en el flujo de vientos verticales de tropósfera a estratósfera.

Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial), desde el año 2000 hasta el 2020 se han observado por medio de mediciones del perfil vertical de la atmósfera y el desarrollo de modelos numéricos, una disminución en las concentraciones de ozono (~2% por década) en la estratósfera baja de la región tropical (20°S – 20°N), asimismo en la estratósfera media algo parecido para finalmente en la estratósfera superior un aumento de 2% por década.

De acuerdo a ello, en la figura 5 se puede observar el comportamiento característico del perfil vertical de ozono para el mes de junio en el OVA Marcapomacocha.

A nivel de tropósfera generalmente, las concentraciones de ozono disminuyen con la altura, para luego a nivel de estratósfera sufrir un incremento ostensible debido al incremento de la temperatura. En la estratósfera alta empiezan a disminuir en forma paulatina. El gráfico presentado es remarcar que las mayores concentraciones de ozono se registran en esta segunda capa de la atmósfera. Se observa que las concentraciones de ozono son ligeramente mayores a lo observado en el mes pasado, de acuerdo al perfil mostrado.

FIGURA N° 5
Perfil Vertical de Ozono



Según información de perfil vertical de ozono atmosférico para un día típico del mes de junio (día 21) 2023 obtenida por Metop-C/GOME-2, muestra para el hemisferio norte una disminución en las concentraciones, cuyos valores han oscilado entre 13 UD y 23 UD entre la alta tropósfera y media estratósfera (el área de cobertura de estas concentraciones bajas, se mantiene con respecto al mes pasado). Cabe mencionar que desde el 21 de junio dicho hemisferio se encuentra en la estación de verano, registrándose concentraciones bajas de ozono, debido a reacciones fotoquímicas que ocurren en la atmósfera alta. En la región tropical (latitudes bajas), los valores de las concentraciones de ozono se mantienen con respecto a mayo, pero siempre en la estratósfera media y alta, todo ello debido a circulaciones regionales (Brewer-Dobson) y al efecto térmico. La altura de las concentraciones relativamente altas (15 UD a 24 UD) de ozono en latitudes bajas (en ambos hemisferios), se registra entre los 50 hPa y 10 hPa (altura similar al mes anterior), mientras que, en latitudes medias del hemisferio sur, la altura de las concentraciones altas se dio entre los 80 hPa y 15 hPa. Se debe mencionar que en estas latitudes las concentraciones de ozono sufrieron un incremento con valores entre 15 UD

y 26 UD.

Para el caso de nuestro país, concentraciones altas se han registrado entre los 50 hPa y 10 hPa con valores entre 13 UD y 24 UD (similares al mes pasado).

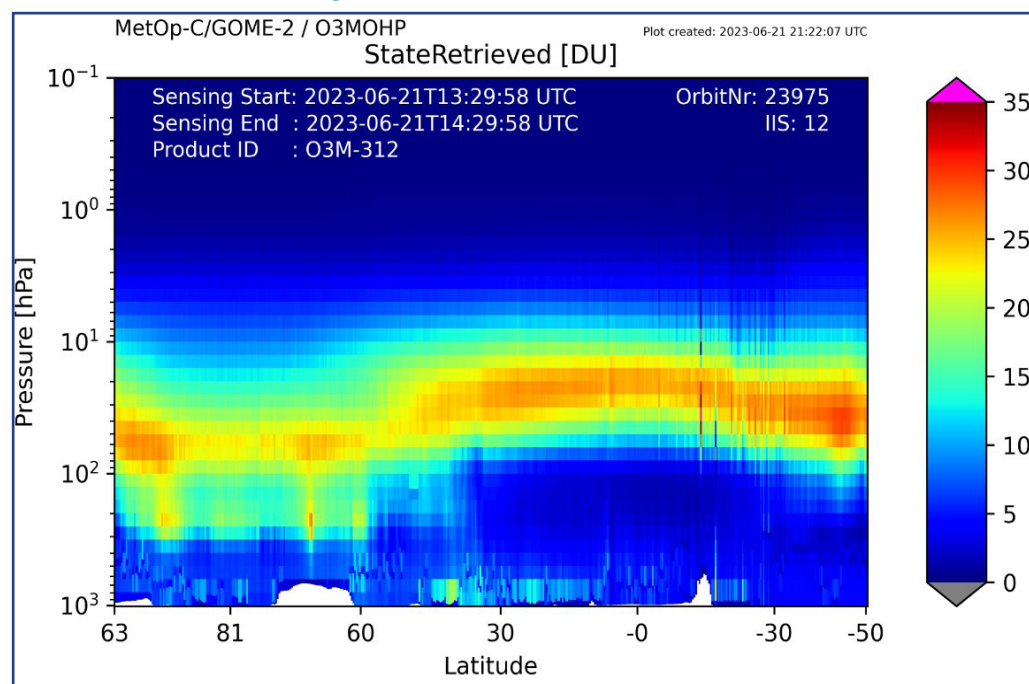
En los primeros niveles de la atmósfera (tropósfera) si bien es cierto que las concentraciones de ozono son bajas (oscilan, generalmente, entre 1 UD y 10 UD), esto se debe a los efectos residuales de la formación del ozono del día anterior, así como también a otros procesos.

