

ABRIL 2025
Vol.04

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





Introducción

La luz solar es energía radiante electromagnética, compuesta principalmente por el espectro de radiación ultravioleta, visible e infrarroja. La radiación ultravioleta tiene una longitud de onda más corta que la luz visible y puede producir quemaduras en la piel y otros efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente.

Afortunadamente para la vida en la tierra, existe la capa de ozono, como se conoce a la concentración máxima de ozono presente en la atmósfera superior (estratosfera) de manera natural. La capa de ozono filtra la mayor parte de la radiación ultravioleta proveniente del sol, especialmente la radiación ultravioleta B, dejando pasar la radiación ultravioleta A, necesarios para la vida en la tierra.

Lamentablemente, el hombre ha creado algunos productos químicos a base de carbono y halógenos (Cl, Br), conocidos como halocarbonos, que se han usado principalmente para la fabricación de refrigeradores, congeladores, sistemas de aire acondicionado, aerosoles y espumas sintéticas. Estos halocarbonos son sustancias agotadoras de ozono (SAO) y producen la destrucción y adelgazamiento de nuestra capa de ozono, que permite que la radiación ultravioleta B ingrese con mayor intensidad a la tierra y afecten la vida en el planeta.

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

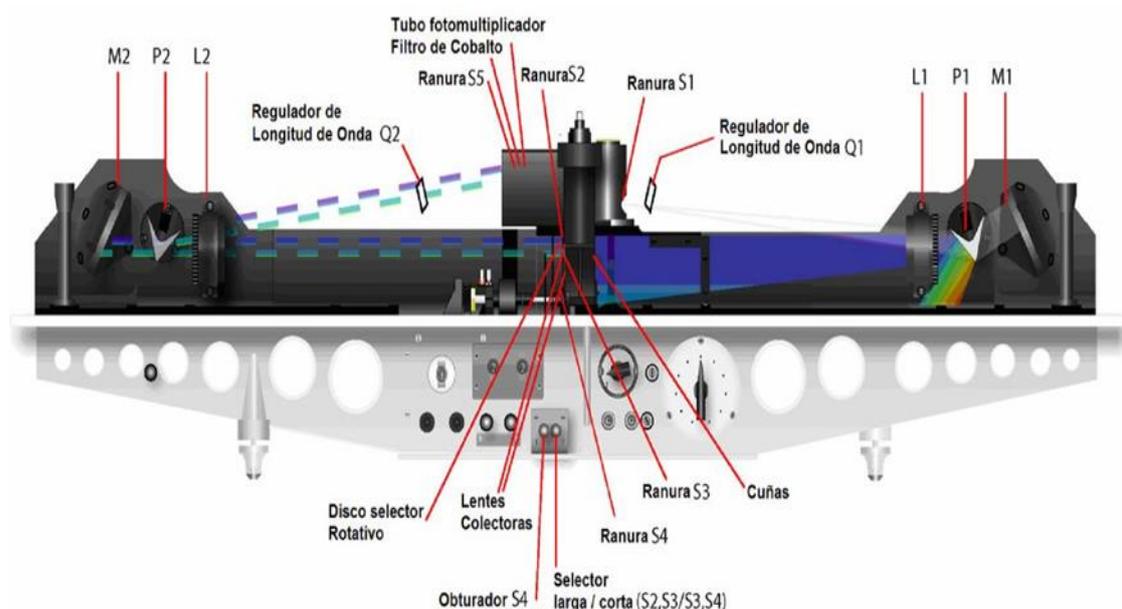
1. MEDICIÓN EN SUPERFICIE

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. MEDICIÓN 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 hiperespectrales 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

En el mes de abril la estratósfera baja y media de la región tropical ha registrado características térmicas con una tendencia al calentamiento, pero aun así por debajo de sus valores climáticos, mientras que en la estratósfera alta se registró un enfriamiento durante gran parte del mes, pero al igual que lo ocurrido en las dos capas anteriores, estuvieron por debajo de sus valores climáticos. Las concentraciones de ozono registraron una ligera disminución en este mes, los cuales han estado asociados mayormente a una baja en la temperatura de la estratósfera alta, así como al mayor ingreso de vientos del oeste, suroeste y del sur, desde latitudes bajas del hemisferio norte hacia latitudes bajas del hemisferio sur. La relación de mezcla de ozono, registró una ligera disminución la cual también ayudó a que las concentraciones de ozono atmosférico empiecen a disminuir sobre nuestras latitudes.

En lo que respecta específicamente al flujo de vientos, éstas se comportaron algo parecidas al mes anterior en gran parte de la estratósfera salvo en el caso de los 100 hPa en donde los flujos fueron mayormente del oeste, ósea del segundo y tercer cuadrante, mientras que en 70 hPa y 50 hPa los flujos fueron mayormente del tercer y cuarto cuadrante, respectivamente. En la estratósfera media los flujos fueron prácticamente del este, al igual que el mes anterior. En ese sentido, la estratósfera baja y media realizó un aporte relativamente moderado de ozono atmosférico hacia nuestras latitudes.

En el caso de la alta tropósfera, los sistemas atmosféricos que gobernaron el tiempo sobre nuestro país, aun permitieron el traslado de moderadas cantidades de humedad hacia nuestro país a pesar de la finalización de la estación de verano, ocasionando una incidencia en el comportamiento del ozono atmosférico, por lo menos en la baja y media estratósfera. Desde el inicio de la estación de otoño en el hemisferio austral, la humedad atmosférica ha empezado a disminuir entre la alta tropósfera y baja estratósfera, para dar paso a condiciones relativamente secas teniendo incidencia en las concentraciones de ozono en esos lugares. La convección húmeda mínima ha continuado registrándose, como hace varios meses, en la región norte del país (específicamente en los departamentos de Tumbes y Piura) debido a la invasión de masas de agua cálidas provenientes del hemisferio norte, los cuales han sido frecuentes en todo el mes, pero con menor intensidad, presentando incidencias no solo en la circulación de los vientos de la atmósfera baja y media sino también en la atmósfera alta. Se debe tener presente que estos procesos, así como la presencia todavía de concentración de humedad moderada en la baja y media estratósfera (100 hPa y 70 hPa) llegan a tener repercusión en las propiedades físicas y químicas de dicha capa, permitiendo obtener valores de ozono atmosférico ligeramente menores al mes pasado aunados a la circulación de los vientos.

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 (niveles inferiores de la atmósfera), 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).

Es importante tener en cuenta que esos regímenes de circulación, así como los procesos que involucran el establecimiento de la estación de otoño, interactúan entre sí en las diferentes capas de la atmósfera, permitiendo una disminución en el transporte de calor o energía. En ese sentido, se analiza la capa de 70 hPa (día 19 de abril) dado de que es representativa de la baja estratósfera. A lo largo del mes, climáticamente sobre nuestras latitudes, las concentraciones de ozono empiezan a registrar un comportamiento a un ligero descenso debido a la aparición de vientos meridionales o cuasi meridionales, pero con menor persistencia, los cuales todavía aportan moderadas concentraciones de ozono atmosférico sobre nuestras latitudes. Durante, el mes de abril los vientos fueron mayormente del oeste en la estratósfera baja con predominancia del segundo y tercer cuadrante principalmente para luego ser netamente predominante del este, en la estratósfera media, manteniendo temperaturas bajas. Cabe mencionar que también se registraron vientos bastante esporádicos del sur, norte y noroeste, los cuales han continuado aportando moderadas cantidades de ozono atmosférico. En este mes, al igual que el mes pasado, se registró menor cantidad de núcleos anticiclónicos, en esta parte del hemisferio, por lo que permitieron un ingreso de masas de aire del sur y noroeste.

En latitudes medias y altas del hemisferio sur, la circulación de vientos ha continuado siendo zonal positivo (70 hPa), pero con menor intensidad, aportando concentraciones relativamente bajas de ozono atmosférico sobre estas regiones debido a procesos de formación de vórtice polar, debido a la baja de temperaturas.

En cuanto al régimen térmico (latitudes 25°N - 25°S), tal como sucintamente se mencionó anteriormente, se puede señalar lo siguiente: en la estratósfera baja se ha observado comportamientos con tendencia al ascenso, pero aún por debajo de sus valores normales (100 hPa, 70 hPa y 50 hPa). En el caso de los niveles de 70 hPa y 50 hPa, la temperatura, en este mes, se incrementó casi en 3.0°C, permitiendo acercarse a sus valores climáticos, aunque cabe mencionar que durante gran parte del año 2024 y hasta este año 2025, las temperaturas han estado por debajo de sus normales. Los causales podrían ser; la alta actividad fotoquímica, el incremento de la humedad atmosférica y la baja relación de mezcla. En lo concerniente al nivel de la estratósfera alta más bien disminuyeron con respecto al mes pasado, pero siempre por debajo de sus valores climáticos. En los niveles de 30 hPa y 10 hPa se registraron incrementos sustanciales de la temperatura alrededor de 5.0°C, pero a pesar de ello se encontraron por debajo

de sus normales. Para el caso de los niveles de 5 hPa, 2 hPa y 1 hPa, el comportamiento estuvo también por debajo de sus valores climáticos. A pesar de todo este comportamiento en la estratósfera, las concentraciones de ozono lograron registrar una ligera disminución en la región tropical, permitiendo guardar relación con el comportamiento climático. El comportamiento térmico en la baja estratósfera estaría relacionado por la presencia de vientos del segundo y tercer cuadrante, en algunos momentos vientos provenientes del noroeste y suroeste, En la alta estratósfera todos los flujos de viento fueron del este con temperaturas muy por debajo de sus valores climáticos. En el caso de Perú, se debe remarcar que, de acuerdo a la información de superficie, las concentraciones de ozono en este mes han sido inferiores al mes pasado (a nivel promedio mensual), con una tendencia a continuar registrando valores inferiores, en el mes siguiente. Cabe enfatizar que tanto los valores mínimos y máximos diarios de ozono sobre nuestro país, en este mes, fueron inferiores. La amplitud entre dichos valores en abril, ha sido superior en 11 a 12 UD al mes pasado. Figura 3.

