

DICIEMBRE 2024
Vol.12

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





Introducción

La capa de ozono se encuentra dentro de la atmósfera terrestre y tiene la función de ser una capa protectora que preserva la vida del planeta Tierra, haciendo las veces de escudo contra la radiación proveniente del sol llamados UV o radiación ultravioleta, absorbiendo del 97% al 99% de ella. Se encuentra a una distancia de la superficie de la tierra de 15 a 50 kilómetros de altura en mayor concentración, aunque cercano al suelo también está presente.

Debido a los productos generados por los humanos y llamados halocarbonos, la disminución en la concentración de ozono se ha acelerado, en los últimos 30 años, en comparación a su ritmo natural. Aunque en algunas regiones del mundo, se vienen recuperando en forma paulatina debido a la disminución de las sustancias agotadoras de ozono por aplicación del Protocolo de Montreal y sus Enmiendas en Kigali. Los sustitutos aparecidos tienen un menor potencial de agotamiento de ozono, pero al fin y al cabo siguen destruyendo el ozono, pero en menor proporción. El paso de la radiación solar más intenso provoca en la vida humana enfermedades como el cáncer a la piel o las cataratas en los ojos, así como la reducción del sistema inmunológico.

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

ANTECEDENTES

El SENAMHI cuenta con el Observatorio de Vigilancia Atmosférica (OVA) Marcapomacocha, ubicada en la sierra central del país (provincia de Yauli y departamento de Junín), asimismo, se encuentra a una altitud de 4,479 metros sobre el nivel del mar, a una latitud de 11°24'18"S y longitud de 76°19'31"O. Es una de las pocas estaciones a nivel mundial cercanas a la línea ecuatorial y en un medio natural megadiverso. A nivel sudamericano conjuntamente con las estaciones VAG de Natal (Brasil) y Chacaltaya (Bolivia) son las que reportan información continua de las propiedades físicas y químicas de la atmósfera en esta parte del continente. Las actividades del OVA Marcapomacocha se enmarcan en las mediciones de la concentración de ozono total atmosférico en forma diaria realizadas con el Espectrofotómetro Dobson el cual contribuye con el Programa de Vigilancia de la Atmósfera Global - VAG de la Organización Meteorológica Mundial - OMM. Otras variables como la radiación ultravioleta, radiación solar global y parámetros meteorológicos también se vienen midiendo en dicho observatorio.

