

ENERO 2025
Vol.01

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"Sy 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

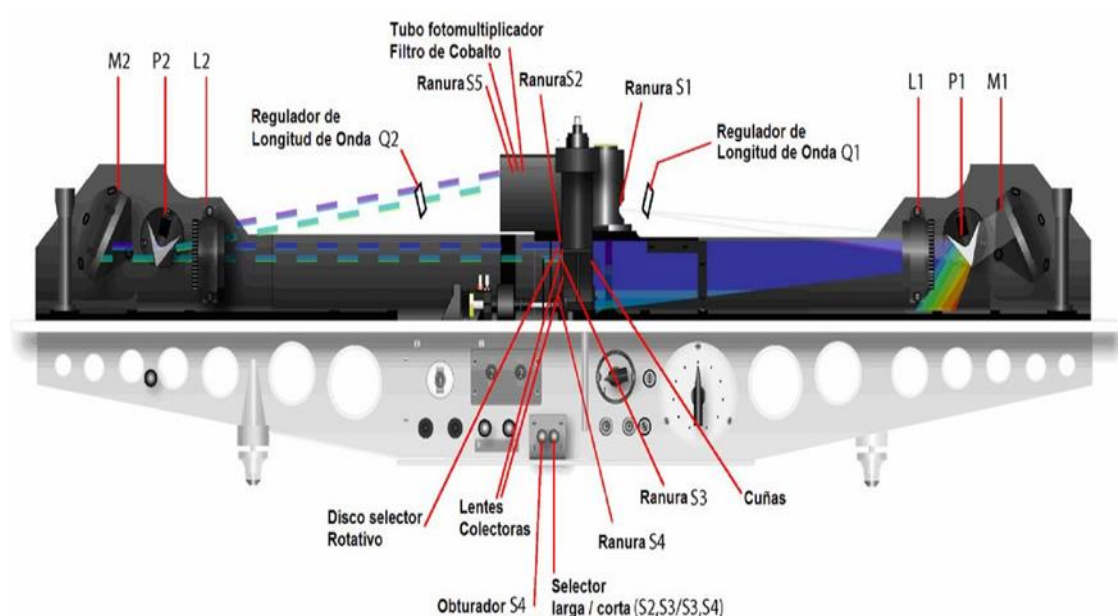
1. MEDICIÓN EN SUPERFICIE

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 enero la estratósfera baja de la región tropical ha registrado características térmicas con un ligero calentamiento, mientras que en la estratósfera media las condiciones han sido cercanos a sus valores normales con una ligera tendencia al ascenso para finalmente en la estratósfera alta registrar un enfriamiento y luego un calentamiento, pero muy por debajo de sus valores normales. Las concentraciones de ozono registraron un ligero incremento en este mes, los cuales han estado asociados al incremento de la temperatura en niveles bajos de la estratósfera principalmente. La relación de mezcla de ozono, registró un leve incremento el cual también ayudó a que las concentraciones de ozono atmosférico se eleven sobre nuestras latitudes, como producto de la aparición de flujos ciclónicos (especialmente a nivel de 70 hPa) en el Pacífico del hemisferio norte.

En lo que respecta especialmente al flujo de vientos, se registraron mayormente los flujos provenientes del este (similares al mes pasado), pero con mayor frecuencia, tanto en la estratósfera baja (100 hPa, 70 hPa y 50 hPa) como en la media (30 hPa y 15 hPa) mientras que, en la parte alta (5 hPa, 2 hPa y 1 hPa), los vientos mayormente fueron del oeste. Los primeros, en el caso de 70 hPa y 50 hPa, aportaron moderadas cantidades de ozono debido a flujos del oeste y norte, más bien, los segundos no aportaron concentraciones de ozono o si lo hicieron fueron realmente escasos mientras que los vientos de la parte alta, aportaron menos concentraciones comparados a los flujos de la estratósfera media como consecuencia de flujos del este.

En el caso de la alta tropósfera, los sistemas atmosféricos que gobernaron el tiempo sobre nuestro país, terminaron siendo desplazados hacia el hemisferio sur debido al establecimiento de la estación astronómica de verano. La convección húmeda mínima ha continuado registrada, como hace varios meses, en la región norte del país (específicamente departamento de Tumbes y parte de Piura) debido a la invasión de masas de agua cálidas los cuales han sido frecuentes, a partir de la segunda década del mes provenientes del hemisferio norte, presentando incidencias no solo en la circulación de los vientos de la atmósfera baja sino también en la atmósfera alta (entre la alta tropósfera y baja estratósfera). Se debe tener presente que estos procesos, así como la presencia de moderada humedad en la baja estratósfera (100 hPa principalmente) llegan a tener repercusión en las propiedades físicas y químicas de dicha capa, permitiendo obtener valores de ozono atmosférico menores al mes pasado (durante los primeros quince días del mes), especialmente en la región central y sur del país.

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).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, es importante tener en cuenta que esos regímenes de circulación, así como los procesos que involucran el establecimiento de la estación de verano austral, interactúan entre sí en las diferentes capas de la atmósfera, permitiendo el transporte de calor o energía. En ese sentido, se analiza la capa de 70 hPa (día 18 de enero) 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 al descenso debido a la aparición de vientos zonales negativos, los cuales aportan pocas concentraciones de ozono atmosférico sobre nuestras latitudes. Durante los primeros quince (15) días del mes, los vientos fueron mayormente del este para luego a partir de la segunda quincena registrar vientos variables como por ejemplo del norte, oeste y este. Se registraron también vientos bastante esporádicos del sureste y suroeste los cuales aportaron escasa cantidad de ozono atmosférico. Los flujos de viento que dan pie a la formación de núcleos anticiclónicos, en esta parte del hemisferio sur, solo se registraron en el Pacífico sur y en parte del continente sudamericano, así como en el Atlántico

En latitudes medias y altas del hemisferio sur, la circulación de vientos ha continuado siendo zonal positivo aportando concentraciones entre moderadas a altas de ozono atmosférico sobre estas regiones debido a la no presencia del vórtice polar.

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 por debajo de sus valores normales, así como, por encima (100 hPa y 70 hPa, 50 hPa respectivamente). En el caso del nivel de 100 hPa, los valores de temperatura por debajo de sus normales, se debió al incremento, con respecto al mes pasado, de la humedad en la atmósfera, mientras que en los dos niveles superiores fueron muy bajos. En los niveles de 30 hPa y 10 hPa se registraron condiciones cercanas a sus valores normales, así como por debajo respectivamente, aun así ambos tuvieron una tendencia al ascenso. Para el caso de los niveles de 5 hPa, 2 hPa y 1 hPa, el comportamiento estuvo muy por debajo de sus valores climáticos. Sin embargo, a partir de la segunda quincena del mes mostraron un incremento (en la primera quincena disminuyeron). A pesar de todo este comportamiento de la estratósfera, las concentraciones de ozono lograron

registrar un incremento en la región tropical, cuando climáticamente tenían que haber disminuido. El comportamiento térmico en la baja estratósfera estaría relacionado por la presencia de vientos del oeste y norte en esta región, especialmente a nivel de 70 hPa y 50 hPa, con moderada relación de mezcla de ozono, especialmente a partir de la segunda quincena del mes. Mientras que en la alta estratósfera todos los flujos de viento fueron del este con temperaturas 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 superiores al mes pasado (a nivel promedio mensual), con una tendencia a continuar con ese proceso. Cabe enfatizar que los valores máximos de ozono sobre nuestro país, en este mes, fueron superiores (a partir de la segunda quincena) a los valores registrados en el mes de diciembre. La amplitud entre dichos valores en enero, ha sido mayor al mes pasado. Figura 2.