Con el fin de sustentar lo descrito a nivel de baja estratósfera, podemos mencionar que, de la vigilancia realizada en el mes de abril a nivel de superficie, en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica (OVA) Marcapomacocha se observó que el comportamiento horario de la concentración de ozono atmosférico en general, estuvo oscilando entre 236.3 UD y 248.1 UD (UD = Unidades Dobson). A nivel promedio mensual fue inferior.

Se debe indicar que en las primeras horas del día las concentraciones de ozono son relativamente altas debido al ozono acumulado en horas de la noche (en abril, climáticamente, se registra menos ozono) 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 primeras horas de la mañana la incidencia de la radiación ultravioleta, en esta temporada, tiende a mantener valores algo menores, por ende las concentraciones de ozono serán relativamente moderadas (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 entre altos a extremadamente altos (en los meses de verano son mayores), permite una reducción del ozono (mayor actividad fotoquímica) 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 (reacciones químicas durante el día, de compuestos o gases generadores de ozono troposférico) 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

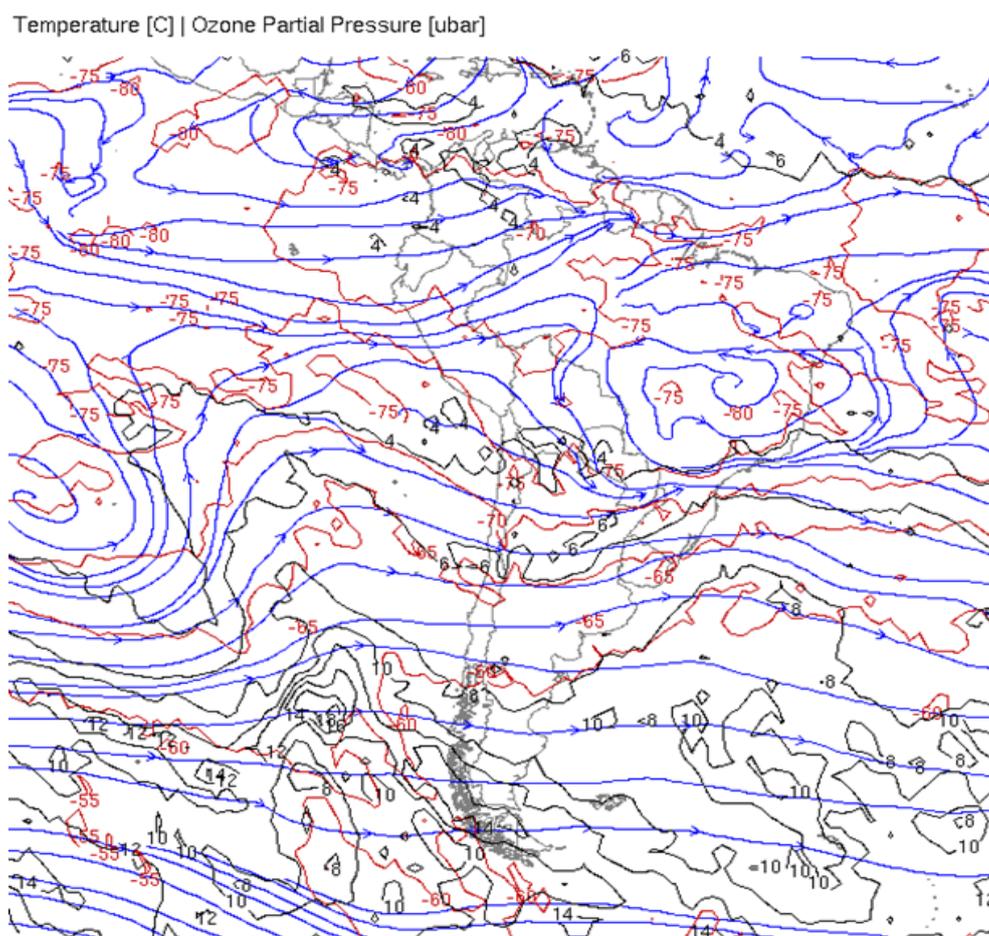
ultravioleta ha mostrado una ligera disminución debido al establecimiento de la estación de otoño. En algunas regiones, especialmente en el sur han sido ligeramente menores al mes pasado, mientras que en la región central y norte los niveles también sufrieron una disminución. La cantidad de aerosoles ha mostrado una tendencia al descenso, aunque en algunas regiones se ha mantenido similar al mes pasado debido todavía a los remanentes de la finalizada temporada de lluvias lo cual permite registrar menor humedad sobre nuestras regiones permitiendo una mayor transparencia atmosférica, principalmente en la región andina. Se espera que en el mes siguiente dichos valores de radiación, continúen disminuyendo debido al mayor establecimiento de la estación de otoño.

Parte de la humedad de la tropósfera también se distribuye en la baja estratósfera permitiendo una menor formación de ozono atmosférico, especialmente a nivel de 100 hPa.

FIGURA N°2

Flujos de masas de aire zonales en la región tropical

Fuente: Weather Service de la University of Wyoming



University of Wyoming

0 Hour 70 hPa Forecast Valid 18Z Sat 19 Apr 2025

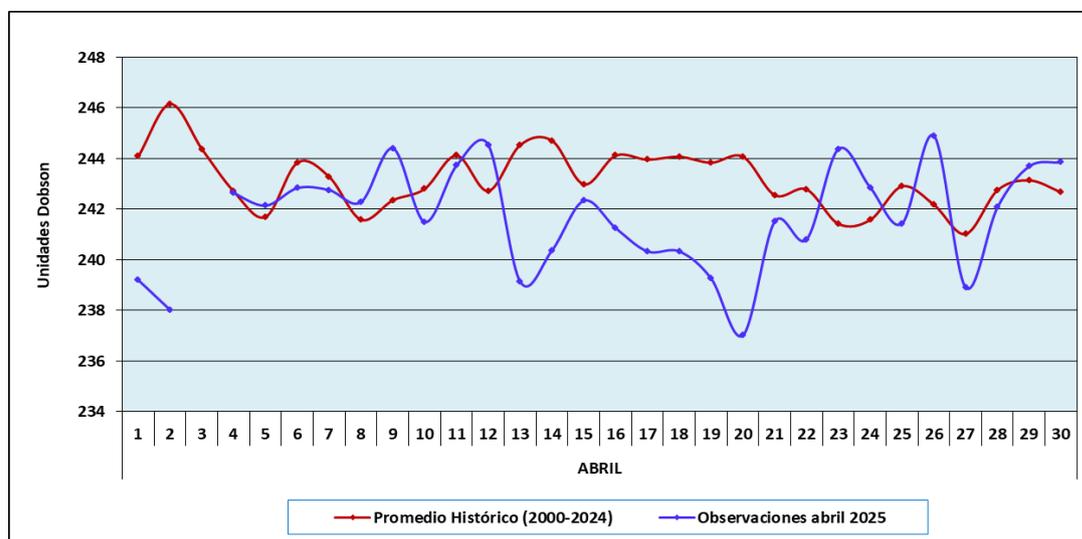
El comportamiento de la concentración de ozono atmosférico promedio diario mensual multianual (2000-2023) del mes de abril oscila entre 241.0 UD y 246.1 UD aproximadamente (Figura 3), mientras que los medidos en el mes de abril del presente año, oscilaron entre 237.0 UD y 244.9 UD.

En la figura, se aprecia que los valores registrados en el presente mes, estuvieron un 66% por debajo de sus valores climáticos, mientras que un 34% por encima (existe un desfase de hasta 7 UD entre el valor histórico y el registrado durante el mes de abril del presente año).

Cuando se comparan ambas series se ha venido observando, como siempre, un comportamiento variable, con valores que en algunos momentos se acercan a sus normales. Por ejemplo, durante la segunda década del mes, los valores se alejaron uno con respecto al otro, (algo parecido al mes anterior) atribuibles probablemente a los cambios en los flujos de viento, los cuales han sido mayormente del segundo y tercer cuadrante aunados a la cantidad de vapor de agua emitida a la atmósfera por el volcán Hunga Tonga en el Pacífico Sur, en enero de 2022, el cual se piensa, va originando también efecto en latitudes bajas muy aparte de las medias y altas del hemisferio sur. Las concentraciones de ozono sobre nuestro país, con respecto al mes de marzo ha registrado valores inferiores.

FIGURA °3

Comportamiento temporal de la concentración de ozono atmosférico en el OVA Marcapomacocha. Abril 2025.



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. 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 241.7 UD inferior en 1.2 UD al promedio mensual multianual (242.9 UD).