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

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

I. CÁLCULO DEL OZONO ATMOSFÉRICO Y FUNCIONAMIENTO DEL ESPECTROFOTÓMETRO DOBSON

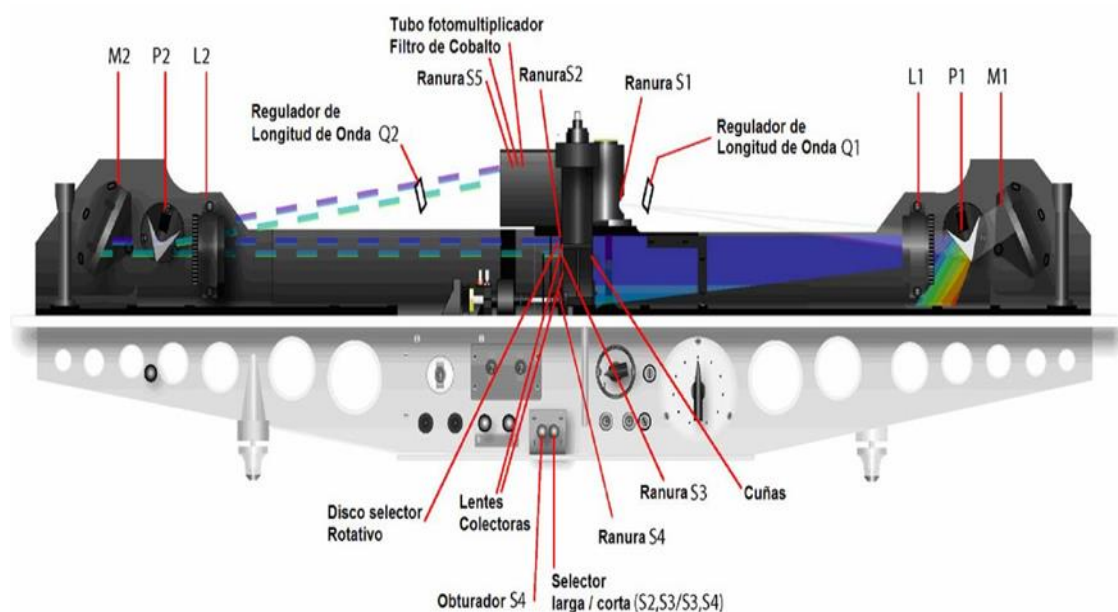
1. MEDICIÓN EN SUPERFICIE

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, BUUV) 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 diciembre la estratósfera baja y media de la región tropical ha registrado características térmicas con un ligero calentamiento en la estratósfera baja y parte de la media, mientras que, en otra parte de la media y alta estratósfera, se registró un enfriamiento. Cabe mencionar que, en las capas de la estratósfera baja y parte de la media, el régimen térmico estuvo cercano a sus valores normales con una tendencia que fue superior a esos valores. En la atmósfera alta principalmente, se registraron valores por debajo de sus valores climáticos. Las concentraciones de ozono disminuyeron en este mes, los cuales han estado asociados a esta disminución de la temperatura en niveles medios y altos de la estratósfera. La relación de mezcla de ozono, fue baja el cual también ayudó a la disminución de este gas sobre nuestras latitudes, como producto de una mayor persistencia de flujos de viento provenientes del este transportando bajas concentraciones.

En lo que respecta especialmente al flujo de vientos, se registraron mayormente los flujos provenientes del este 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 y segundos no aportaron concentraciones de ozono o si lo hicieron fueron realmente bajos mientras que los vientos de la parte alta, aportaron cierta cantidad de ozono, pero no fue lo suficiente para contrarrestar esa deficiencia.

En el caso de la alta tropósfera, los sistemas atmosféricos que gobiernan el tiempo sobre nuestro país, terminaron siendo desplazados hacia el hemisferio sur debido al inicio 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) debido a la invasión de masas de agua cálidas los cuales han sido frecuentes, a partir de la segunda semana 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, 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).

Es importante tener en cuenta que esos regímenes de circulación, así como los procesos que involucran el inicio de la estación del verano austral desde fines de mes, 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 20 de diciembre) 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 diez (10) días del mes, los vientos fueron muy variables para luego a partir de la segunda década del mes ser mayormente del este, sureste, noreste. También se registraron vientos del norte y sur los cuales aportaron escasa cantidad de ozono atmosférico, pero en forma bastante esporádica. 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 y en parte del continente sudamericano.

En latitudes medias y altas del hemisferio sur, la circulación de vientos ha continuado siendo zonal positivo aportando concentraciones altas de ozono atmosférico sobre estas regiones debido a la desaparición 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 y media, se ha observado comportamientos entre normales a ligeramente superiores (100 hPa, 70 hPa, 50 hPa y 30 hPa). En cambio, en los niveles de 10 hPa, 5 hPa, 2 hPa y 1 hPa, el comportamiento fue inferior a sus valores climáticos. A pesar de este comportamiento, especialmente en la estratósfera baja, las concentraciones de ozono lograron disminuir en la región tropical. El comportamiento térmico en la baja y media estratósfera estaría relacionado por la presencia variable de vientos en esta región con moderada relación de mezcla de ozono, pero con tendencia al registro de vientos del este, así como a una disminución ligera de la concentración de humedad atmosférica comparado al mes anterior. 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, 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 con ese

proceso. Cabe enfatizar que los valores máximos de ozono sobre nuestro país, en este mes, fueron inferiores a los valores registrados en el mes de noviembre. La amplitud entre dichos valores en el presente mes, ha sido mucho menor 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 diciembre 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 237.2 UD y 247.4 UD (UD = Unidades Dobson). A nivel promedio mensual fueron inferiores.