Con el fin de sustentar lo descrito a nivel de baja estratósfera, podemos mencionar que, de la vigilancia realizada en el mes de enero 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 236.8 UD y 248.8 UD (UD = Unidades Dobson). A nivel promedio mensual fue superior.

En las primeras horas del día las concentraciones de ozono son relativamente altas debido al ozono acumulado en horas de la noche (en enero, 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, se incrementa, 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 entre muy 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,

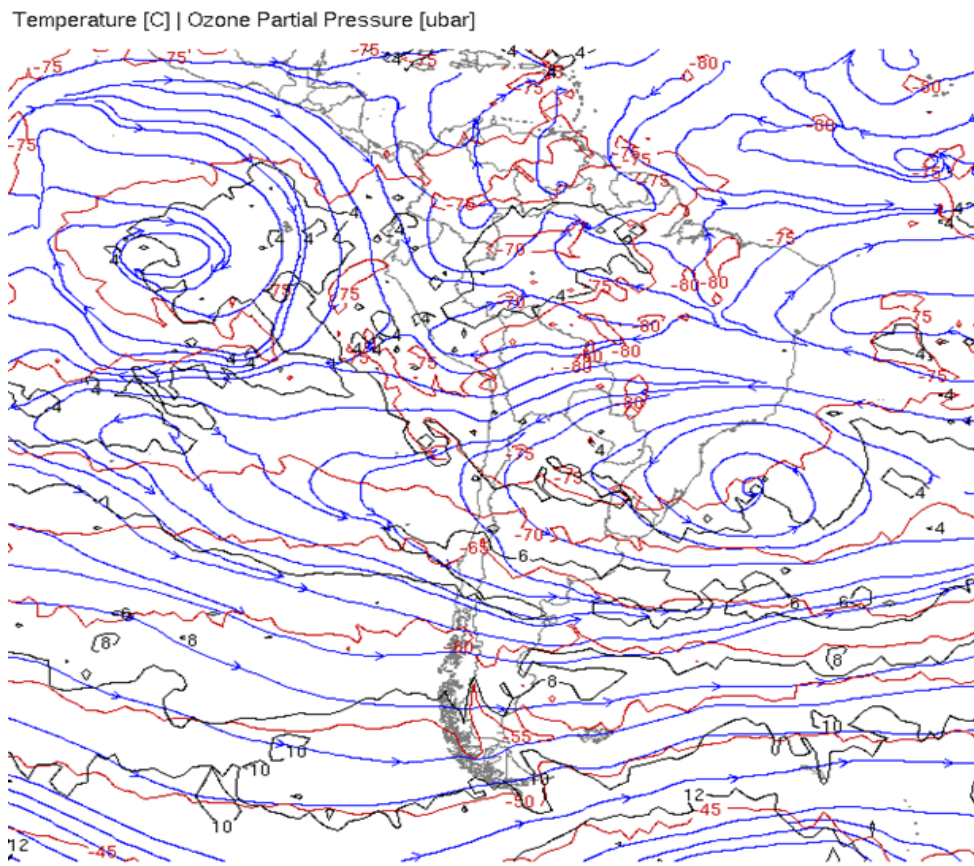
la intensidad de la radiación ultravioleta ha mostrado un incremento debido al establecimiento de la estación de verano. En algunas regiones, especialmente en el sur han sido ligeramente mayores al mes pasado, mientras que en la región central y norte los niveles fueron variables (en algunos lugares fueron similares y en otros menores). La cantidad de aerosoles tiende a incrementarse (más en la sierra y selva) debido a la temporada de lluvias lo cual permite registrar mayor humedad sobre nuestras regiones permitiendo una menor transparencia atmosférica, principalmente en la región andina. Se espera que en el mes siguiente dichos valores de radiación, se incrementen debido a un mayor establecimiento de la estación astronómica.

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 cuasi meridionales en el hemisferio norte

Fuente: Weather Service de la University of Wyoming



University of Wyoming

0 Hour 70 hPa Forecast Valid 18Z Sat 18 Jan 2025

El comportamiento de la concentración de ozono atmosférico promedio diario mensual multianual (2000-2023) del mes de enero oscila entre 239.9 UD y 245.9 UD aproximadamente (Figura 3), mientras que los medidos en el mes de enero del presente año, oscilaron entre 239.0 UD y 250.7 UD.

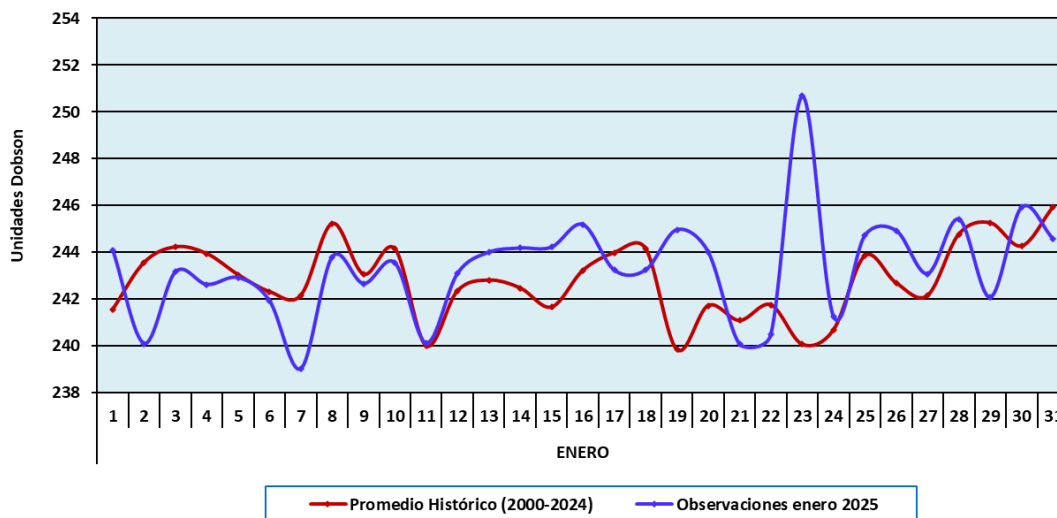
En la figura se aprecia que los valores registrados en el presente mes, estuvieron un 48% por debajo de sus valores climáticos, mientras que un 52% por encima (hubo un desfase de hasta 10 UD entre el valor histórico y el registrado durante el mes de enero del presente año).

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 primera quincena) y en otros más bien alejándose (generalmente a partir de la segunda quincena), lo cual se atribuye a los cambios en la circulación atmosférica (vientos variables provenientes del este, norte y oeste, en otros momentos del noroeste), así como también por 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. La tendencia de las concentraciones de ozono sobre nuestro país, con respecto al mes de diciembre ha registrado valores superiores (con una tendencia a continuar incrementándose, especialmente los valores tanto mínimos como máximos).

En la estratósfera, la temperatura y las concentraciones de ozono generalmente van de la mano, de acuerdo a ello, se puede mencionar que, en el mes de enero, en capas de la estratósfera baja principalmente las temperaturas, salvo el de 100 hPa, han registrado valores por encima de sus valores normales, mientras que en parte de la estratósfera media y toda la estratósfera alta, el régimen térmico estuvo muy por debajo de sus valores climáticos, pero con la tendencia al incremento. Hay que remarcar que, en estas capas durante la primera quincena del mes, se registró un descenso brusco de la temperatura para luego a partir de la segunda quincena aproximadamente incrementarse, pero aun así estuvieron muy por debajo de sus valores climáticos.

FIGURA 03

Comportamiento temporal de la concentración de ozono atmosférico en el OVA Marcapomacocha. Enero 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 243.3 UD superior en 1.4 UD al promedio mensual multianual (241.9 UD).