Debe considerarse que la forma que adquiere la distribución vertical es típica en la atmósfera, sabiendo que las concentraciones pueden variar de acuerdo a la latitud, estación astronómica, condiciones meteorológicas, así como al efecto que tienen los gases de efecto invernadero, especialmente en la estratósfera baja. Figura 6

En latitudes medias y altas del hemisferio norte (45°N - 85°N), se observaron concentraciones de ozono bajas (13 UD a 23 UD) comparados a sus pares del hemisferio sur (debido a procesos de circulación atmosférica y de radiación), con la diferencia de que la altura de esas concentraciones bajas, se encuentran a menor altura, (300 hPa a 20 hPa) características que son debidas principalmente a la baja densidad del aire en esa parte de la atmósfera como producto de las bajas temperaturas así como a intrusiones hacia la tropósfera de masas de aire con contenido de ozono. También se le suma a esto, las condiciones de verano.

FIGURA N° 6

Perfil Vertical de Ozono según GOME-2



RELACIÓN DE MEZCLA DEL OZONO

Para entender mejor la variabilidad en las concentraciones de ozono es importante considerar la cantidad de mezcla de este gas que pueda existir en capas altas de la atmósfera. El término relación de mezcla permite conocer la cantidad o masa de las moléculas de ozono contenido en el aire medido en gramos de ozono por kilogramo de aire seco (g/kg). Otras definiciones permiten considerar también el término kg/kg.

Esta variable está influenciada por la circulación de las masas de aire los cuales pueden transportar concentraciones altas o bajas de ozono a las regiones en capas entre la baja y media estratósfera.

Según la información obtenida por el Análisis Retrospectivo de la Era Moderna para Investigación y Aplicaciones, versión 2 (MERRA-2 por sus siglas en inglés) es un análisis atmosférico global nuevo producido por la NASA. El objetivo de este análisis es proporcionar un registro detallado de la atmósfera global e incorporar aspectos adicionales del sistema climático como el ozono.

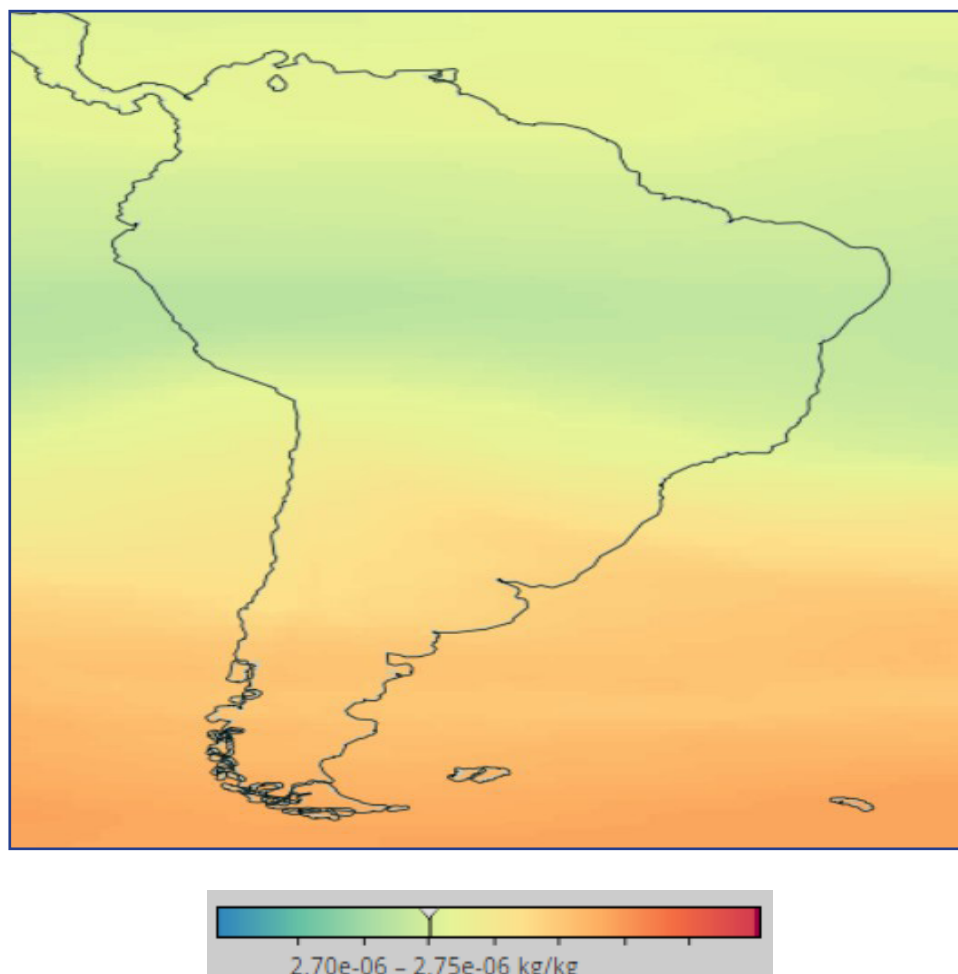
Para el análisis, se considera el nivel de 50 hPa como una capa intermedia entre la baja y media estratósfera.