Se debe tener presente que, en la región tropical durante los meses de la estación de otoño, vale decir desde el 21 de marzo hasta el 30 de junio, las concentraciones de ozono tienden al descenso (climáticamente), en un primer momento, debido a factores astronómicos, así como a procesos de la circulación a nivel de estratósfera (vientos del este mayormente, así como una moderada relación de mezcla) y una alta actividad fotoquímica. En un segundo momento a partir del mes de febrero hasta marzo, tienden al ascenso por la mayor actividad fotoquímica. 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), permitiendo un déficit de ozono atmosférico en latitudes bajas (enero, así como en los meses de mayo-junio). 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. En el mes de abril, se ha empezado a registrar masas de aire provenientes principalmente del tercer y cuarto cuadrante al nivel de 70 hPa, ósea vientos del suroeste, y sureste. Claro está que también se registraron vientos de otras direcciones (pero con menor persistencia), como por ejemplo del noroeste y noreste, trasladando bajas concentraciones de ozono atmosférico, lo que hizo que se registre una ligera disminución, sobre nuestras latitudes.

Los procesos de advección húmeda han continuado siendo bajos en marzo, con excepción de lo ocurrido en la zona norte del país (departamento de Tumbes y Piura), donde se ha registrado invasiones de masas de agua cálidas provenientes del Pacífico norte, pero de menor intensidad durante parte del mes, manteniendo condiciones de moderada humedad en toda esa región. Probablemente se haya registrado algún proceso de advección húmeda tropósfera-estratósfera (regionalmente se han registrado condiciones normales), así como una moderada actividad fotoquímica el cual haya sido un factor adicional para que las concentraciones de ozono empiecen a disminuir con respecto al mes anterior. A esto se le añade el flujo de vientos provenientes del suroeste y sureste (a nivel de 70 hPa), los cuales, en cierta manera, han aportado bajas concentraciones de ozono hacia nuestras latitudes. Un factor que interactúa con estos procesos es la humedad atmosférica, el cual ha empezado a disminuir con respecto al mes pasado a nivel de 100 hPa. En las demás capas de la estratósfera baja y media han sido muy bajos.

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, continúa observándose un desfase entre ellos. Con respecto a la información proveniente del AURA/OMI, durante el 65% de días del mes de marzo, los valores de ozono diario medidos estuvieron por debajo de lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson. Para el caso de SUOMI/OMPS, ocurre lo mismo, durante el 61% de días del mes estuvieron por debajo de lo registrado en superficie. Figura 4.

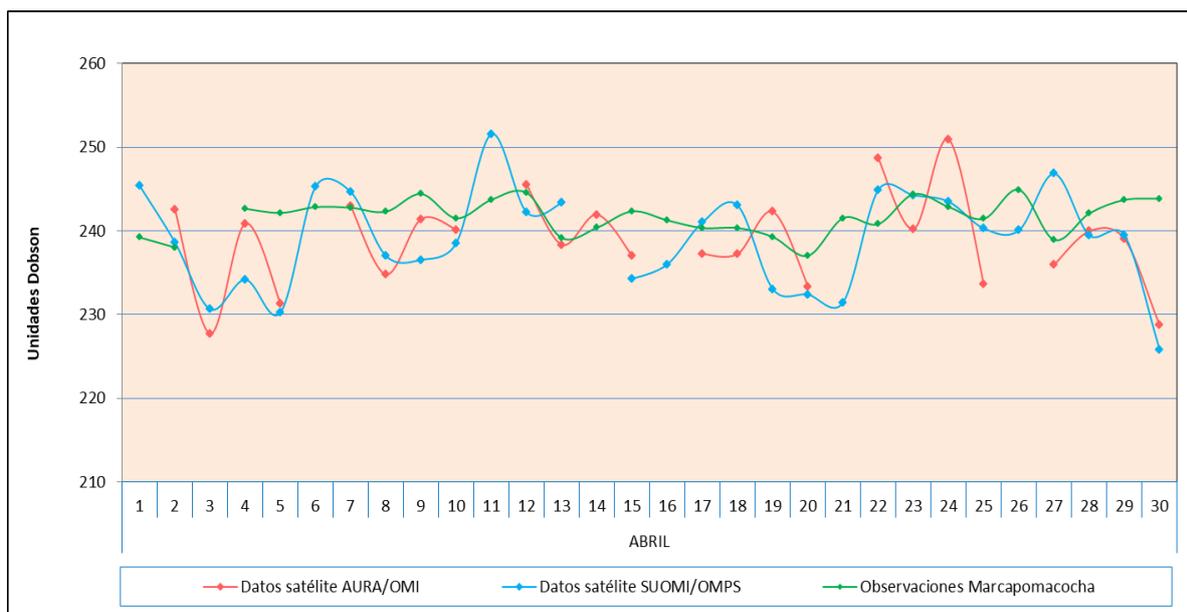
De este análisis podemos decir que la información proveniente de estos dos satélites es menor a lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson, cuando anteriormente eran superiores, Existen días donde las diferencias entre los valores registrados por el satélite y el medido en superficie, son bastante altas en el orden de 1 a 18 UD como producto del tipo o forma de medición que realiza el satélite, así como por factores de circulación atmosférica.

Cabe mencionar, que la tendencia de las concentraciones de ozono medidos en superficie ha registrado una disminución durante el mes, debido a la circulación de los vientos en la atmósfera (del noroeste y sureste), así como a moderados procesos fotoquímicos, mientras que los medidos con los satélites, también mostraron esa tendencia, pero muy ligeramente.

El pronóstico, de acuerdo a la climatología, es que las concentraciones de ozono continúen disminuyendo hasta el mes de junio debido a la disminución de los procesos de reacciones fotoquímicas como al mayor establecimiento de la estación de otoño.

FIGURA N°4

Comparación de información proveniente de las plataformas OMI y OMPS con lo registrado en superficie, en el OVA Marcapomacocha.



Perfil Vertical de Ozono Atmosférico

Por lo general, el 10% de la concentración de ozono se encuentra en la tropósfera y el otro 90% en la estratósfera. En ese sentido, cobra vital importancia 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 (cambios en la transferencia radiativa o circulación de los vientos). En los últimos 40 años el uso de las sustancias agotadoras de ozono empezó a disminuir para dar paso al uso de sustancias sustitutas, los cuales al fin y al cabo destruyen el ozono atmosférico, pero en menor cantidad. Actualmente es notoria, la emisión de 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. Se suma a ello las implicancias que pudiera tener, en las concentraciones de ozono, la erupción del volcán Hunga Tonga, anteriormente explicado en párrafos anteriores.

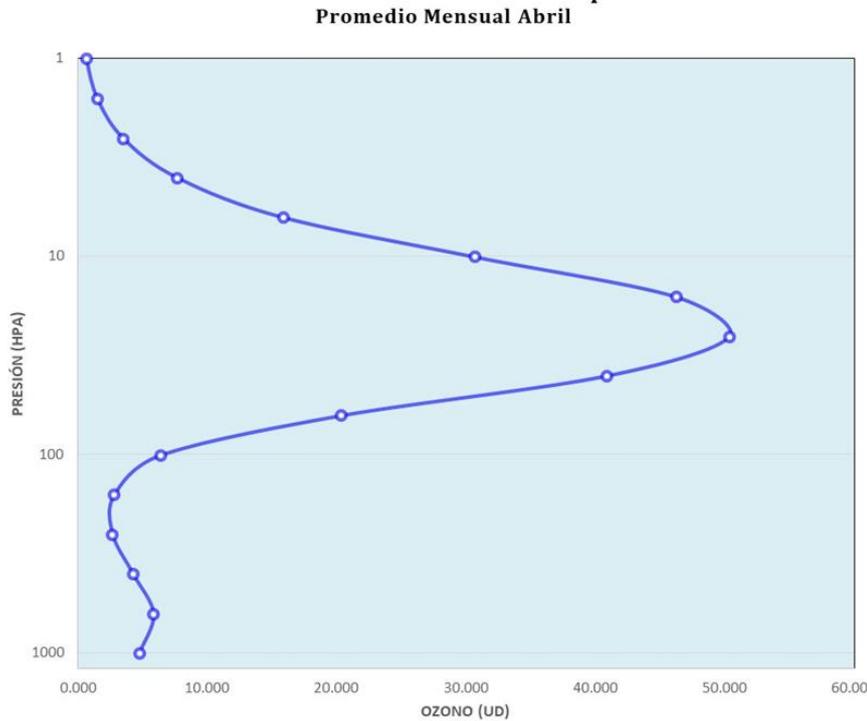
Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial), desde el año 2000 hasta el 2020 se han observado por medio de mediciones del perfil vertical de la atmósfera y el desarrollo de modelos numéricos, una disminución en las concentraciones de ozono (~2% por década) en la estratósfera baja de la región tropical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

Teniendo en cuenta lo descrito líneas arriba y de acuerdo a la figura 5, obtenido de la National Aeronautics and Space Administration - NASA, plataforma OMPS, se ha podido observar el comportamiento típico del perfil vertical de ozono para el mes de abril 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 para 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 menores a lo observado en el mes pasado, de acuerdo al perfil mostrado. Las concentraciones mayores la encontramos en la media estratósfera con valores entre 38 UD a 51 UD.

FIGURA N°5

Perfil vertical de ozono atmosférico – OVA Marcapomacocha
Fuente: National Aeronautics and Space Administration – NASA



Según información de perfil vertical de ozono atmosférico para un día típico del mes de abril (día 18) 2025 obtenida por Metop-C/COME-2, muestra para el hemisferio norte concentraciones ligeramente mayores al mes pasado, cuyos valores han oscilado entre 35 UD y 40 UD, entre la baja y media estratósfera (el área de cobertura latitudinal de estas concentraciones bajas se dio entre 40N°-90°N). A partir del 21 de marzo, dicho hemisferio, se encuentra en la estación de primavera, registrándose altas concentraciones de ozono en latitudes altas con tendencia a mantenerse debido a la presencia de vientos del este y noreste. Por otro lado, el régimen de temperaturas en la estratósfera baja y media se ha incrementado y se ha mantenido por debajo de sus valores normales durante el mes.