Se debe tener presente que, en la región tropical durante los meses de la primavera austral, vale decir desde el 21 de setiembre hasta el 21 de diciembre, las concentraciones de ozono tienden al descenso (climático), 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 menor relación de mezcla) y una alta 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 (mucho más en los meses de mayo-junio). Esta circulación está conducida por ondas atmosféricas la cual puede ser acelerada por el cambio climático repercutiendo en la distribución global de las concentraciones de ozono. En el mes de enero, se ha empezado a registrar masas de aire provenientes principalmente del primer y cuarto cuadrante al nivel de 70 hPa (parecido al mes anterior), ósea vientos del este, sureste y noreste. Claro está que también se registraron vientos de otras direcciones, como por ejemplo del oeste y

norte (bastante inusual en esta época) pero con menor frecuencia, trasladando moderadas concentraciones de ozono atmosférico, lo que hizo que se registre un ligero incremento, sobre nuestras latitudes.

Los procesos de advección húmeda han continuado siendo bajos en este mes, con excepción de lo ocurrido la zona norte del país (departamento de Tumbes y parte de Piura), donde se ha registrado invasiones de masas de agua cálidas provenientes del Pacífico norte, especialmente a partir de la segunda década, manteniendo condiciones de alta humedad en toda esa región. Probablemente se haya registrado algún proceso de advección húmeda tropósfera-estratósfera (aunque regionalmente se han registrado condiciones normales a frías), el cual haya sido un factor adicional para que las concentraciones de ozono disminuyan durante la primera quincena del mes. A esto se le añade el flujo de vientos provenientes del oeste, norte y este, los cuales, en cierta manera, han realizado la contraparte aportando moderadas concentraciones de ozono hacia nuestras latitudes. Un factor que interactúa con estos procesos es la humedad atmosférica, el cual se ha incrementado (con respecto al mes pasado) a nivel de 100 hPa, pero manteniendo valores bajos en las demás capas de la estratósfera baja y media.

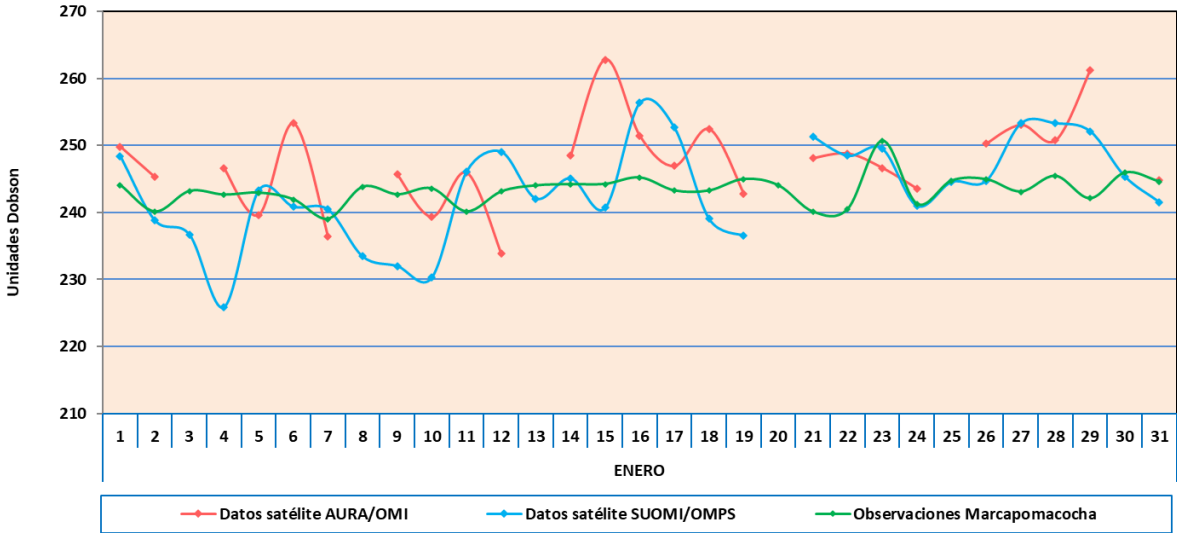
Al igual que la información de superficie, lo que proviene de los satélites es muy importante ante la falta de cobertura por parte de los primeros. En ese sentido, al realizar la comparación de los datos de ozono atmosférico provenientes de los satélites AURA (Plataforma OMI) y SUOMI (Plataforma OMPS) con lo registrado en superficie, continúa observándose un desfase entre ellos. Con respecto a la información proveniente del AURA/OMI, durante el 76% de días del mes de enero, los valores de ozono diario medidos estuvieron por encima de lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson. Para el caso de SUOMI/OMPS, ocurre lo mismo, durante el 57% de días del mes estuvieron por encima de lo registrado en superficie. Figura 4.

De este análisis podemos decir que la información proveniente de estos dos satélites es mayor a lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson, cuando anteriormente eran inferiores, 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 19 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 un incremento durante el mes, debido a la circulación de los vientos en la atmósfera, así como a procesos fotoquímicos, mientras que los medidos con los satélites, también mostraron esa tendencia, pero bastante ligera. El pronóstico, de acuerdo a la climatología, es que las concentraciones de ozono continúen incrementándose desde febrero a marzo debido a los mayores procesos de reacciones fotoquímicas como producto del mayor establecimiento de la estación de verano.

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). Se debe mencionar que 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.

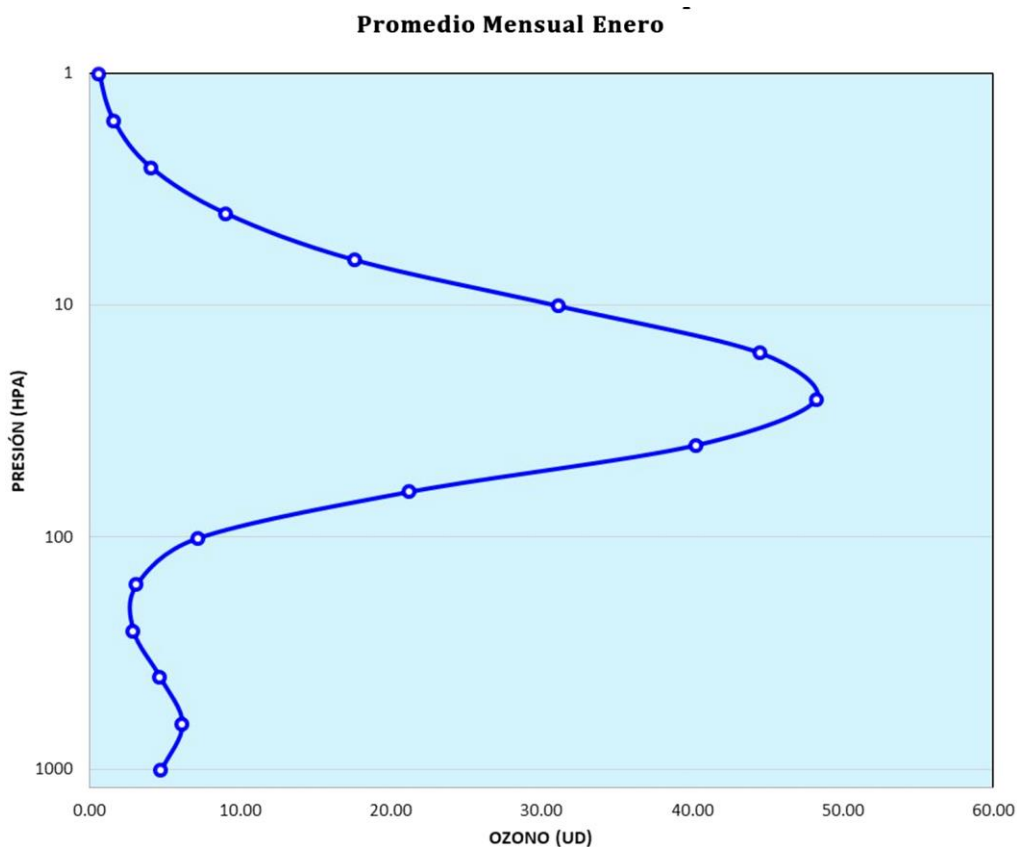
Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial), desde el año 2000 hasta el 2020 se han observado por medio de mediciones del perfil vertical de la atmósfera y el desarrollo de modelos numéricos, una disminución en las concentraciones de ozono (~2% por década) en la estratósfera baja de la región tropical (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 enero 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 superiores a lo observado en el mes pasado, de acuerdo al perfil mostrado. Las concentraciones mayores la encontramos en la media estratósfera con valores entre 25 UD a 50 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 enero (día 20) 2025 obtenida por Metop-C/GOME-2, muestra para el hemisferio norte concentraciones ligeramente mayores al mes pasado (debidas al establecimiento de la estación astronómica de invierno), cuyos valores han oscilado entre 15 UD y 30 UD, entre la baja y media estratósfera (el área de cobertura