La figura 7 muestra el comportamiento mensual (junio) de la relación de mezcla de ozono para Sudamérica. Para el caso específico de Perú, en la región central se observan valores entre $2.30\text{e-}06$ a $2.35\text{e-}06$ kg/kg, mientras que en la zona norte la mezcla mejora con valores entre $2.50\text{e-}06$ a $2.55\text{e-}06$ kg/kg para finalmente en el sur del país registrar una mezcla entre $2.70\text{e-}06$ a $2.75\text{e-}06$ kg/kg. Los valores de mezcla son menores que los obtenidos en el mes pasado, específicamente en la región central y parte del sur, dándonos a entender que debido a la estacionalidad (inicio del invierno austral) y la circulación de los vientos las mezclas no han aportado con concentraciones de ozono significativas.

En latitudes medias, por ejemplo sur de Argentina y Chile, las relaciones de mezcla se incrementan con valores de $4.30\text{e-}06$ a $4.35\text{e-}06$ kg/kg debido a los procesos de circulación atmosférica (efectos de la circulación Brewer-Dobson), permitiendo obtener mayores concentraciones de ozono con respecto a la región tropical.

FIGURA N° 7

Relación de Mezcla de Ozono a 50 hPa. Junio 2023 (MERRA-2)



VAPOR DE AGUA

La estratósfera es una capa relativamente seca comparada con la tropósfera, solo se ha podido registrar que, en la capa baja de la misma, hay poca humedad.

Se debe seguir mencionando, que durante los días 13 y 15 de enero de 2022, se registró una erupción volcánica en el mar del Pacífico Sur, emitiendo grandes cantidades de aerosoles a la atmósfera. Tanta fue la potencia de la erupción que llegó hasta alturas que sobrepasaron la estratopausa, inyectando partículas y gases como el SO_2 (dióxido de azufre), HCl (cloruro de hidrógeno o ácido clorhídrico) y vapor de agua. Es bastante probable que sus efectos se vean con el transcurrir de los meses.

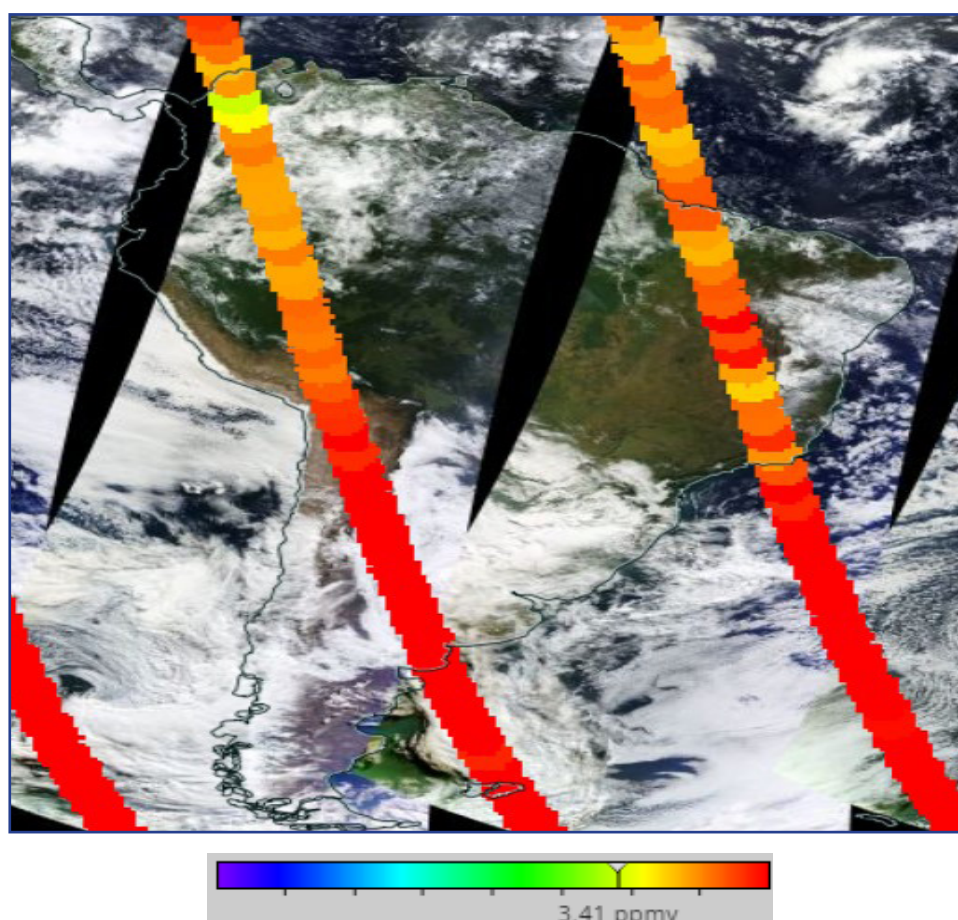
Tanto el vapor de agua como los aerosoles permiten la reflexión de la radiación