Se debe tener presente que, en la región tropical, se forma la mayor cantidad de ozono siendo incluso mayores a los formados en latitudes medias y altas de ambos hemisferios, pero debido a factores de circulación regional como el de Brewer-Dobson, la Oscilación Quasi Bienal, así como de procesos de reacciones fotoquímicas y térmicas, en la estratósfera media son redistribuidas hacia latitudes medias y altas de ambos hemisferios, permitiendo una disminución de la misma. El problema se ahonda cuando se registra mayor contenido de humedad, especialmente cuando se inicia la temporada de lluvias entre los meses de noviembre y marzo.

Se debe mencionar que la altura de las concentraciones de ozono (13 UD a 25 UD) en latitudes bajas del hemisferio norte fue de 50 hPa y 8 hPa, mientras que en latitudes bajas del hemisferio sur (13 UD a 25 UD) la altura fue de 40 hPa y 10 hPa. En latitudes medias del hemisferio sur más bien se registraron concentraciones un poco menores con valores entre 12 UD y 22 UD, pero a una altura entre 100 hPa y 15 hPa. La altura tanto en latitudes bajas y medias del hemisferio sur han continuado siendo inferiores al mes pasado.

En esta temporada, las concentraciones de ozono, por lo menos en esta parte de la región tropical, han registrado una ligera disminución, por factores de circulación de vientos mayormente zonales positivos y cuasi meridionales, a nivel de 70 hPa, pero también a vientos del noroeste y sureste, aunados a los posibles efectos de las concentraciones de vapor de agua emitidas por el volcán submarino Hunga Tonga en enero de 2022.

Para el caso de nuestro país, concentraciones de ozono relativamente moderadas se han registrado entre los 50 hPa y 10 hPa con valores entre 14 UD y 22 UD, especialmente en la región central y sur del país, mientras que, en la sierra norte, las concentraciones oscilaron entre 13 UD y 23 UD a una altura de 40 hPa y 8 hPa.

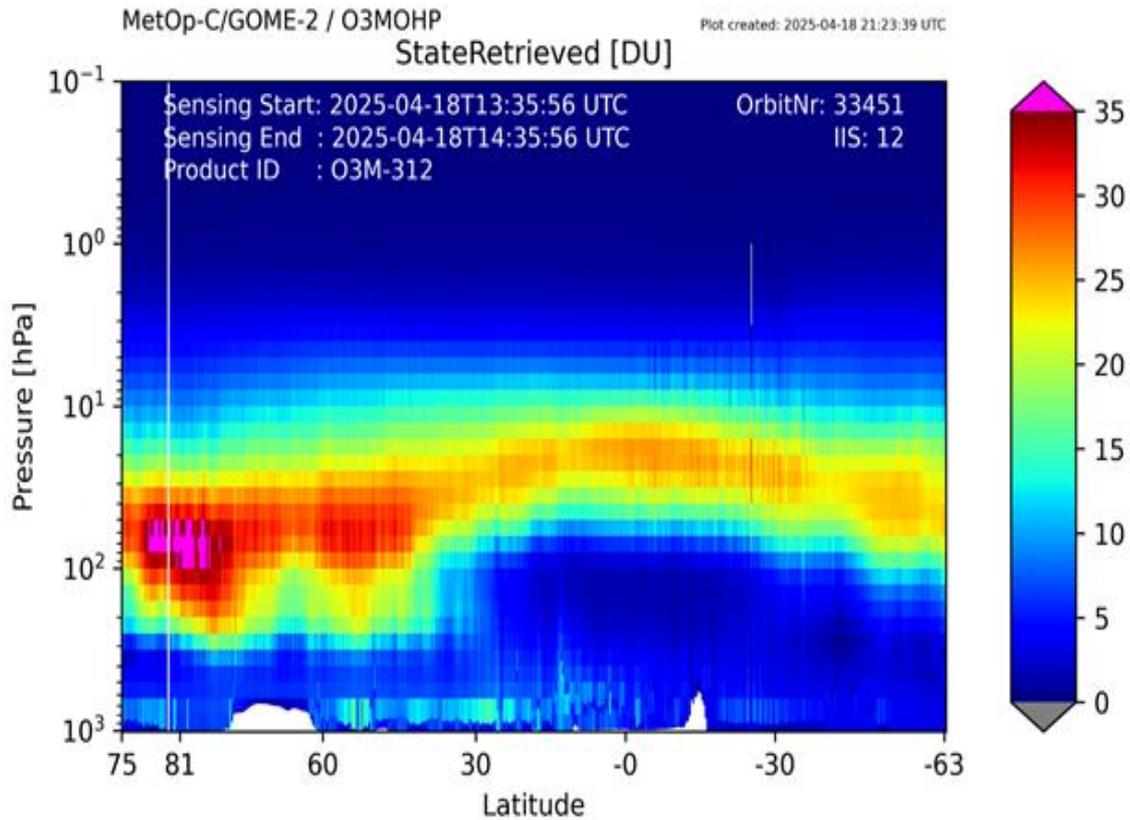
En los primeros niveles de la atmósfera (tropósfera) si bien es cierto que las concentraciones de ozono son bajas (oscilan, generalmente, entre 1 UD y 10 UD), esto se debe a los efectos residuales de la formación del ozono del día anterior, así como también a otros procesos físico-químicos. En la estación de verano austral, estos procesos son intensos debido al incremento de la actividad solar, mientras que en invierno disminuyen.

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 a la incidencia que tienen los gases de efecto invernadero, especialmente en la estratósfera baja aunados últimamente con la disminución del vapor de agua, debido a la consideración descrita en párrafos anteriores. Figura 6.

A la fecha se ha registrado en la región tropical, una circulación de viento mayormente del oeste, sureste, suroeste, pero también se han registrado vientos del noreste y noroeste los cuales han sido esporádicos aportando concentraciones bajas de ozono sobre nuestras latitudes, permitiendo que las concentraciones de ozono disminuyan. El hemisferio norte ingresó a un periodo más cálido frío, dado el acercamiento a la estación de verano, motivo por el cual tanto los procesos físicos como químicos llegan a tener una mayor actividad fotoquímica permitiendo un cierto incremento en las concentraciones de ozono.

FIGURA N°6

Perfil Vertical de Ozono según GOME-2
Fuente: Metop-C/GOME-2



VAPOR DE AGUA A 46 hPa

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.

En función a lo mencionado, se debe tener conocimiento, 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 SO₂ (dióxido de azufre), HCl (cloruro de hidrógeno o ácido clorhídrico) y vapor de agua. Es bastante probable que los efectos, en las concentraciones de ozono, se vean con el transcurrir de años, aunque ya hay indicios en el adelanto o retraso de la aparición del vórtice polar (hemisferio sur), así como variaciones en las concentraciones de ozono en la región tropical.

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 tropósfera y enfriamiento en la estratósfera y esto permitiría un cambio en las concentraciones de ozono y por ende su impacto en el balance de transferencia radiativa.

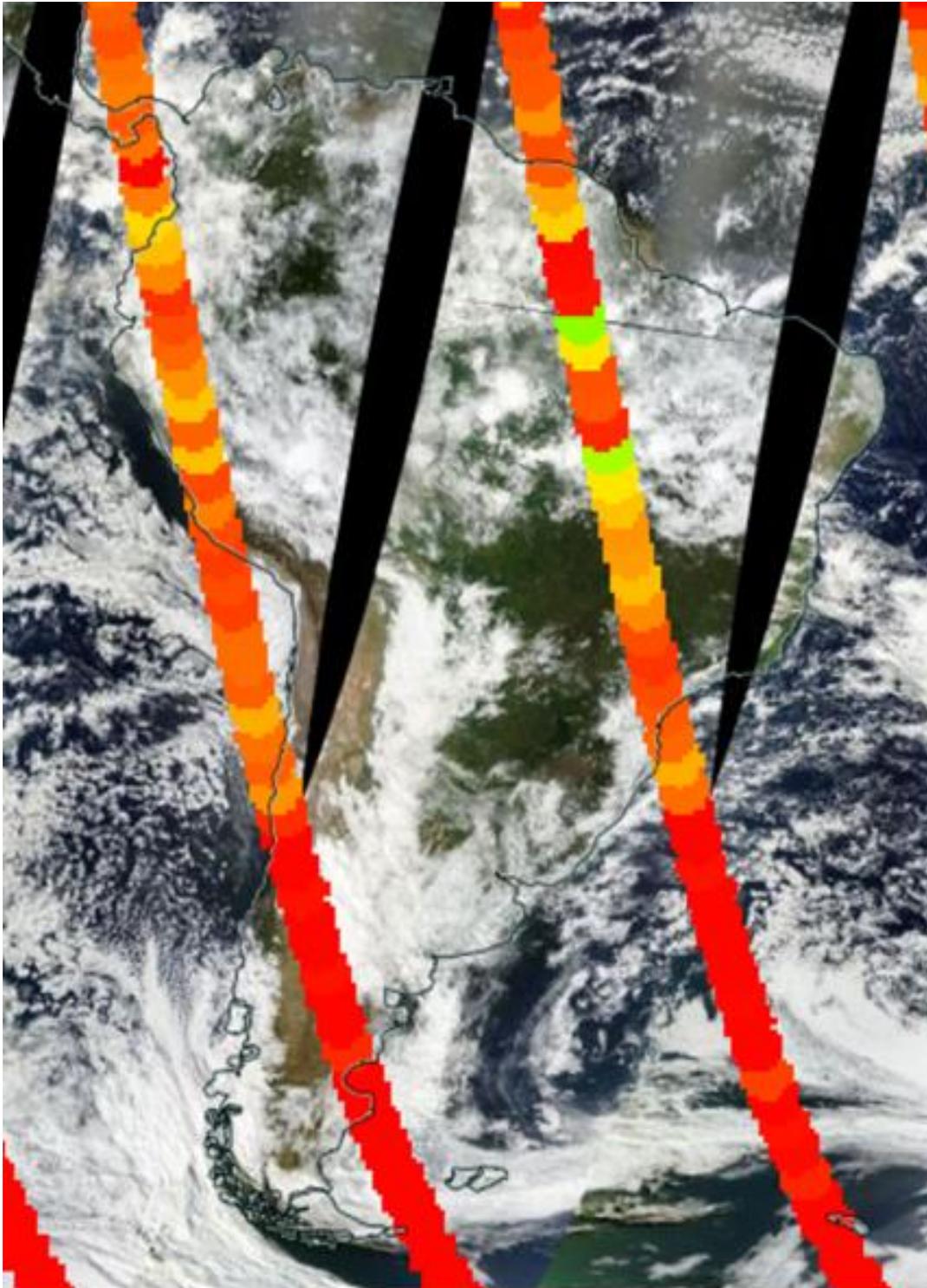
Hay que recalcar que a nivel global se viene registrando un periodo bastante cálido, probablemente como consecuencia de la emisión de los gases de efecto invernadero, que permiten retener el calor almacenado en la atmósfera y por ende concentraciones moderadas a altas de humedad relativa, los cuales tienen repercusión en las concentraciones de ozono. Para el caso de nuestro país las condiciones atmosféricas van ingresando a una etapa menos cálida debido a factores meteorológicos, astronómicos, así como los oceanográficos (anomalías negativas de la temperatura de agua de mar) los cuales interactúan entre sí y llegan a condicionar el régimen térmico a nivel de alta tropósfera como de baja estratósfera.