latitudinal de estas concentraciones bajas se dio entre 35N°-70°N). A partir del 21 de diciembre, dicho hemisferio, se encuentra en la estación de invierno, registrándose concentraciones entre moderadas y altas de ozono en latitudes altas con tendencia a incrementarse, debido a moderada humedad atmosférica, así como a la influencia de los vientos mayormente meridionales sobre dichas latitudes. El régimen de temperatura en la estratósfera baja y media se ha mantenido estable.

Hay que 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.

La altura de las concentraciones de ozono (10 UD a 20 UD) en latitudes bajas del hemisferio norte fue de 60 hPa y 8 hPa, mientras que en latitudes bajas del hemisferio sur (12 UD a 24 UD) la altura fue de 80 hPa y 10 hPa. En latitudes medias del hemisferio sur más bien se registraron concentraciones un poco mayores con valores entre 13 UD y 28 UD, pero a una altura entre 105 hPa y 20 hPa. La altura tanto en latitudes bajas y medias del hemisferio sur han sido superiores al mes pasado.

En esta temporada, las concentraciones de ozono, por lo menos en esta parte de la región tropical, han registrado un ligero incremento, por factores de circulación de vientos mayormente meridionales y zonales positivos a nivel de 70 hPa), así como por efecto de un ligero incremento en las concentraciones de vapor de agua, así como por los que fueron emitidas por el volcán submarino Hunga Tonga en enero de 2022 así como la adición de ligera humedad por efecto del inicio del periodo lluvioso en el hemisferio austral.

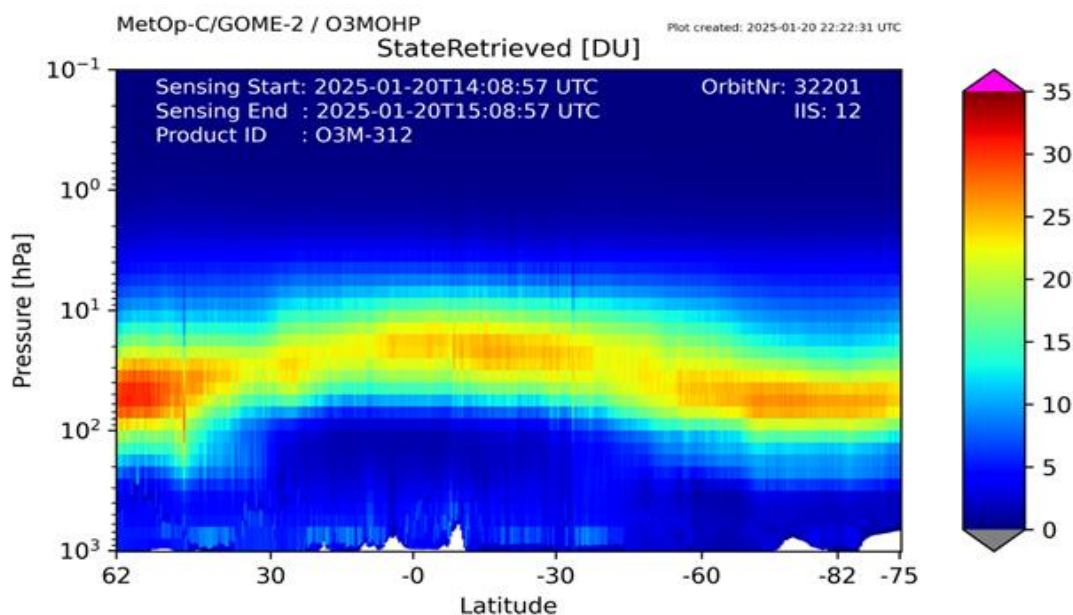
Para el caso de nuestro país, concentraciones de ozono relativamente moderadas se han registrado entre los 80 hPa y 8 hPa con valores entre 12 UD y 23 UD, especialmente en la región central y sur del país, mientras que, en la sierra norte, las concentraciones oscilaron entre 13 UD y 22 UD a una altura de 70 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 al efecto que tienen los gases de efecto invernadero, especialmente en la estratósfera baja aunados últimamente con el incremento 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 este, sureste y noreste, pero también se han registrado vientos del norte y oeste los cuales han aportado concentraciones moderadas de ozono sobre nuestras latitudes, permitiendo que se incrementen ligeramente. Cabe mencionar que el hemisferio norte va ingresando a un periodo más frío, dado el establecimiento de la estación de invierno, motivo por el cual tanto los procesos físicos como químicos llegan a tener una menor actividad fotoquímica permitiendo una cierta estabilización 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.