Es importante señalar que en las primeras horas del día las concentraciones de ozono son relativamente altas debido al ozono acumulado en horas de la noche (en diciembre, climáticamente, se forma 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).

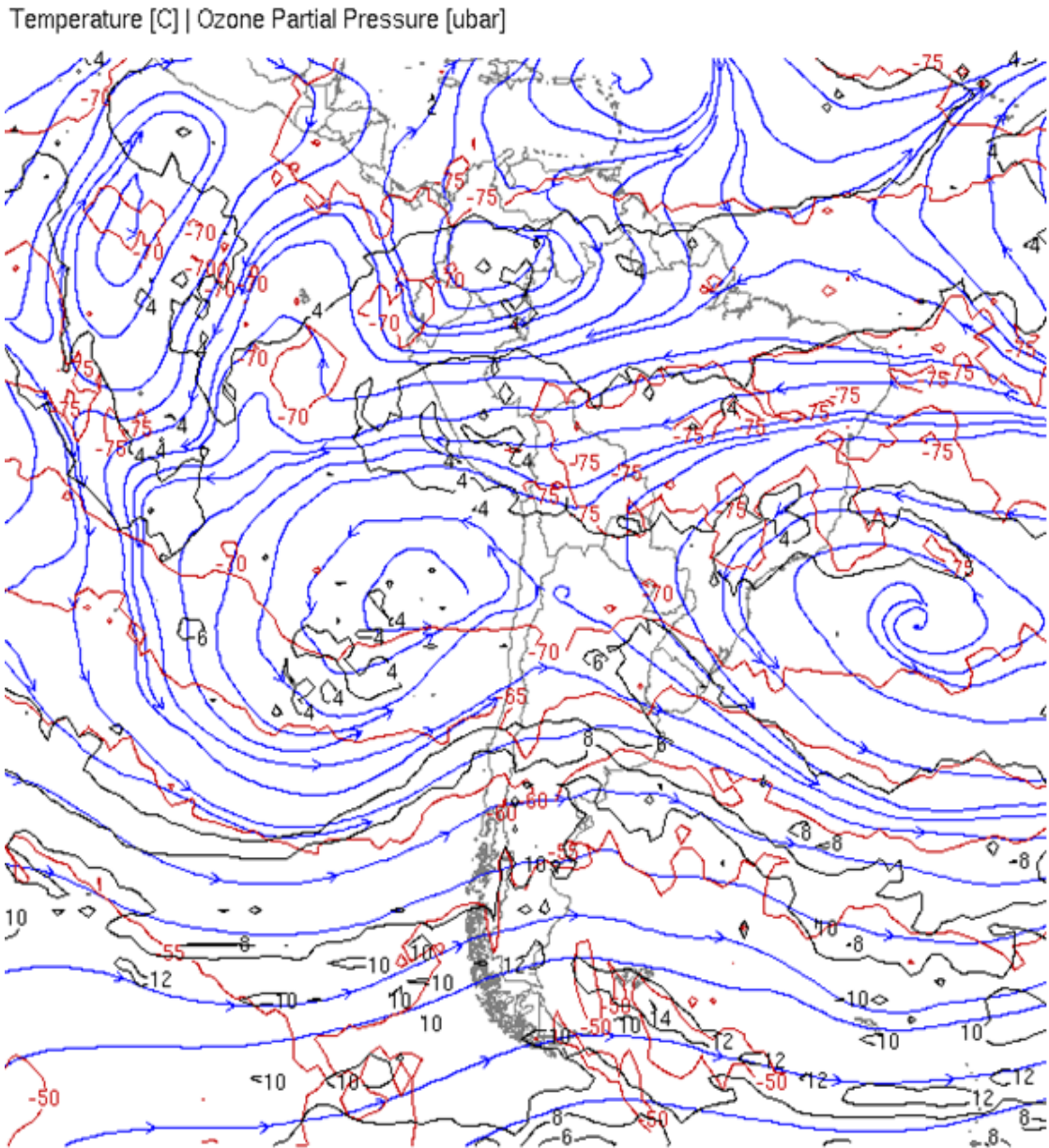
Este proceso físico, se enmarca en que durante las primeras horas de la mañana la incidencia de la radiación ultravioleta, en esta temporada, se incrementa, por ende las concentraciones de ozono son relativamente altas (debido al ozono residual), a medida que la intensidad de la radiación ultravioleta se incrementa en forma paulatina hacia el mediodía, donde los valores son entre 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 inicio (desde fines de mes) de la estación de verano. En algunas regiones, especialmente en el norte han sido ligeramente mayores al mes pasado, mientras que en la región central y sur los niveles fueron superiores. 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 norte y central. Se espera que en el mes siguiente dichos valores de radiación, continúen