En la figura 7 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 (11 abril 2025), obtenida de la Earth Data de la National Aeronautics Space Administration - NASA. En ella se observa sobre Perú, concentraciones de vapor de agua moderadas (aunque algo menor al mes pasado) especialmente en la región norte y central del país, con una tendencia a mantener dichos valores. Por ejemplo, en la región norte del país, las concentraciones de vapor de agua oscilaron entre 3.90 ppmv a 4.00 ppmv, mientras que en la central valores entre 3.80 ppmv a 3.90 ppmv. En la región sur del país, concentraciones entre 3.90 ppmv y 4.20 ppmv (similares al mes pasado). La influencia de la temporalidad en la que se encuentra el hemisferio sur especialmente en la tropósfera alta influye grandemente en las concentraciones de vapor de agua que se puedan registrar en dicha capa, aunados a los vientos del sureste (50 hPa), permitiendo una disminución de las concentraciones de ozono atmosférico en esta región. Esta disminución también está asociada a otros factores como la baja en la relación de mezcla.

FIGURA N°7

Vapor de Agua a 46 hPa

Fuente: Earth Data de la National Aeronautics Space Administration – NASA



Cabe señalar que la humedad relativa es la cantidad de humedad que hay en un lugar con relación a la que habría si el aire estuviera completamente saturado de humedad, expresándose en porcentaje.

Utilizando información propia de altura, se puede mencionar que la humedad relativa al nivel de 100 hPa en la región sur del Perú (departamento de Arequipa), en el mes de abril fue de 32%, mientras que a nivel de 70 hPa fue de 12%, por otro lado, a 50 hPa fue de 3%. Finalmente, en la parte media de la estratósfera, vale decir, 30 hPa, la humedad relativa fue de 2% y a nivel de 15 hPa de 1%. El contenido de humedad en la atmósfera tuvo un ligero decremento al nivel de 70 hPa. A partir del 21 de marzo de 2025 se inició la estación astronómica de otoño, generando todavía algunos procesos de convección en la atmósfera baja (tropósfera alta) del hemisferio sur, lo cual tiene injerencia con las concentraciones de ozono que se registran en esta parte del país especialmente en la estratósfera baja.

COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO SOBRE EL PERÚ

En cuanto al análisis de los mapas en forma diaria, del mes de abril, provenientes de la plataforma OMI del satélite AURA de la National Aeronautics and Space Administration - NASA (Figura 8), para el caso de nuestro país, las concentraciones de ozono atmosférico, que muestra el mapa, continúan mostrando valores menores a lo registrado en el mes de marzo, especialmente en la región sur donde el decrecimiento fue mayor comparado a otras regiones del país, debido a que los flujos del suroeste y sureste en niveles de 70 hPa así como a flujos del este en la estratósfera media. Tal como se explicó en párrafos anteriores, se registró un ligero descenso en la concentración de humedad en la baja estratósfera (70 hPa) debido a los flujos de viento explicados anteriormente, así como también una reducción en la relación de mezcla, lo cual permitió una ligera disminución de ozono atmosférico en esas capas. El periodo de lluvias sobre nuestro país terminó y por lo tanto los sistemas en la alta tropósfera tienden a su desplazamiento hacia el hemisferio norte por lo que la circulación atmosférica entre la alta tropósfera y baja estratósfera empiezan a cambiar para dar paso a otros sistemas propios de la temporada, permitiendo una reducción en las concentraciones de ozono. Por el lado del Pacífico se registraron concentraciones de ozono altos.

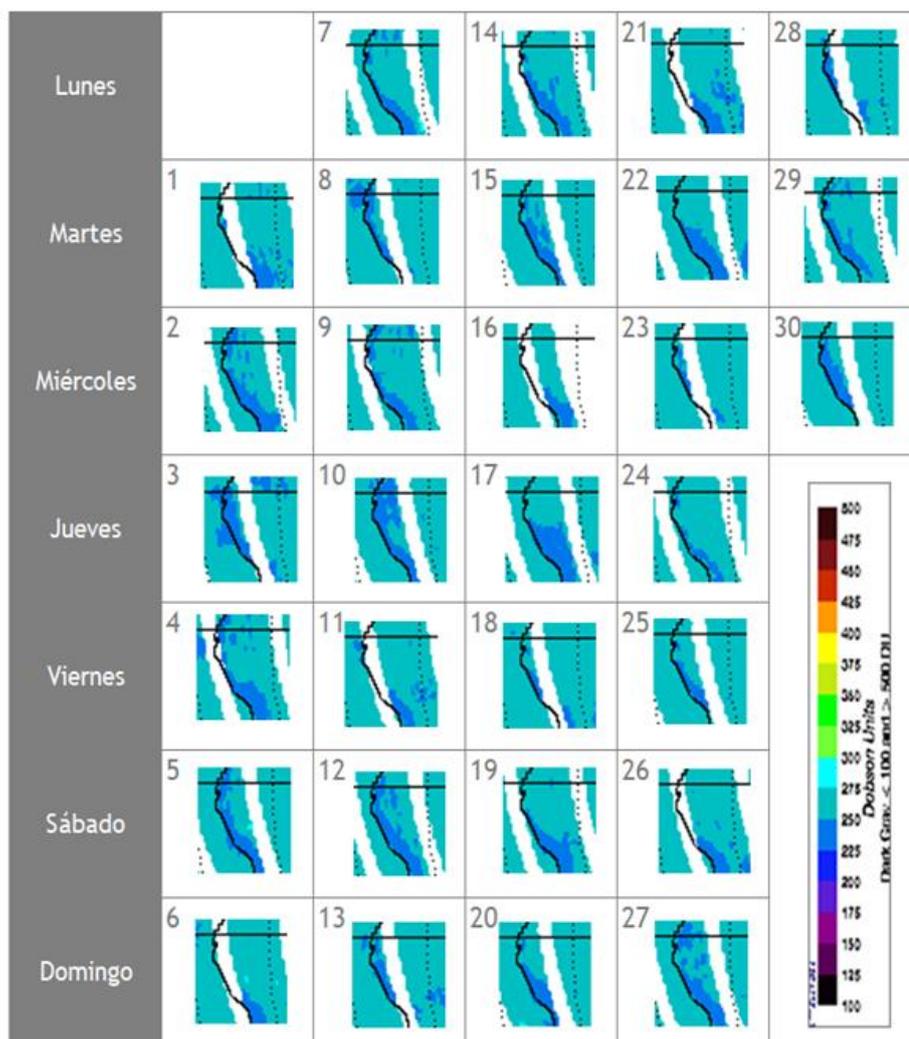
Durante gran parte del mes las concentraciones de ozono atmosférico disminuyeron, especialmente en la región central y sur del país, debido a una menor relación de mezcla de ozono, así como a una menor actividad fotoquímica. Las concentraciones de ozono en la región central y sur oscilaron entre 235 UD y 240.0 UD, con una tendencia a continuar disminuyendo por lo menos hasta el mes de junio, debido a la mayor presencia de vientos zonales

negativos. Las concentraciones de ozono fueron mayores en la región oriental del país con valores que han oscilado entre 250 UD y 275 UD.

Las mayores concentraciones de ozono atmosférico se encuentran en la estratósfera baja y media, por lo que es importante que haya una buena relación de mezcla, así como un incremento de la temperatura en esos niveles. En el mes de abril ocurrió solo una parte, permitiendo más bien que el ozono empiece a disminuir por efecto de flujos de viento anteriormente mencionados, ocasionadas por la formación de núcleos anticiclónicos en latitudes bajas y medias del hemisferio sur los cuales permitieron el ingreso de vientos del suroeste y sureste con una moderada persistencia. Hay que considerar también que estos vientos aportan bajas concentraciones de ozono para nuestras latitudes. En este mes climáticamente, las concentraciones de ozono empiezan a disminuir, por lo que de acuerdo a los motivos expuestos en los párrafos anteriores se registró tal proceso.