solar directa al espacio, si estos existieran en cantidades considerables permitiría un enfriamiento en la superficie de la tierra.

El vapor de agua genera calentamiento en la estratósfera y esto permitiría un cambio en las concentraciones de ozono y por ende su impacto a nivel de tropósfera.

En la figura 9 se observa un mapa con concentraciones de vapor de agua a nivel de 46 hPa (límite entre la estratósfera baja y media) para un día típico del mes (21 junio 2023). En ella se observa sobre Perú, concentraciones de vapor de agua bajas en el sur del país con valores de 3.80 ppmv, mientras que en la sierra central valores entre 3.85 ppmv y 3.95 ppmv. En el lado oriental norte, concentraciones entre 4.00 ppmv y 4.10 ppmv. En la región central y norte continuaron registrándose concentraciones de vapor de agua en forma moderada debido al sobrecalentamiento del agua de mar afectando a Perú y Ecuador. Se debe tener en cuenta que estas concentraciones han sido mucho menores al mes pasado, debido a una atmósfera relativamente seca (especialmente en el sur del país), producto de la estacionalidad.

FIGURA N° 8
Vapor de Agua a 46 hPa

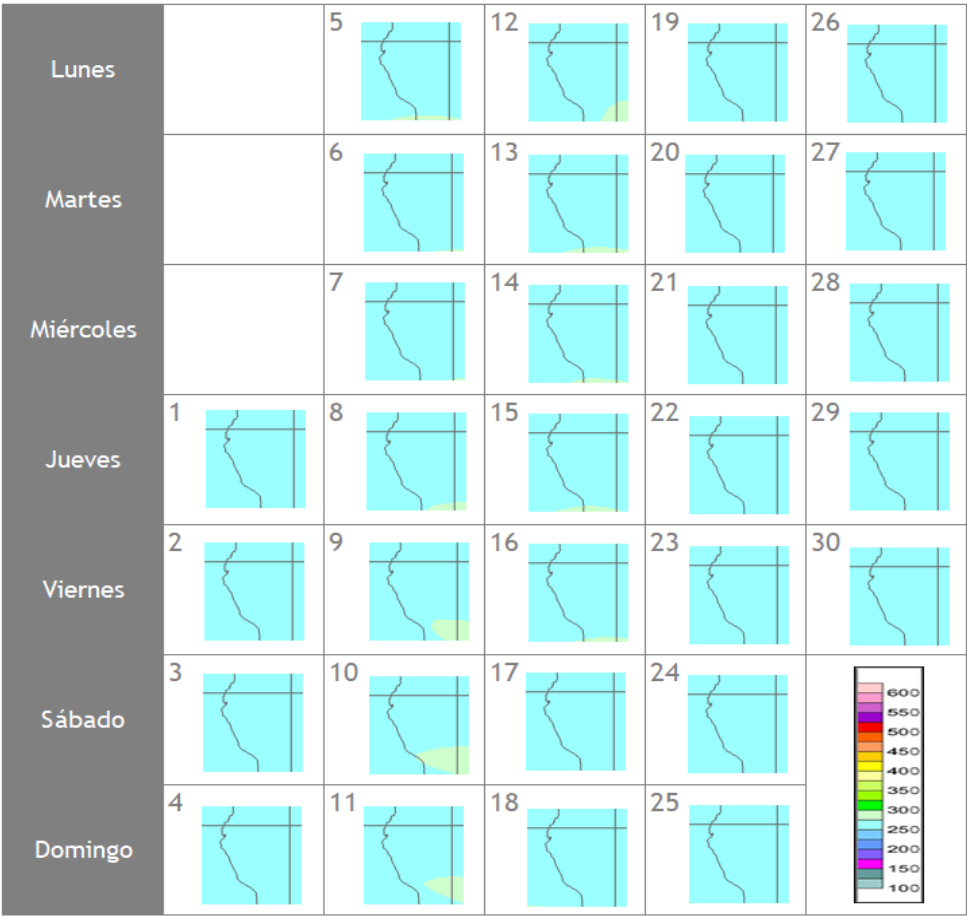


COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO SOBRE EL PERÚ

En cuanto al análisis de los mapas en forma diaria provenientes de la plataforma OMI del satélite AURA de la National Aeronautics and Space Administration - NASA (Figura 8), podemos mencionar que, para el caso de nuestro país, las concentraciones de ozono atmosférico, que muestra el mapa, fueron mayormente similares al mes anterior. En todo el mes las concentraciones de ozono se mantuvieron entre 225 UD y 275 UD.