incrementándose debido a condiciones propias 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.

FIGURA N°2

Flujos de masas de aire variables conjuntamente con flujos zonales
Fuente: Weather Service de la University of Wyoming



University of Wyoming

0 Hour 70 hPa Forecast Valid 18Z Fri 20 Dec 2024

El comportamiento de la concentración de ozono atmosférico promedio diario mensual multianual (2000-2023) del mes de diciembre oscila entre 237.2 UD y 253.3 UD aproximadamente (Figura 3), mientras que los medidos en el mes de diciembre del presente año, oscilaron entre 239.6 UD y 244.0 UD.

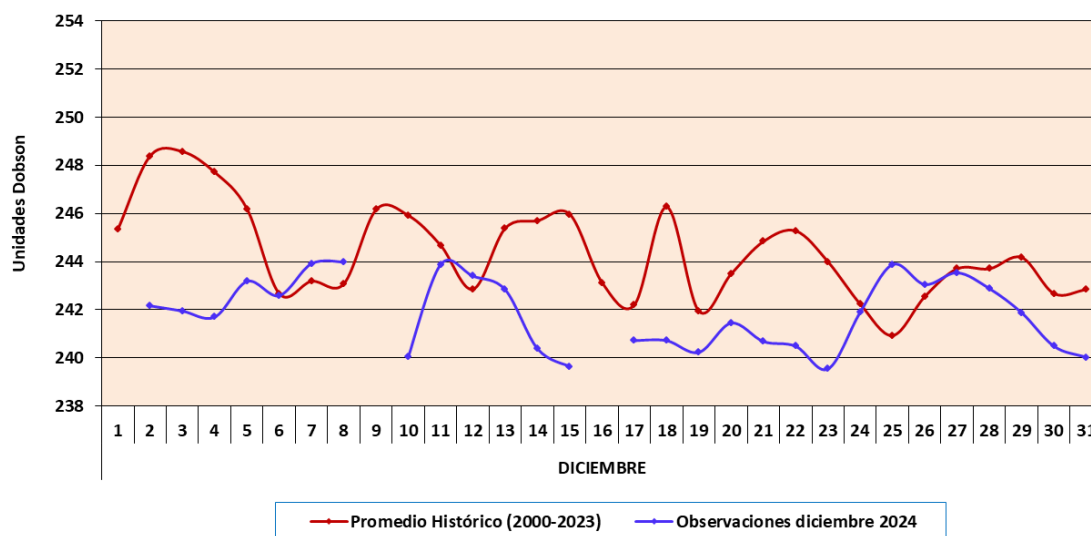
En la figura se aprecia que los valores registrados en el presente mes, estuvieron un 82% por debajo de sus valores climáticos, mientras que un 18% por encima (cabe mencionar que hubo un desfase de hasta 7 UD entre el valor histórico y el registrado durante el mes de diciembre del presente año).

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 los días 06, 12, 24, 26 27) y en otros más bien alejándose (en el resto de días no mencionados, principalmente entre 02, 03, 04, 10, 14, 15 y 18 de diciembre), lo cual se atribuye a los cambios en la circulación atmosférica (vientos del sur, sur este, noreste este y en otros momentos del norte), 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 noviembre ha registrado valores inferiores (pero con una tendencia a continuar disminuyendo, 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, en el mes de diciembre, 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 °3

Comportamiento temporal de la concentración de ozono atmosférico en el OVA Marcapomacocha. Diciembre 2024.