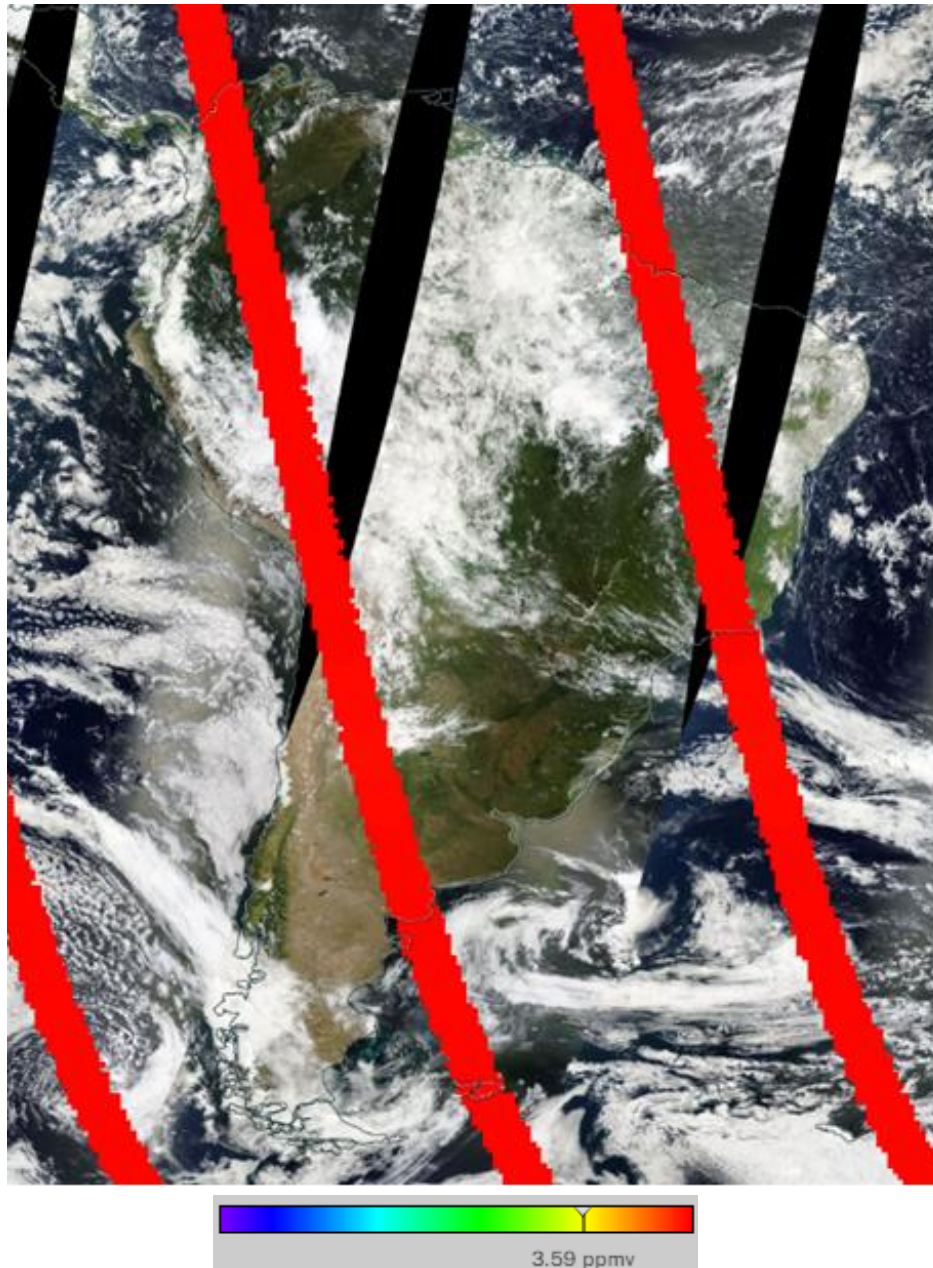
Hay que recalcar que a nivel global continua la disipación del periodo cálido (aunque todavía quedan remanentes) vivido desde el año 2023 hasta la fecha los cuales permiten tener almacenado calor en la atmósfera y por ende concentraciones moderadas de humedad relativa, los cuales tienen repercusión en las concentraciones de ozono. Para el caso de nuestro país las condiciones atmosféricas van ingresando a una etapa más cálida debido a factores meteorológicos, astronómicos, así como los oceanográficos 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 (22 enero 2025), obtenida de la Earth Data de la National Aeronautics Space Administration - NASA. En ella se observa sobre Perú, concentraciones de vapor de agua bastante altas (superior al mes anterior, en todo nuestro país, con una tendencia a mantener estos valores en los próximos dos meses). Los valores registrados por el satélite AURA a través de la plataforma MLS oscilan entre 4.00 ppmv a 6.50 ppmv, obviamente altos para una capa en donde el vapor de agua es escaso. 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 permitiendo en cierta manera una disminución de las concentraciones de ozono atmosférico en esta región. Esta disminución también está asociado a otros factores como 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 central del Perú (departamento de Junín), en el mes de enero fue de 29%, mientras que a nivel de 70 hPa fue de 11%, 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 incremento con respecto al mes pasado (especialmente a nivel de 100 hPa). A partir del 21 de diciembre de 2024 se inició la estación astronómica de verano, generando un incremento paulatino de la temporada de lluvias en el 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 enero, 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, continúan mostrando valores algo menores a lo registrado en el mes de diciembre, debido al mayor flujo de viento del este, sureste, noreste y norte mayormente durante gran parte del mes. Tal como se explicó en párrafos anteriores, se registró un incremento en la concentración de humedad en la baja estratósfera (100 hPa) como producto de flujos de viento mayormente del primer y cuarto cuadrante, lo cual permitió esa disminución, desde el 01 al 15 de enero. Paulatinamente se viene estableciendo el periodo de lluvias sobre nuestro país el cual interactúa con la baja estratósfera modificando en cierta manera las concentraciones de ozono en ese nivel. Por el lado del Pacífico se registraron concentraciones de ozono moderados.

Durante la primera quincena 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 mayor actividad fotoquímica. Las concentraciones de ozono en la región sur continuaron oscilando entre 225 UD y 250 UD, pero con mayor tendencia por debajo de los 250 UD. A partir de la segunda quincena las concentraciones de ozono se incrementaron debido a la ocurrencia de vientos del norte.

Durante gran parte del mes de enero las concentraciones de ozono sobre la región sur del país estuvieron oscilando entre 225 UD y 250 UD, mientras que, a partir de la segunda quincena del mes dichas concentraciones se incrementaron entre 250 UD y 275 UD, debido al efecto de vientos provenientes del norte los cuales aportaron concentraciones moderadas de ozono. Estos flujos en cierta manera son anómalos para la temporada ocasionadas probablemente por la formación de núcleos ciclónicos en latitudes bajas del hemisferio norte los cuales permitieron el ingreso de vientos del norte. Hay que considerar que los vientos del oeste en este hemisferio aportan concentraciones de ozono para esas latitudes, pero por la formación de sistemas ciclónicos en dichas latitudes, permiten que los vientos se desvíen hacia nuestras latitudes. Hay que recalcar que la relación de mezcla, sobre

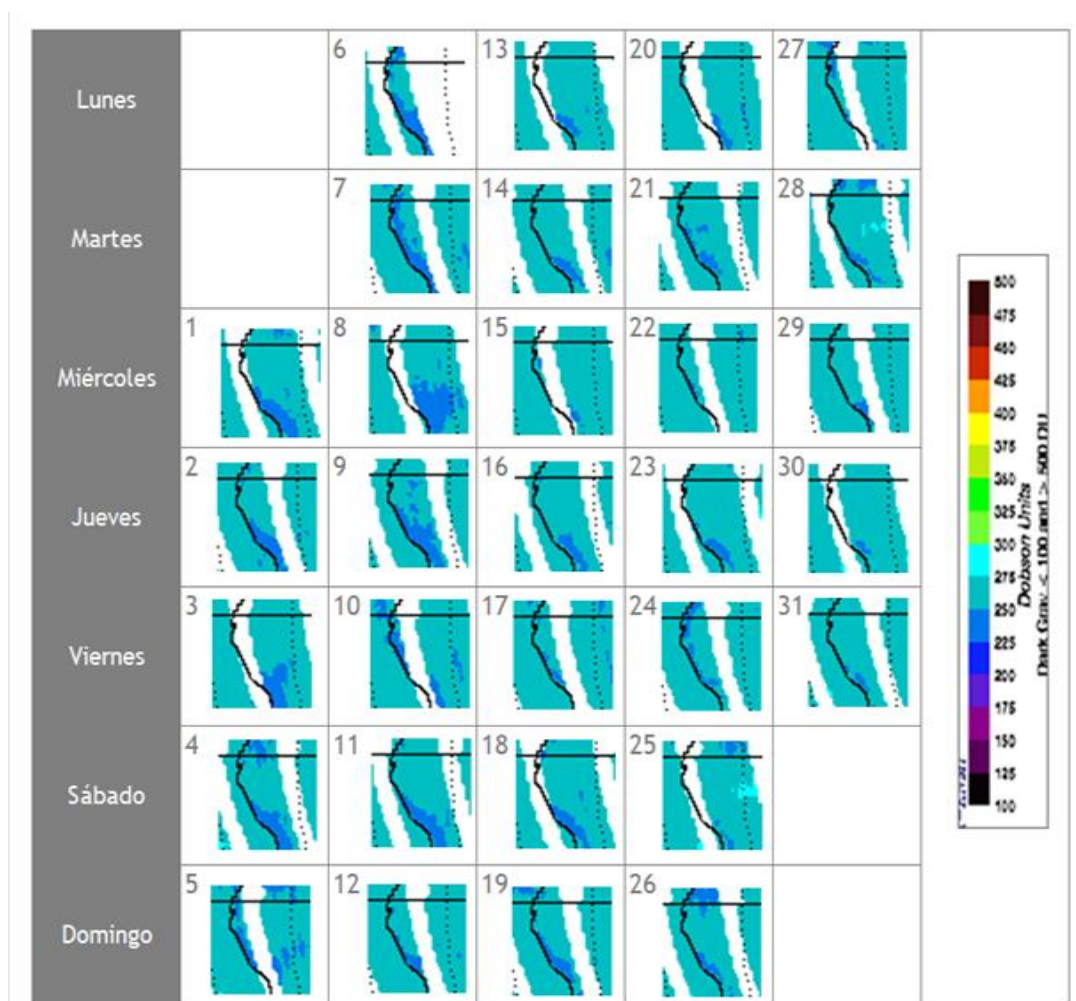
nuestras latitudes es baja en esta temporada, pero por efectos de anomalías en la circulación de los vientos permiten hasta cierto punto que se incrementen.