FIGURA N°8

Mapa diario del ozono total atmosférico para el mes de abril 2025
Fuente: Satélite AURA



FLUJO DE VIENTOS EN LA BAJA Y MEDIA ESTRATÓSFERA

Una de las herramientas que ayuda a entender la mayor o menor concentración de ozono atmosférico sobre nuestras latitudes, específicamente sobre Perú es la información de viento en altura, especialmente el de la baja y media estratósfera. Por este periodo se considerará información proveniente del sur del país, dado de que la información proveniente del centro ha presentado una disrupción. En ese sentido, se analizará la información de viento proveniente de ese lugar con las características que se detallan a continuación. La estación se ubica en el departamento de Arequipa cuyas coordenadas son latitud: 16.40422°S, longitud: 71.55156°W a una altitud de 2,306 msnm. La información brindada nos da bases para tener una idea de la relación de mezcla que pueda existir en las diferentes capas de la estratósfera.

BAJA ESTRATÓSFERA

El flujo de vientos en el mes de abril al nivel de 100 hPa fue mayormente del segundo y tercer cuadrante, o sea del oeste y suroeste, los cuales siguen siendo influenciados por los flujos de 200 hPa y 150 hPa, con intensidades que oscilaron entre 3 m/s y 11 m/s con una persistencia de 72%. Asimismo, se registraron vientos del noroeste, norte, sur y este con una persistencia de 28% y con una velocidad entre 2 m/s y 8 m/s. Climáticamente los flujos de viento en este nivel son mayormente zonales.

A nivel de 70 hPa los flujos de viento fueron variables, pero con una cierta tendencia de flujos proveniente del suroeste, oeste, sur y este con velocidades que oscilaron entre 3.0 m/s y 10 m/s con una persistencia de 60%. En otras direcciones la persistencia fue de 40% con velocidades entre 2 m/s y 8 m/s.

En el nivel de 50 hPa los flujos de viento fueron en su mayoría del sur, sureste y este, con una persistencia del 69% con velocidades entre 3 m/s y 15 m/s.

MEDIA ESTRATÓSFERA

En el nivel de 30 hPa los flujos predominantes de viento fueron del este con una persistencia de 92%. Cabe mencionar que las velocidades de viento oscilaron entre 6 m/s y 18 m/s. En otras direcciones la persistencia fue de 8 % con velocidades de viento entre 7 m/s y 10 m/s.

Finalmente, en el nivel de 15 hPa los flujos fueron en su totalidad del este, con velocidades que oscilaron entre 16 m/s y 32 m/s con una persistencia de 100%. Cabe mencionar que en esta capa se registraron los mayores flujos de viento comparado a otras de la estratósfera media y baja.

Realizando una síntesis de este análisis, se podrá observar que los vientos provenientes del segundo, tercer y cuarto cuadrante han sido los más frecuentes

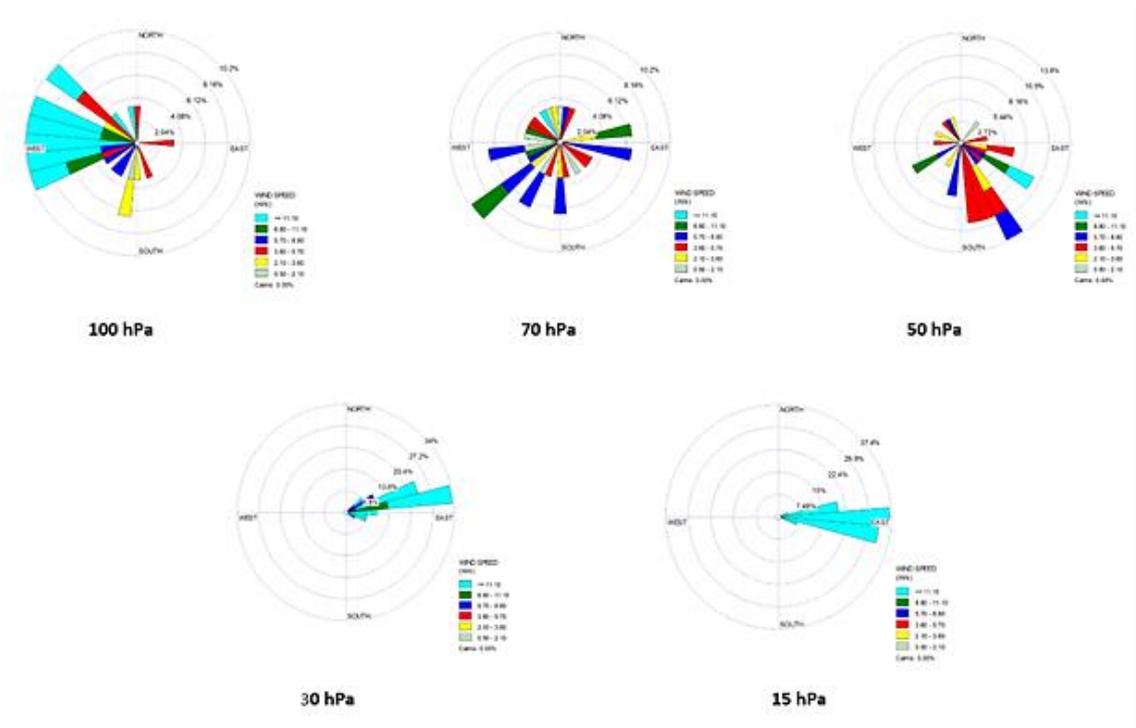
tanto en la baja estratósfera como en la media (algo parecido al mes pasado), pero al mismo tiempo se han registrado vientos del norte y noroeste, pero bastante esporádico. En el hemisferio sur, pero en latitudes bajas, se registraron sistemas anticiclónicos los cuales limitaron el ingreso de masas de aire con contenido de ozono atmosférico hacia nuestras latitudes generando un decremento en las concentraciones del mismo. En esta temporada las concentraciones de ozono climáticamente, tienden a disminuir en forma moderada debido todavía a la moderada actividad fotoquímica en la alta atmósfera, así como a los flujos mencionados anteriormente. Se recalca que los flujos de vientos (intensidad y dirección) son muy importantes en el traslado de altas o bajas concentraciones de ozono sobre nuestras latitudes.

En este mes se registró un moderado contenido de humedad atmosférica, especialmente a nivel de 100 hPa (propio del cambio de estación astronómica), mientras que en las otras capas de la estratósfera también empezaron a disminuir, los cuales en cierta manera permitieron el descenso del ozono atmosférico por encima de esta capa. La figura 9 muestra que los vientos son zonales mayormente, así como vientos del oeste, suroeste, sureste y este mayormente, los cuales sustentan los descensos del ozono principalmente en los niveles o capas de 70 hPa y 50 hPa, sobre nuestras latitudes.

El comportamiento de vientos descrito líneas arriba se puede observar en la Figura 9.

FIGURA N°9

Comportamiento del viento en la baja y media estratósfera para el mes de abril 2025



TEMPERATURA EN LA BAJA ESTRATÓSFERA Y MEDIA ESTRATÓSFERA

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, así como otros fenómenos que ocurren en forma casi periódica (Fenómeno El Niño o La Niña).

En la Figura 10 se muestra la distribución temporal de la temperatura desde el mes de enero 2024 hasta el mes de abril 2025, al nivel de 70 hPa y entre las latitudes 25°S - 25°N, obtenido de la National Weather Service de la National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA.

Durante los días de registro, la temperatura en ese nivel (línea de color rojo), registró un ascenso desde los primeros días hasta fines de mes, pero a pesar de ello estuvieron por debajo de sus valores climáticos. Este incremento estaría relacionado con la menor cantidad de vapor de agua en la atmósfera (12%) en ese nivel, dándonos una idea de una atmósfera relativamente más “cálida”, tal como lo muestra la figura 10, permitiendo, a pesar de ello, una cierta disminución en las concentraciones de ozono atmosférico en dicha franja tropical. Cabe resaltar que el análisis de esa disminución de humedad es para la región sur del país y no para la región central como anteriormente se realizaba. Debido al comportamiento térmico del aire en ese nivel, las concentraciones de ozono, en la región central de nuestro país, lograron registrar un valor inferior a nivel promedio mensual, con una tendencia a continuar seguir registrando concentraciones menores en los siguientes dos meses. Durante el mes de abril, las temperaturas, observadas en todas las capas de la estratósfera baja y media estuvieron todo el tiempo, por debajo de sus valores climáticos, pero con la tendencia al ascenso hasta los meses de mayo-junio. A nivel de estratósfera alta las temperaturas estuvieron por debajo, con una tendencia al descenso, motivando una cierta disminución de las concentraciones de ozono, especialmente en las capas de 70 hPa y 50 hPa debido a flujos de vientos provenientes del suroeste y sureste, así como vientos del oeste.