En toda la costa, las concentraciones de ozono han oscilado entre 235 UD y 250 UD, que en comparación del mes pasado fueron similares. La cobertura de estas concentraciones relativamente bajas, se mantuvo a lo largo del mes. En la región andina las concentraciones de ozono fueron mucho menores debido a la menor masa atmosférica.

FIGURA N° 9
Mapa diario del ozono total atmosférico para el mes de junio 2023



TEMPERATURA EN LA BAJA ESTRATOSFERA

Finalmente es importante considerar que lo que pase en la atmósfera baja tiene, a veces, su impacto en la atmósfera alta o viceversa, y para poder entender la variabilidad del ozono atmosférico es importante conocer cómo es el comportamiento temporal de la temperatura en dichos niveles. Por ello se requiere analizar lo que pasa en la atmósfera alta y ver el comportamiento de las temperaturas en la estratósfera baja aproximadamente en los 70 hPa.

El que la temperatura aumente o disminuya en la estratósfera va a depender de las concentraciones de sustancias que agotan el ozono, así como de la estacionalidad y la circulación atmosférica.

En la Figura 10 se muestra la distribución temporal de la temperatura desde el mes de enero 2022 hasta el mes de junio 2023, al nivel de 70 hPa y entre las latitudes 25°S - 25°N.

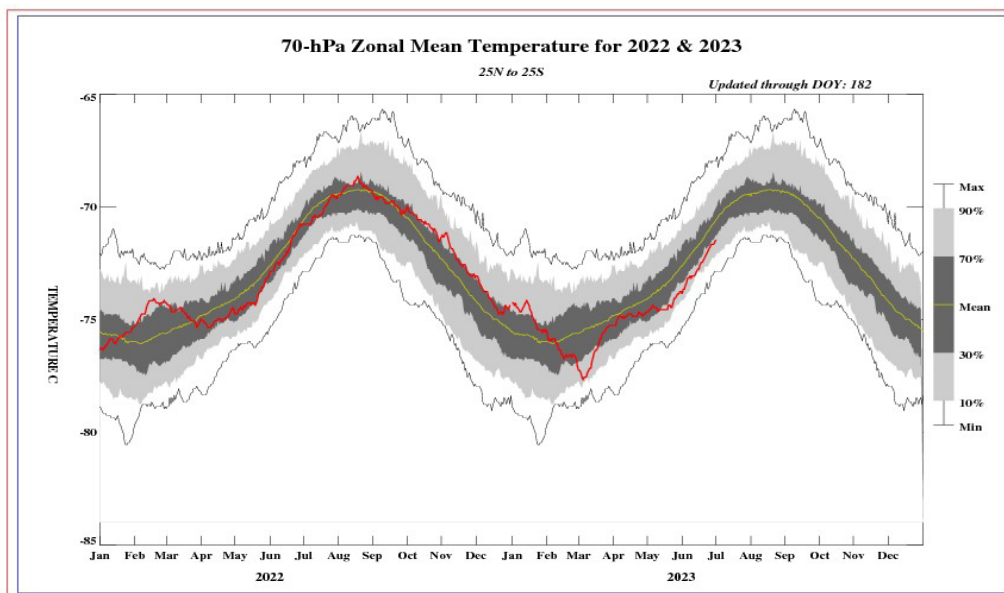
Durante los días de registro, la temperatura en ese nivel (línea de color rojo), se acercó a sus valores climáticos durante gran parte del mes, permitiendo un ligero “calentamiento” en el aire, pero aún por debajo de sus valores normales o climáticos. De acuerdo al comportamiento térmico del aire en ese nivel, las concentraciones de ozono aumentaron ligeramente. Cabe destacar que durante el mes de junio, las temperaturas estuvieron muy por debajo de sus valores normales en todas las capas de la estratósfera, permitiendo una ligera o baja recuperación del ozono.