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 241.8 UD inferior en 3.0 UD al promedio mensual multianual (244.8 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. Por otro lado, la circulación de los vientos, a nivel vertical, desde la tropósfera hacia la estratósfera permite el traslado de cantidades de ozono los cuales a lo largo de los meses lo van redistribuyendo hacia latitudes mayores (Circulación Brewer-Dobson), 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 diciembre, se ha empezado a registrar masas de aire provenientes principalmente del primer y cuarto cuadrante al nivel de 70 hPa, ósea vientos del este, sureste y noreste. Claro está que también se registraron vientos de otras

direcciones, pero con menor frecuencia, trasladando bajas concentraciones de ozono atmosférico, lo que hizo que se registre un ligero descenso, 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), donde se ha registrado invasiones de masas de agua cálidas provenientes del Pacífico norte, especialmente a partir de la segunda semana, manteniendo condiciones de alta humedad en toda esa región. Probablemente se haya registrado algún proceso de advección húmeda tropósfera-estratósfera (aunque regionalmente empezó a calentarse en forma ligera) el mismo que quizás fue un factor adicional para que las concentraciones de ozono hayan sido inferiores al mes pasado. A esto se le añade el flujo de vientos provenientes del este, sureste y noreste, los cuales han realizado un escaso aporte de concentraciones de ozono sobre nuestro país y obviamente en parte de nuestra región sudamericana. Un factor que interactúa con estos procesos es la humedad atmosférica, el cual ha disminuido (con respecto al mes pasado) a nivel de 100 hPa, pero mantenido similares 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 88% de días del mes de diciembre, 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 70% de días del mes estuvieron por encima de lo registrado en superficie. Figura 4.

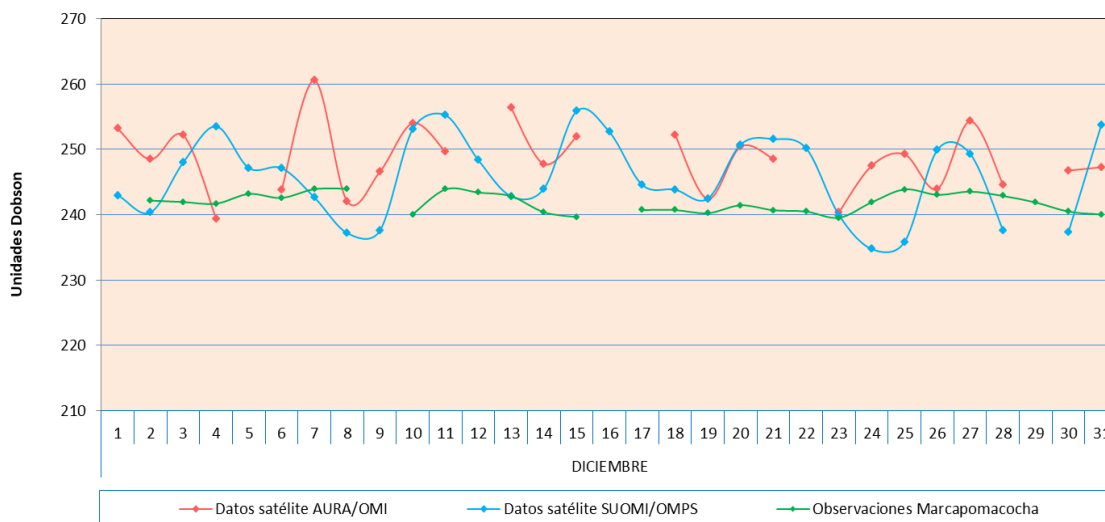
De este análisis podemos decir que la información proveniente de estos dos satélites es mayor a lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson, cuando anteriormente eran inferiores, Existen días donde las diferencias entre los valores registrados por el satélite y el medido en superficie, son bastante altas en el orden de 1 a 17 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, 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 disminuyendo desde octubre hasta enero del siguiente año debido a los mayores procesos de reacciones fotoquímicas como producto del inicio 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