Se debe mencionar que, en este mes, se registraron ingresos de masas de aire, mayormente, del este a nivel de 70 hPa, tal como ya se explicó anteriormente, lo que acentuó la disminución paulatina de las concentraciones de ozono sobre nuestro país, pero después los vientos fueron del noreste y norte. Enero es el mes donde climatológicamente continúan los descensos de ozono los cuales aunados a otros factores como los meteorológicos y ambientales, se traducen en incrementos de los niveles de radiación ultravioleta

FIGURA N°8

Mapa diario del ozono total atmosférico para el mes de enero 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.

A la fecha se cuenta con información de viento para el mes de enero en la región central del país. La estación se ubica en el departamento de Junín cuyas coordenadas son latitud: 11.9562°S, longitud: 75.3217°W a una altitud de 3,311.72 m. 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 enero al nivel de 100 hPa estuvo fuertemente influenciado por los provenientes del primer y cuarto cuadrante, ósea del noreste, este, sureste, los cuales han sido influenciados por los flujos de 200 hPa y 150 hPa, con intensidades que oscilaron entre 5 m/s y 17 m/s con una persistencia de 82%. Asimismo, se registraron vientos del norte, noroeste, y suroeste con una persistencia de 18% y con una velocidad entre 2 m/s y 7 m/s. Climáticamente los flujos de viento en este nivel son mayormente del este y sureste y noreste.

A nivel de 70 hPa los flujos de viento fueron casi en su totalidad del este con velocidades que oscilaron entre 4.0 m/s y 18 m/s con una persistencia de 71%. En otras direcciones la persistencia fue de 29% con velocidades entre 3 m/s y 9 m/s.

En el nivel de 50 hPa los flujos de viento fueron en su mayoría del noreste y sureste, con una persistencia del 52% con velocidades entre 4 m/s y 17 m/s.

MEDIA ESTRATÓSFERA

En el nivel de 30 hPa los flujos predominantes de viento fueron del este con una persistencia de 72%. Las velocidades de viento oscilaron entre 5 m/s y 17 m/s. Por otro lado, en otras direcciones la persistencia fue de 28 % con velocidades de viento entre 3 m/s y 9 m/s.

Finalmente, en el nivel de 15 hPa los flujos fueron en su totalidad del este, con velocidades que oscilaron entre 10 m/s y 27 m/s con una persistencia de 100%. 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 primer y cuarto cuadrante han sido los más frecuentes tanto en la baja estratósfera como en la media, pero al mismo tiempo se han registrado vientos del norte lo cual ha permitido incrementar las concentraciones de ozono en el mes de enero. Tal como se mencionó en párrafos anteriores, los flujos ciclónicos de latitudes bajas del hemisferio norte han permitido el ingreso de masas de aire con contenido de ozono sobre nuestras latitudes. La mezcla de ozono fue baja en la estratósfera media y relativamente alta en la estratósfera baja. En esta temporada las concentraciones de ozono climáticamente, disminuyen hasta el mes de enero debido a los flujos netos del este, así como a la alta actividad

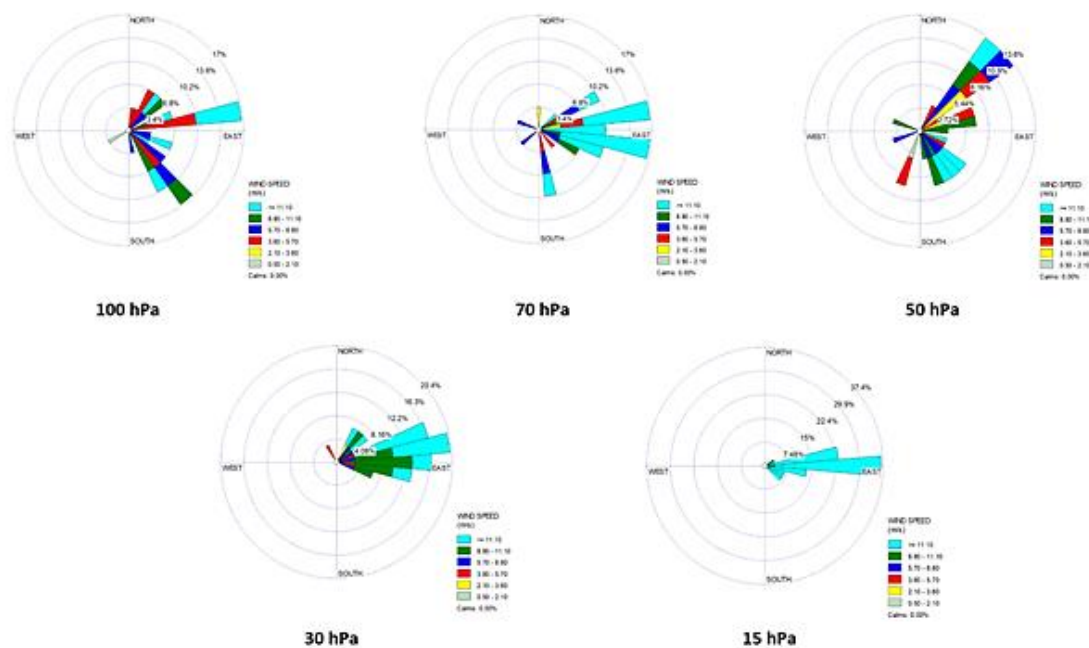
fotoquímica en la atmósfera alta y a la baja relación de mezcla de ozono. Se recalca que el flujo de vientos (intensidad y dirección) es muy importante en el traslado de altas o bajas concentraciones de ozono sobre nuestras latitudes.

En este mes se registró un incremento de la humedad atmosférica, especialmente a nivel de 100 hPa, mientras que en las otras capas de la estratósfera se mantuvieron por lo general, similares, los cuales en cierta manera permitieron el descenso del ozono atmosférico, por lo menos durante la primera quincena del mes. La figura 9 donde los vientos son zonales negativos mayormente, así como vientos del norte, sustentan los moderados ingresos de ozono sobre nuestras latitudes permitiendo un ligero incremento.

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 enero 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 enero 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 descenso durante la primera década del mes, para después registrar un ostensible ascenso, alejándose de sus valores climáticos (por encima) tornándose en una atmósfera más cálida, tal como lo muestra la figura 10, permitiendo un cierto incremento en las concentraciones de ozono atmosférico en dicha franja tropical (pero a partir de la segunda década del mes). Debido a este comportamiento térmico del aire en ese nivel, las concentraciones de ozono, en nuestro país, lograron registrar valores superiores a nivel diario (especialmente los valores extremos superiores), con una tendencia a registrar concentraciones elevadas a partir del mes de febrero hasta marzo. Se debe remarcar que, durante el mes de enero, las temperaturas, observadas en la capa de 100 hPa estuvo por debajo de sus valores climáticos, mientras que en 70 hPa y 50 hPa estuvieron por encima (probablemente por flujos de aire provenientes del norte). A nivel de estratósfera media y alta las temperaturas estuvieron por debajo, motivando una cierta reducción de las concentraciones de ozono en dichas capas, a pesar de haber registrado un incremento a partir de la segunda década del mes, pero aun así por debajo de sus valores climáticos. La tendencia a lo largo del mes siguiente es a seguir disminuyendo.