La variabilidad de la concentración de ozono en ese nivel asociado a los cambios en la temperatura es una consecuencia del movimiento de traslación de la tierra con respecto al sol, así como a procesos de transferencia radiativa y reacciones fotoquímicas. Se suma también, el proceso de la circulación Brewer-Dobson, así como a circulaciones de viento regionales a nivel de alta atmósfera. Por otro lado, hay que destacar el impacto que tiene la emisión de sustancias agotadoras de ozono hacia la atmósfera por parte del factor antropogénico. Se debe tener presente que, por lo general, un aumento (físico) de la temperatura en la atmósfera alta, está ligada con un aumento de las concentraciones de ozono y viceversa, los cuales tienen causales, valga la redundancia, físicos y químicos. El valor promedio mensual (1979-2017) de la temperatura en este nivel y para este mes es de -71.9°C, menor en valor numérico al mes pasado. La temperatura calculada en este mes, fue de -72.9°C. Como se observa, hay un ligero “calentamiento” de la masa de aire el cual permite que relativamente haya un aumento de ozono atmosférico. Debe recordarse que, durante el año, climáticamente se presentan dos mínimos de ozono, uno en el mes de enero y el otro entre los meses de mayo y junio (tal como se ha descrito en párrafos anteriores). En el presente mes,

como ya anteriormente se ha mencionado, el promedio mensual registrado en superficie fue de 243.6 UD, mayor al mes anterior.

FIGURA N° 10

Comportamiento de la temperatura en la baja estratósfera para el mes de junio 2023



Fuente: National Weather Service, Climate Prediction Center (Web Site)

El comportamiento de temperaturas en el nivel de 70 hPa considerando todo el hemisferio sur en un día típico de junio, es mostrado en la Figura 11 en donde se aprecia que las temperaturas en el continente Antártico han registrado valores entre -75°C a -85°C , debido al inicio de la estación de invierno. Las temperaturas en dicho continente seguirán disminuyendo, por lo menos, en los dos próximos meses que vienen, por factores atmosféricos (circulación atmosférica) y astronómico (mayor alejamiento de la tierra con respecto al sol).

Cabe remarcar que la posición de la tierra con respecto al sol (inclinación con respecto al plano ecuatorial) juega un papel importante en los procesos físico-químicos de la atmósfera. Asimismo, es importante señalar que aparte del factor astronómico, una disminución de la temperatura en la estratósfera de la región tropical, se debe a una baja mezcla de aire con contenido de ozono proveniente de otras latitudes.