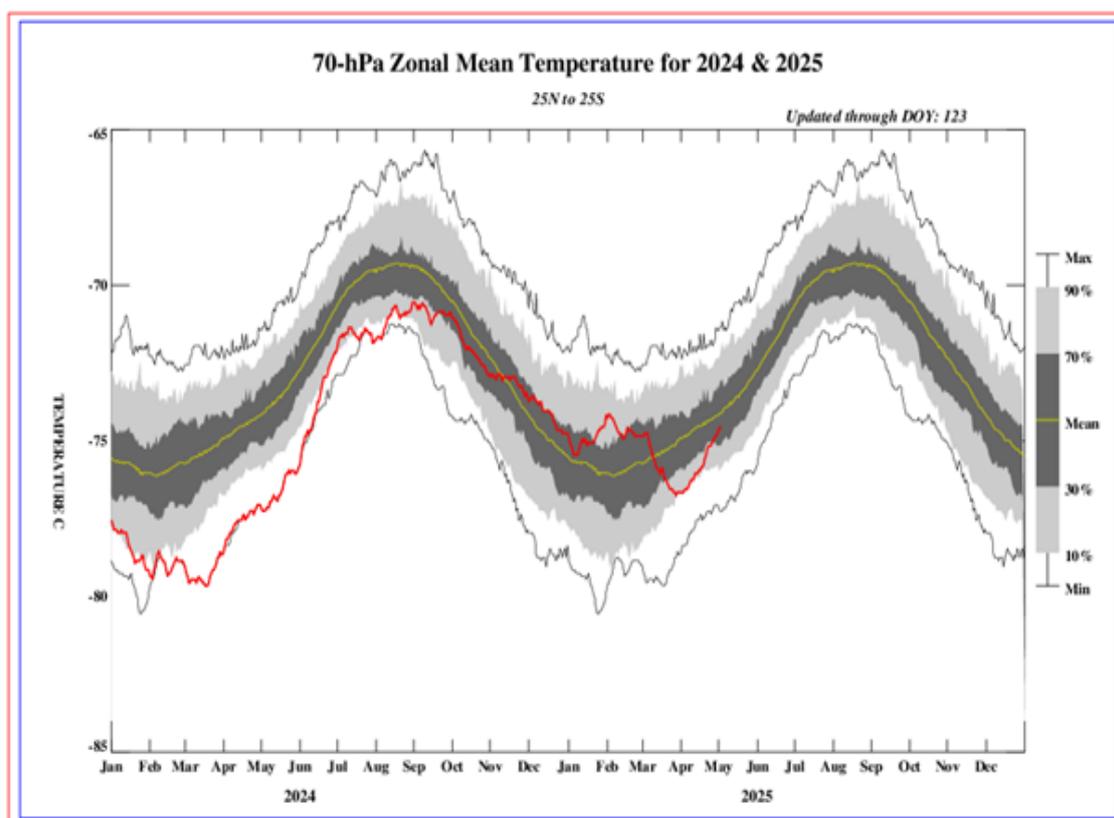
La variabilidad de la concentración de ozono en el nivel de 70 hPa, asociado a los cambios en la temperatura es una consecuencia del movimiento de traslación de la tierra con respecto al sol, así como a procesos de transferencia radiativa y reacciones fotoquímicas. Se suma también, el proceso de la circulación Brewer-Dobson, la Oscilación Quasi Bienal, así como a circulaciones de viento regionales

a nivel de alta atmósfera. Se agrega el impacto que tuviera la concentración de vapor de agua debido a la erupción del volcán submarino Hunga Tonga en enero del 2022, ya que permite enfriar la atmósfera en ese nivel afectando las concentraciones de ozono atmosférico. Se debe destacar el impacto que tiene la emisión de sustancias agotadoras de ozono (elementos sustitutos) hacia la atmósfera por parte del factor antropogénico. 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 causas, valga la redundancia, físicas y químicas. El valor promedio mensual (1979-2017) de la temperatura en este nivel y para este mes es de -74.5°C , menor en valor numérico al mes pasado, pero físicamente "más cálido". La temperatura calculada en este mes, fue de -75.5°C .

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 241.7 UD, inferior al mes anterior.

FIGURA N°10

Comportamiento de la temperatura en la baja estratósfera para el mes de abril 2025
 Fuente: National Weather Service, Climate Prediction Center (Web Site)



Considerando la información de temperatura de la baja y media estratósfera del mes de marzo, proveniente de la estación de altura de Arequipa, podemos decir lo siguiente:

La temperatura a nivel de 100 hPa promedio mensual fue de -80.0°C , mientras que a nivel de 70 hPa fue de -76.1°C , valores relativamente distantes con una diferencia entre ellas, de 3.9°C . Cabe mencionar que entre las dos capas existe aproximadamente una distancia de 2 km permitiendo que haya una estrecha relación entre el límite de la alta tropósfera y la baja estratósfera en cuanto a intercambio de energía, especialmente en esta parte de la región tropical. Ver Figura 11.

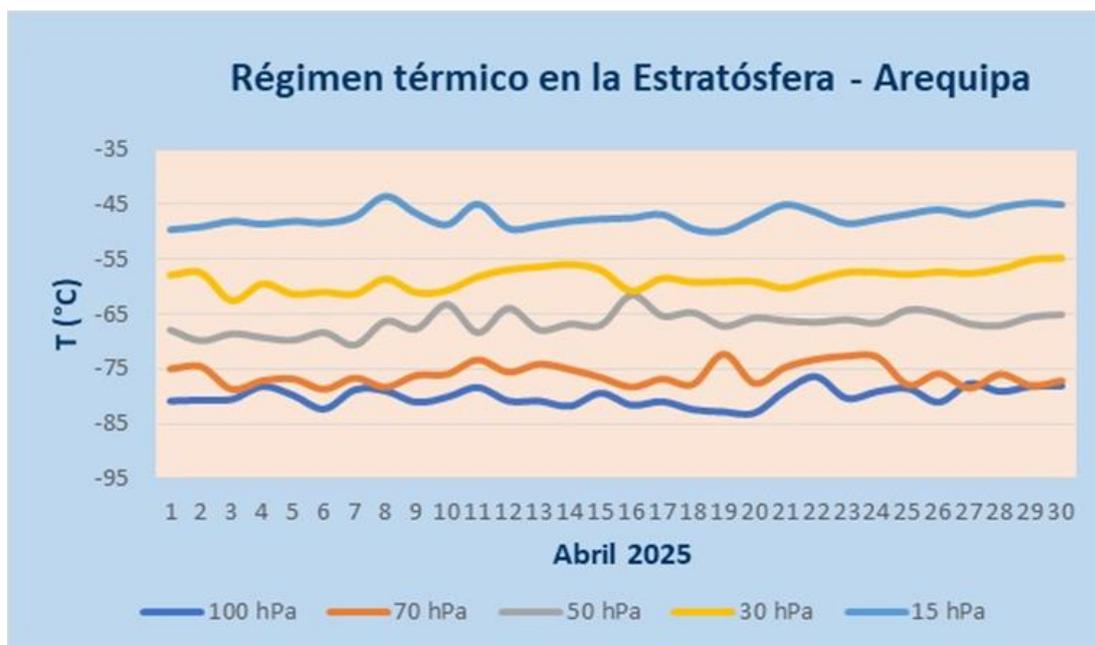
A nivel de 50 hPa, la diferencia es más notoria con una temperatura promedio del mes de -66.6°C (si se compara con la estación de Junín, es parecido al mes anterior).

En la media estratósfera, a 30 hPa, la temperatura promedio registrada fue de -58.5°C , para finalmente, a 15 hPa, la temperatura fuera de -47.3°C . La relación de mezcla de ozono en esta capa ha sido baja.

Cabe destacar que la temperatura promedio mensual a nivel de 70 hPa obtenida por la NOAA (-75.5°C) y la obtenida por un equipo de altura (-76.1°C), valores algo parecidos. Hay que tener en cuenta que la información de NOAA es promedio de la faja 25°N y 25°S , mientras que el registrado en la región sur del país es puntual. En ese sentido, la tendencia del régimen térmico durante el mes, fue por lo general a un ligero calentamiento.

FIGURA N°11

Régimen térmico en la baja y media estratósfera de Arequipa



El comportamiento de temperaturas en el nivel de 70 hPa considerando todo el hemisferio sur en un día típico de abril, es mostrado en la Figura 12 (University of Wyoming) en donde se aprecia que las temperaturas, específicamente, en el continente Antártico han registrado mayormente valores de -55°C , debido a condiciones relativamente “frías” debido al establecimiento de estación astronómica el otoño. Las temperaturas en dicho continente desde continuarán con un descenso en los siguientes meses debido al cambio de flujos de viento que van a dar inicio a la formación del vórtice polar.