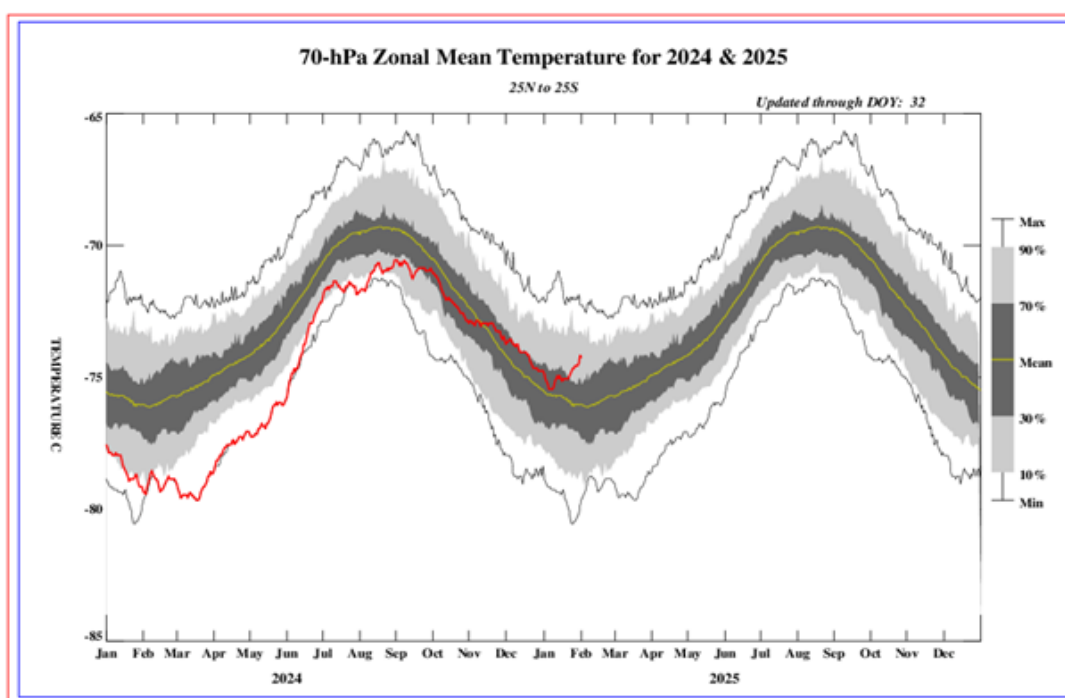
La variabilidad de la concentración de ozono en el nivel de 70 hPa, asociado a los cambios en la temperatura es una consecuencia del movimiento de traslación de la tierra con respecto al sol, así como a procesos de transferencia radiativa y reacciones fotoquímicas. Se suma también, el proceso de la circulación Brewer-Dobson, la Oscilación Quasi Biental, 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. Hay que destacar el impacto que tiene la emisión de sustancias agotadoras de ozono (elementos sustitutos) 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 -76.0°C , mayor en valor numérico al mes pasado, pero físicamente “menos cálido”. La temperatura calculada en este mes, fue de -75.0°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 243.8 UD, superior al mes anterior.

FIGURA N°10

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



Considerando la información de temperatura de la baja y media estratósfera, proveniente de la estación de altura de Junín, podemos decir lo siguiente:

La temperatura a nivel de 100 hPa promedio mensual fue de -78.7°C , mientras que a nivel de 70 hPa fue de -74.9°C , valores relativamente distantes con una diferencia entre ellas, de 3.8°C . Cabe mencionar que entre las dos capas existen 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 -66.0°C (algo similar al mes anterior).

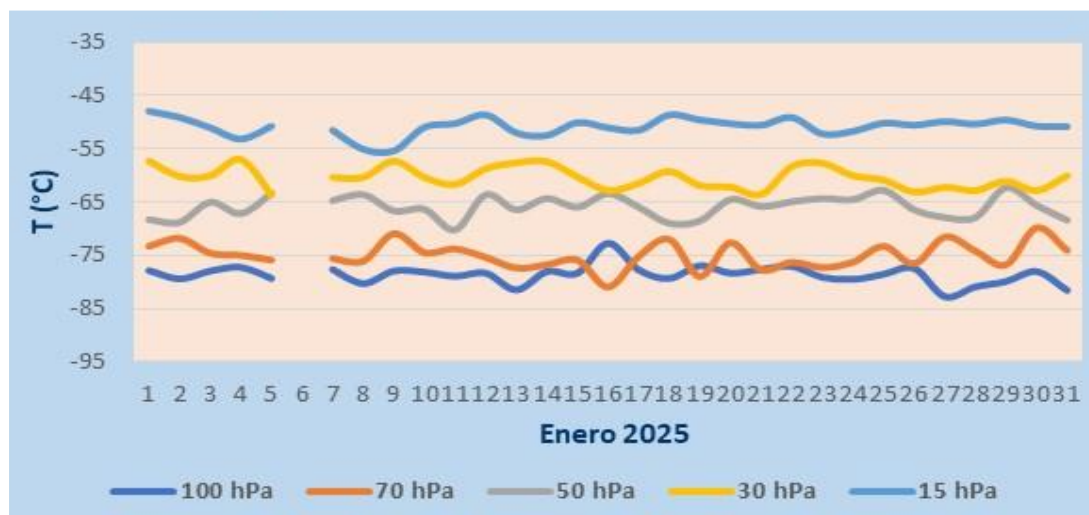
En la media estratósfera, a 30 hPa, la temperatura promedio registrada fue de -60.4°C (valor mayor al mes pasado) para finalmente, a 15 hPa, la temperatura fuera de -50.8°C (ligero enfriamiento comparado al mes anterior). La relación de mezcla de ozono en esta capa ha sido baja.

La temperatura promedio mensual a nivel de 70 hPa obtenida por la NOAA (-75.0°C) y la obtenida por un equipo de altura (-74.9°C), valores prácticamente similares. 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 central del país es puntual.

En ese sentido, la tendencia del régimen térmico durante el mes, fue por lo general a un ligero enfriamiento.