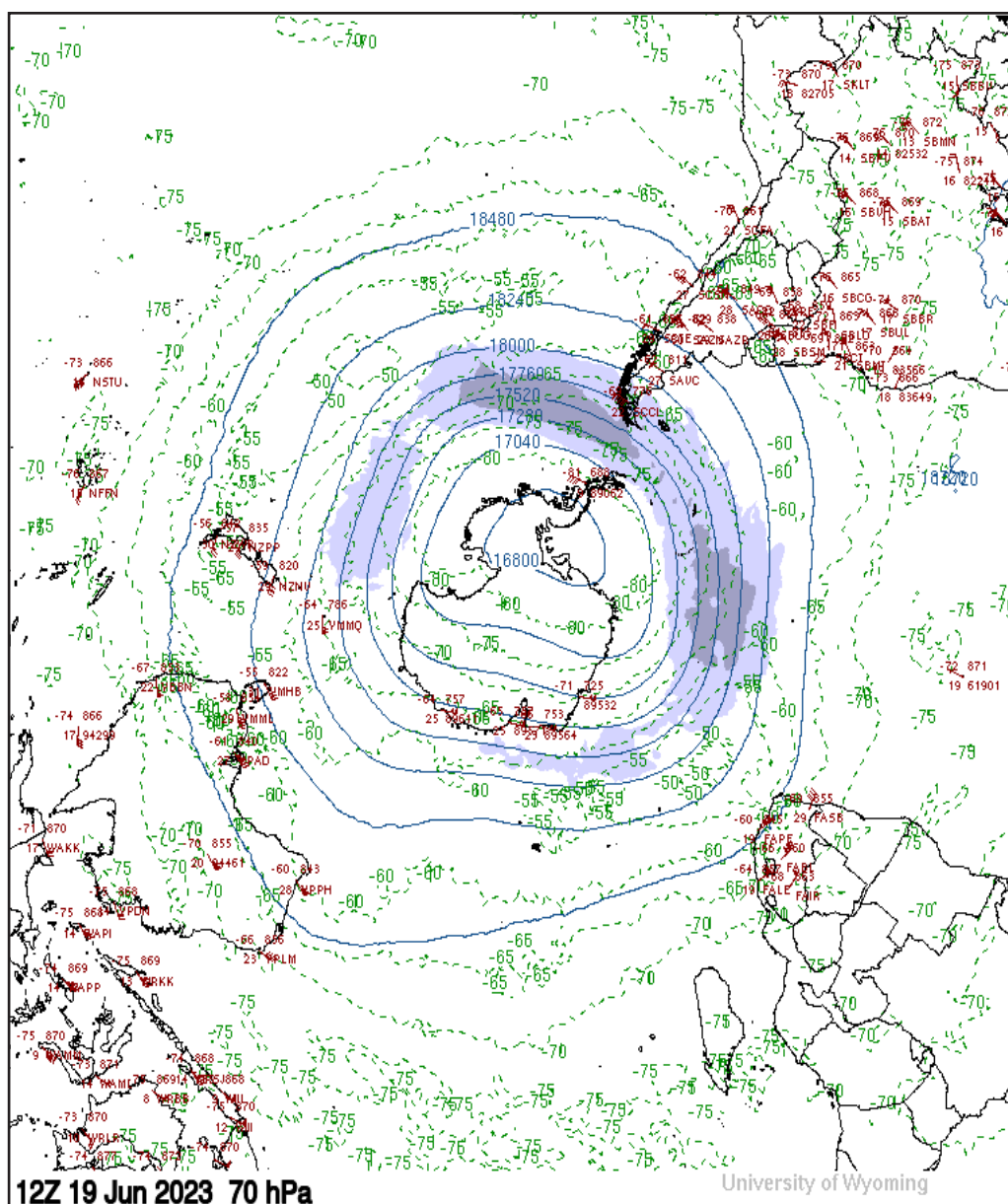
Por otro lado, en la región tropical o latitudes bajas, las temperaturas en este mes, en la atmósfera alta (baja, media y alta estratósfera), como se ha mencionado anteriormente, vienen registrando valores muy por debajo de sus normales climáticas, permitiendo aún un lento incremento de las

concentraciones de ozono atmosférico.

Para el caso de nuestro país las temperaturas a este nivel han continuado registrando un valor aproximado entre -74°C y -75°C , (similar al mes anterior), siendo uno de los factores para que las concentraciones de ozono atmosférico sean algo similares con una ligera tendencia al incremento. A estas condiciones se le aúna el ingreso de vientos provenientes del hemisferio norte pero con menor continuidad, los cuales permitieron un ligero incremento de ozono en países de latitudes bajas.

FIGURA N° 11

Comportamiento de la temperatura en 70 hPa para el hemisferio sur (19 junio 2023)



Fuente: Universidad de Wyoming



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

III.-CONCLUSIONES

1. El mes de junio se caracteriza porque climáticamente las concentraciones de ozono sobre nuestro país (los medidos en superficie) son similares al mes de mayo, los más bajos de todo el año. En el presente mes el valor registrado fue de 243.6 UD como valor promedio. Este ligero aumento tuvo como causa el ingreso de esporádicos flujos de viento provenientes del hemisferio norte, pero aun así han continuado siendo bajos. Se aúna a este factor la poca mezcla que se registró en la estratósfera baja.
2. En cuanto a la variación temporal (promedio diario) de la concentración de ozono durante el mes, medidos con el espectrofotómetro Dobson en el OVA Marcapomacocha, oscilaron entre 240.2 UD a 249.7 UD, siendo ligeramente mayores al mes pasado. Esta variabilidad durante el mes, es explicado por el párrafo anterior, pero también se le suma a ello, el incremento de la temperatura del aire al nivel de 70 hPa entre las latitudes de -25°N a 25°S.
3. Con respecto a la distribución vertical del ozono, en el OVA Marcapomacocha, según información obtenida por el Metop-C/ GOME-2, durante un día típico del mes de junio, se puede concluir que la máxima concentración de la misma, en la región tropical, continua registrándose entre los 50 hPa y los 10 hPa (media estratósfera) con valores de 15 UD y 24 UD (también similares al mes anterior), mientras que en latitudes medias del hemisferio sur, la altura de las máximas concentraciones se dio entre los 80 hPa y 15 hPa con valores entre 15 UD y 26 UD. La altura de la máxima concentración de ozono sigue relacionada con la variabilidad de la circulación atmosférica en estas dos subcapas, así como a las variaciones termales. Debido a la mayor densidad del aire, la altura en la región tropical es mayor.
4. En latitudes altas del hemisferio norte, se observó la misma cobertura en área, pero con concentraciones de ozono bajas con valores entre 13 UD a 23 UD, especialmente entre los 300 hPa y 30 hPa. El cambio de estación en dicho hemisferio, de primavera a verano, permite registrar concentraciones menores debido a las reacciones fotoquímicas en la atmósfera.
5. A pesar de que el ozono es un gas traza, los valores de relación de mezcla mostrados nos indican que las concentraciones, si bien es cierto en valor numérico no son altos, a nivel físico son muy importantes porque controlan el ingreso de la radiación ultravioleta a la superficie terrestre. Sobre nuestro país, especialmente en la región central, la relación de