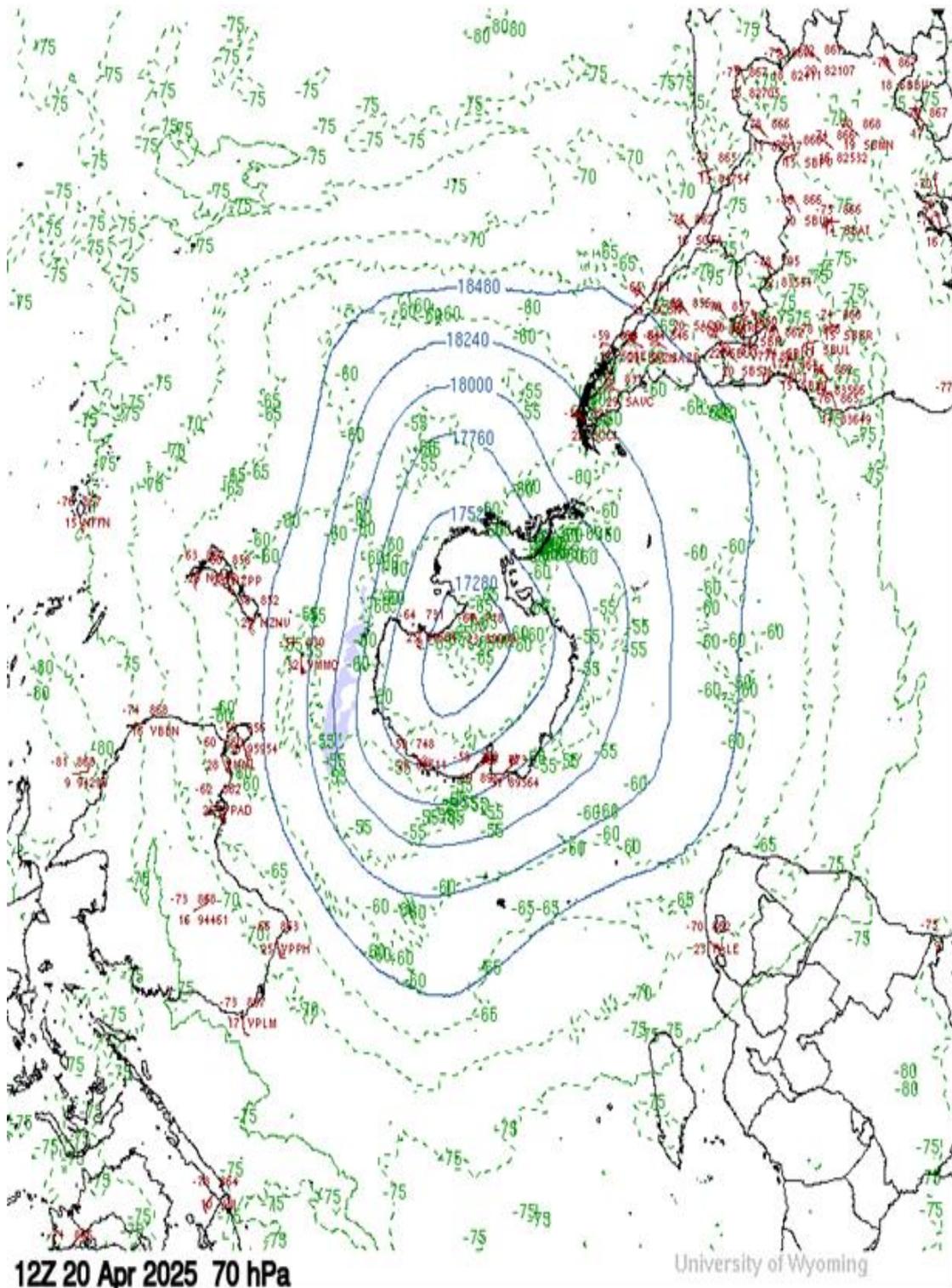
La posición de la tierra con respecto al sol (inclinación con respecto al plano ecuatorial) juega un papel importante en los procesos físico-químicos de la atmósfera. Asimismo, es importante señalar que aparte del factor astronómico, un incremento de la temperatura en ese nivel de la estratósfera (70 hPa) de la región tropical, se encontraría relacionada con un aumento en las concentraciones de ozono y viceversa, pero no es tanto así porque van a depender de otros factores que no están considerados en este boletín como por ejemplo la concentración de otras sustancias químicas en forma de gas.

En latitudes bajas (20°N - 20°S), las temperaturas en este mes, en la atmósfera alta (alta estratósfera), ha registrado un descenso, especialmente al nivel de 5 hPa, 2 hPa y 1 hPa, pero siempre por debajo de sus normales climáticas. Los procesos de transferencia radiativa se han mantenido algo similar al mes anterior, pero la tendencia es a continuar disminuyendo afectando también los niveles de radiación solar ultravioleta.

Para el caso de nuestro país las temperaturas en el nivel de 70 hPa, según el gráfico mostrado, ha registrado un valor de -75.5°C , proceso físico ligeramente cálido comparado al mes pasado, siendo uno de los factores para que las concentraciones de ozono atmosférico, en esta capa, disminuyan, pero por efecto de otros factores atmosféricos han registrado un descenso, como por ejemplo el registro de flujos de viento del suroeste, sureste, oeste y este, aunados a una moderada a baja relación de mezcla de ozono atmosférico a nivel de 70 hPa.

FIGURA N°12

Comportamiento de la temperatura en 70 hPa para el hemisferio sur (20 abril 2025)



12Z 20 Apr 2025 70 hPa

University of Wyoming

Fuente: Universidad de Wyoming

III. CONCLUSIONES

1. El mes de abril se caracteriza porque climáticamente las concentraciones de ozono (Columna total de ozono) sobre nuestro país (los medidos en superficie) empiezan a descender. El valor registrado, en este mes, fue de 241.7 UD como valor promedio. Este valor ha sido inferior a lo obtenido el mes pasado y permite concluir que las concentraciones de ozono durante este mes, fueron relativamente bajas debido mayormente a la presencia de los vientos cuasi meridionales al nivel de 70 hPa y 50 hPa, con excepción de los niveles de 30 hPa y 15 hPa donde se registraron vientos netamente del este los cuales fueron de alta intensidad, aunado a una moderada relación de mezcla de ozono en esos niveles.
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 237.0 UD a 244.9 UD, límites inferior y superior, menores al mes anterior. Este descenso, está ligado al traslado de bajas concentraciones de ozono hacia nuestras latitudes por efecto de los vientos provenientes del tercer y cuarto cuadrante como consecuencia de la formación de núcleos anticiclónicos en latitudes bajas del hemisferio sur, los cuales permitieron menor ingreso de ozono hacia nuestro país.
3. Con respecto a la distribución vertical del ozono según información obtenida por el Metop-C/GOME-2, durante un día típico del mes de abril, se puede concluir que la máxima concentración de la misma, en la región tropical del hemisferio sur, se registró entre los 40 hPa y los 10 hPa (baja y media estratósfera) con valores que oscilaron entre 13 UD y 25 UD (ligeramente menor al mes anterior), mientras que en latitudes medias del hemisferio sur, la altura de las máximas concentraciones se dieron entre los 100 hPa y 15 hPa con valores entre 12 UD y 22 UD. La variabilidad en las concentraciones de ozono de este mes con respecto al de marzo, ha sido influenciada, en un primer momento, por vientos del noroeste y sureste (mayormente) y en un segundo momento por la disminución de la actividad fotoquímica.
4. El registro de concentraciones de ozono atmosférico en latitudes medias y altas del hemisferio norte, oscilaron entre 35 UD y 40 UD, entre la baja y media estratósfera 200 hPa y 8 hPa a lo largo de 40°N - 90°N). Durante el mes de abril se registraron procesos físicos de alta relación de mezcla de ozono de latitudes medias a altas, influenciados por los vientos del este y sur, el cual permitió mantener concentraciones de ozono atmosférico más altas, comparadas al mes anterior. A estos procesos se les suma la

Oscilación Quasi Bienal (QBO) así como el impacto que ejerce la circulación Brewer-Dobson en esta parte del hemisferio.

5. 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 observó una disminución con valores entre 3.90 ppmv y 4.10 ppmv, lo cual demuestra que, a pesar de encontrarnos en el límite superior de la estratósfera baja, se registran concentraciones bajas, de vapor de agua, lo cual tiene incidencia en las concentraciones de ozono atmosférico. Cabe resaltar que concentraciones mayores, especialmente en la baja estratósfera, afectan grandemente el comportamiento espacial y temporal de este gas, sobre nuestras latitudes.
6. De acuerdo a la información real de viento obtenida para las diferentes capas de la estratósfera baja y media se concluye que uno de los factores que ha permitido un ligero descenso de las concentraciones de ozono sobre nuestras latitudes, específicamente sobre nuestro país, han sido los vientos mayormente del suroeste y sureste, los cuales fueron de intensidad moderada a alta, principalmente en la estratósfera baja (50 hPa).
7. Los mapas de ozono total atmosférico (provenientes de la plataforma OMI del satélite AURA de la National Aeronautics and Space Administration - NASA), mostraron un comportamiento de ozono sobre nuestro país, ligeramente menores al mes pasado, especialmente en la región central y sur (costa y sierra), con valores que oscilaron entre 225 UD y 250 UD, como producto de la presencia de vientos provenientes del suroeste y sureste.
8. En lo que concierne al comportamiento del régimen térmico en la baja estratósfera (70 hPa) considerando la faja 20°N - 20°S, se puede mencionar que el mes de abril, se caracterizó por registrar valores ligeramente mayores al mes pasado (físicamente "cálida"), pero a pesar de ello, las concentraciones de ozono disminuyeron, debido a otros factores no considerados en el presente boletín, como por ejemplo otros gases con componentes químicos, circulación atmosférica, actividad fotoquímica. La mayor concentración de ozono se encuentra en la estratósfera baja y media.
9. Debido al comportamiento de la temperatura en las diferentes capas de la estratósfera, realizadas con equipos de altura sobre la sierra sur del Perú (departamento de Arequipa), se concluye que en la estratósfera baja las condiciones térmicas fueron parecidas al mes anterior (frías), mientras

que en la estratósfera media se registró un mayor enfriamiento entre 2.0°C a 3.0°C.

10. Las condiciones térmicas se mantuvieron similares con respecto al mes anterior en la estratósfera baja, puede deberse a los vientos mayormente del suroeste, sureste, así como a una moderada actividad fotoquímica.
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. Julio Ernesto Urbiola del Carpio
jurbiola@senamhi.gob.pe

Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico:
Ing. Elvis Anthony Medina Dionicio
eamedina@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/cqZit9WHG7gLktbT6gle/cqZit9WHG7gLktbT6>

Próxima actualización: 15 de junio de 2025

**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**