FIGURA N°11

Régimen térmico en la baja y media estratósfera de Junín



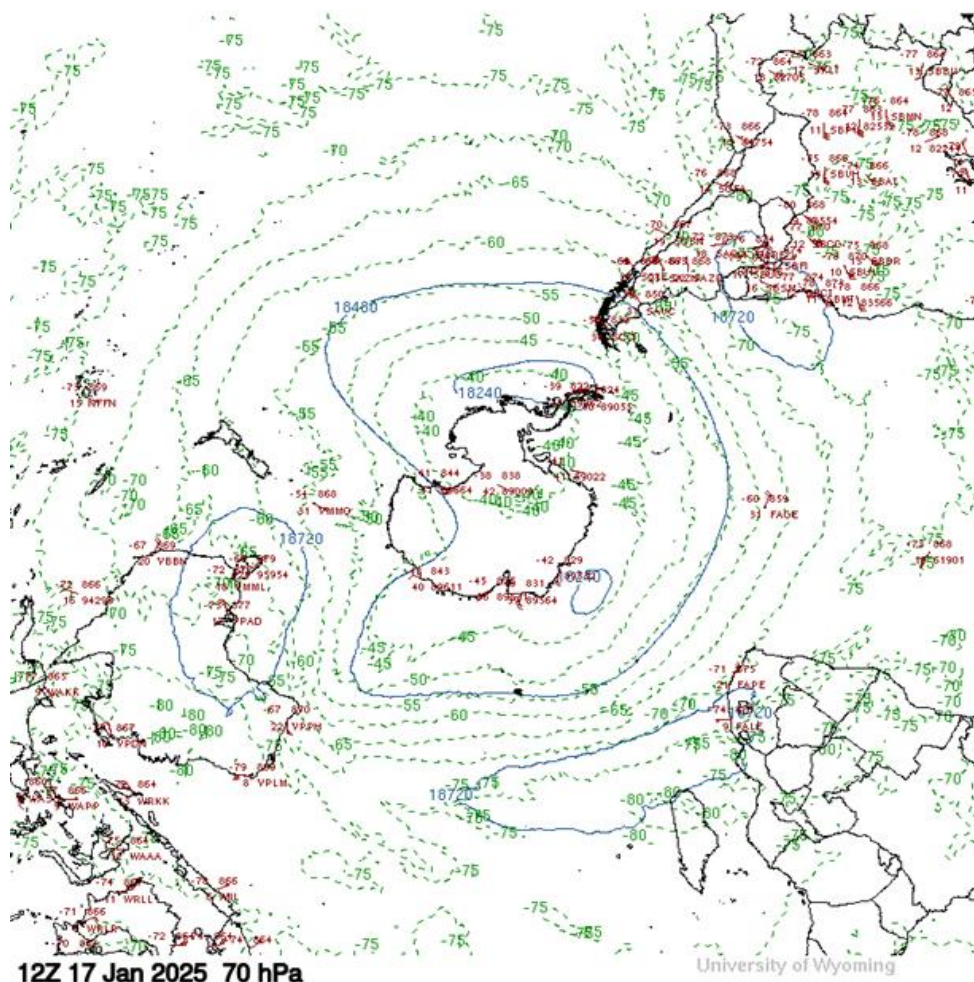
El comportamiento de temperaturas en el nivel de 70 hPa considerando todo el hemisferio sur en un día típico de enero, es mostrado en la Figura 12 (University of Wyoming) en donde se aprecia que las temperaturas, específicamente, en el continente Antártico han registrado mayormente valores de -40°C, debido a condiciones todavía “cálidas” debido a condiciones propias de la estación de verano. Las temperaturas en dicho continente paulatinamente registrarán un ascenso debido al mayor establecimiento de la estación de verano.

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 ese nivel de la estratósfera (70 hPa) de la región tropical, se encuentra relacionada con una disminución en las concentraciones de ozono.

En latitudes bajas (20°N – 20°S), las temperaturas en este mes, en la atmósfera alta (media y alta estratósfera), como se ha mencionado anteriormente, ha registrado primero un descenso y después un ascenso, pero siempre por debajo de sus normales climáticas. Los procesos de transferencia radiativa se han incrementado en forma paulatina dado la mayor intensidad de 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 -75.0°C, proceso físico más cálido comparado al mes pasado, siendo uno de los factores para que las concentraciones de ozono atmosférico, en esta capa, hayan registrado una tendencia al ascenso aunados a circulaciones de viento provenientes del primer y cuarto cuadrante así como del norte, aunados a una moderada relación de mezcla de ozono atmosférico a nivel de 70 hPa y alta actividad fotoquímica.

FIGURA N°12
Comportamiento de la temperatura en 70 hPa para el hemisferio sur (17 enero 2025)



Fuente: Universidad de Wyoming

III. CONCLUSIONES

1. El mes de enero se caracteriza porque climáticamente las concentraciones de ozono sobre nuestro país (los medidos en superficie) continúan con el proceso de descenso. El valor registrado, en este mes, fue de 243.3 UD como valor promedio. Este valor ha sido superior a lo obtenido el mes pasado y permite concluir que las concentraciones de ozono durante este mes, fueron relativamente moderadas debido mayormente a la presencia de los vientos zonales negativos (a partir de la segunda quincena del mes), con excepción de los niveles de 50 hPa y 15 hPa donde se registraron vientos netamente del este los cuales fueron de moderada a alta intensidad, aunado a un incremento en las concentraciones de vapor de agua, especialmente en la capa de 100 hPa.
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 239.0 UD a 250.7 UD, límites inferior y superior, ligeramente inferior y superior respectivamente al mes anterior. Este incremento, está ligado al traslado de concentraciones de ozono hacia nuestras latitudes por efecto de los vientos provenientes del norte como consecuencia de la formación de núcleos ciclónicos en el hemisferio norte, los cuales derivaron esas masas de aire 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 enero, se puede concluir que la máxima concentración de la misma, en la región tropical del hemisferio sur, se registró entre los 80 hPa y los 10 hPa (baja y media estratósfera) con valores que oscilaron entre 12 UD y 24 UD (ligeramente mayor al mes anterior), mientras que en latitudes medias del hemisferio sur, la altura de las máximas concentraciones se dieron entre los 105 hPa y 20 hPa con valores entre 13 UD y 28 UD. La variabilidad en las concentraciones de ozono de este mes con respecto al de diciembre, ha sido influenciada, en un primer momento, por vientos del este y en un segundo momento por vientos del norte.
4. El registro de concentraciones de ozono atmosférico en latitudes medias y altas del hemisferio norte, oscilaron entre 15 UD y 30 UD, entre la baja y media estratósfera 130 hPa y 08 hPa a lo largo de 35°N – 70°N). Durante el mes de enero se registraron procesos físicos de moderada relación de mezcla de ozono de latitudes medias a altas, influenciados aún por el vórtice polar ártico (circulación meridional), el cual permitió mantener concentraciones de ozono atmosférico parecidas 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 un incremento con valores entre 4.00 ppmv y 6.50 ppmv, lo cual demuestra que, a pesar de encontrarnos en el límite superior de la estratósfera baja, se registran concentraciones, aunque muy bajas, de vapor de agua. Cabe resaltar que concentraciones mayores, especialmente en la baja estratósfera, afectan grandemente el comportamiento espacial y temporal del ozono atmosférico sobre nuestras latitudes, permitiendo una menor concentración.
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 incremento de las concentraciones de ozono sobre nuestras latitudes, específicamente sobre nuestro país, han sido los vientos mayormente del norte, a partir de la segunda quincena del mes, los cuales fueron de intensidad moderada, principalmente en la estratósfera baja.
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, durante la primera quincena, mientras que a partir de la segunda, se incrementaron permitiendo a nivel promedio mensual un ligero incremento de la misma comparado al mes anterior.
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 enero, se caracterizó por registrar valores menores al mes pasado (pero físicamente más cálidos), lo que en cierta manera propició el incremento de las concentraciones de ozono sobre esta franja latitudinal.
9. Debido a que enero es considerado como un mes donde climáticamente el régimen térmico continúa disminuyendo principalmente en la baja y media estratósfera de la región tropical, esto trae como consecuencia también una disminución de las concentraciones de ozono aunados a otros factores como la circulación de los vientos y el bajo aporte de ozono a través de la relación de mezcla y a la mayor actividad fotoquímica.

10. Debido al comportamiento de la temperatura en las diferentes capas de la estratósfera, realizadas con equipos de altura sobre la sierra central del Perú (departamento de Junín), se concluye que en la estratósfera baja las condiciones térmicas fueron parecidas al mes anterior, cuando en realidad debieron de haber disminuido, mientras que en la estratósfera media se registró un ligero enfriamiento.
11. Las condiciones térmicas parecidas al mes anterior en la estratósfera baja, puede deberse a los vientos del norte que aportaron moderadas concentraciones y es por ello que se tuvo como resultado un incremento en la concentración de ozono atmosférico.
12. 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 marzo 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**