mezcla fue baja (menor al mes pasado) con valores entre $2.30\text{e-}06$ kg/kg y $2.35\text{e-}06$ kg/kg, siendo uno de los causantes de la baja concentración de ozono en todo el año, mientras que en la zona norte la mezcla osciló entre $2.50\text{e-}06$ kg/kg y $2.55\text{e-}06$ kg/kg para finalmente en la zona sur la mezcla oscile entre $2.70\text{e-}06$ kg/kg y $2.75\text{e-}06$ kg/kg. Dichos valores nos indican que tanto en la zona norte como sur, las concentraciones de ozono atmosférico fueron mayores a lo registrado en la zona central.

6. Por otro lado, la concentración de vapor de agua que se pueda tener en la estratósfera es importante para el balance radiativo de la atmósfera, así como para la variabilidad en el comportamiento del ozono. Sobre nuestro país, al nivel de 46 hPa, se observaron concentraciones bajas en el sur (3.80 ppmv), mientras que en la sierra central valores entre 3.85 ppmv y 3.95 ppmv para finalmente en la sierra oriental norte, concentraciones entre 4.00 ppmv a 4.10 ppmv. Dichas concentraciones podrían seguir estando relacionadas con el sobrecalentamiento del agua de mar en todo nuestro litoral, a través de advecciones húmedas.
7. Los mapas de ozono total atmosférico (provenientes de la plataforma OMI del satélite AURA de la National Aeronautics and Space Administration - NASA), muestran concentraciones bajas, en la franja costera peruana, con valores entre 235 UD y 250 UD. En otras partes del país las concentraciones de ozono oscilaron entre 225 UD y 275 UD. Este comportamiento, en forma general, responde a que las temperaturas en todas las capas de la estratósfera se encuentran por debajo de sus valores climáticos, así como a la predominancia de vientos mayormente zonales, aunados a la baja relación de mezcla.
8. En lo que concierne al comportamiento de la temperatura en la baja estratósfera (70 hPa) se puede mencionar que, durante el mes de junio, los valores se caracterizaron por un ligero incremento (-74.0°C a -73°C), permitiendo que se registrara un ligero aumento en las concentraciones de ozono.
9. Debido a que junio es un mes donde los niveles de radiación solar continúan con una tendencia a la baja debido a la finalización de la estación de otoño e inicio del invierno, trae como consecuencia, que los procesos físicos-químicos en la estratósfera sean cada vez menos dinámicos influyendo grandemente en las concentraciones de ozono atmosférico.
10. El periodo cálido que se viene registrando a nivel global por efecto del Fenómeno El Niño, influye en los procesos de circulación atmosférica

tanto a nivel de tropósfera como estratósfera permitiendo la variabilidad en las concentraciones de ozono atmosférico.

11. Se requiere disponer de información real de la concentración de ozono total a nivel del perfil vertical de la atmósfera a fin de realizar el contraste respectivo con lo obtenido por los satélites y determinar la desviación respectiva. En los periodos donde no se tenga información real se podría utilizar el brindado por los satélites aplicando ciertos algoritmos de cálculo.



Dirección de Meteorología y evaluación Ambiental Atmosférica:

Ing. Gabriela Rosas Benancio

grosas@senamhi.gob.pe

Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico:

Ing. Jhojan Rojas Quincho

jprojas@senamhi.gob.pe

Análisis y Redacción:

Ing. Orlando Ccora Tuya occora@senamhi.gob.pe

Bach. Juan Tacza Ordoñez

Tco. Rosalinda Aguirre Almeyda

Tco. Julia Astudillo Capcha

Suscríbete para recibir la edición digital al enlace: <https://forms.gle/cqZit9WHG7gLktbT6>

Próxima actualización: 15 de agosto de 2023



**Servicio Nacional de Meteorología e
Hidrología del Perú - SENAMHI**

Jr. Cahuide 785, Jesús María

Lima 11 - Perú

Central telefónica: [51 1] 614-1414 anexo 444

**Subdirección de Evaluación del Ambiente
Atmosférico:**