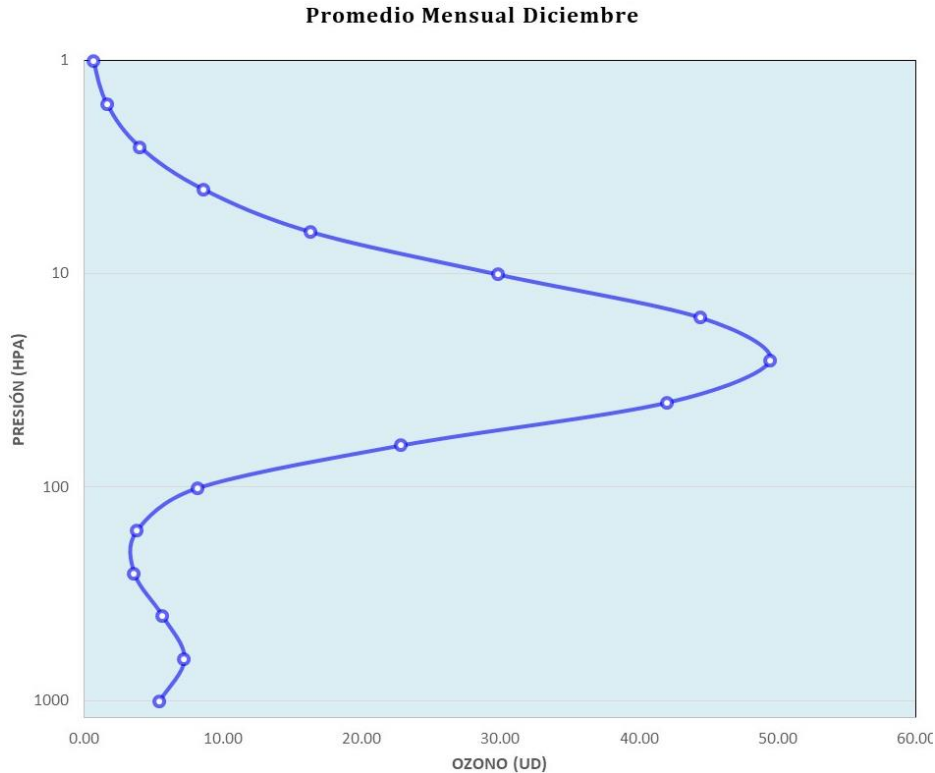
atmósfera y el desarrollo de modelos numéricos, una disminución en las concentraciones de ozono (~2% por década) en la estratósfera baja de la región tropical (20°S - 20°N), asimismo en la estratósfera media algo parecido para finalmente en la estratósfera superior un aumento de 2% por década.

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 diciembre 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 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 24 UD a 48 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 diciembre (día 18) 2024 obtenida por Metop-C/GOME-2, muestra para el hemisferio norte concentraciones ligeramente menores al mes pasado (debidas al inicio de la estación astronómica de verano), cuyos valores han oscilado entre 10 UD y 22 UD, entre la baja y media estratósfera (el área de cobertura latitudinal de estas concentraciones bajas se dio entre 0N°-45°N). A partir del 21 de diciembre, dicho hemisferio, se encuentra en la estación de invierno, registrándose aún concentraciones entre altas y moderadas de ozono en latitudes altas con tendencia a disminuir, debido al incremento de humedad atmosférica, así como a la influencia de los vientos mayormente meridionales sobre dichas latitudes. Por otro lado, el régimen de temperatura en la estratósfera baja y media empieza a disminuir.

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 22 UD) en latitudes bajas del hemisferio norte fue de 100 hPa y 10 hPa, mientras que en latitudes bajas del hemisferio sur (22 UD a 11 UD) la altura fue de 70 hPa y 10 hPa. En latitudes medias del hemisferio sur más bien se registraron concentraciones un poco mayores con valores entre 18 UD y 27 UD, pero a una altura entre 150 hPa y 10 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 una ligera disminución, por factores de circulación de vientos mayormente zonales negativos a nivel de 70 hPa), así como por efecto de una ligera disminución 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.

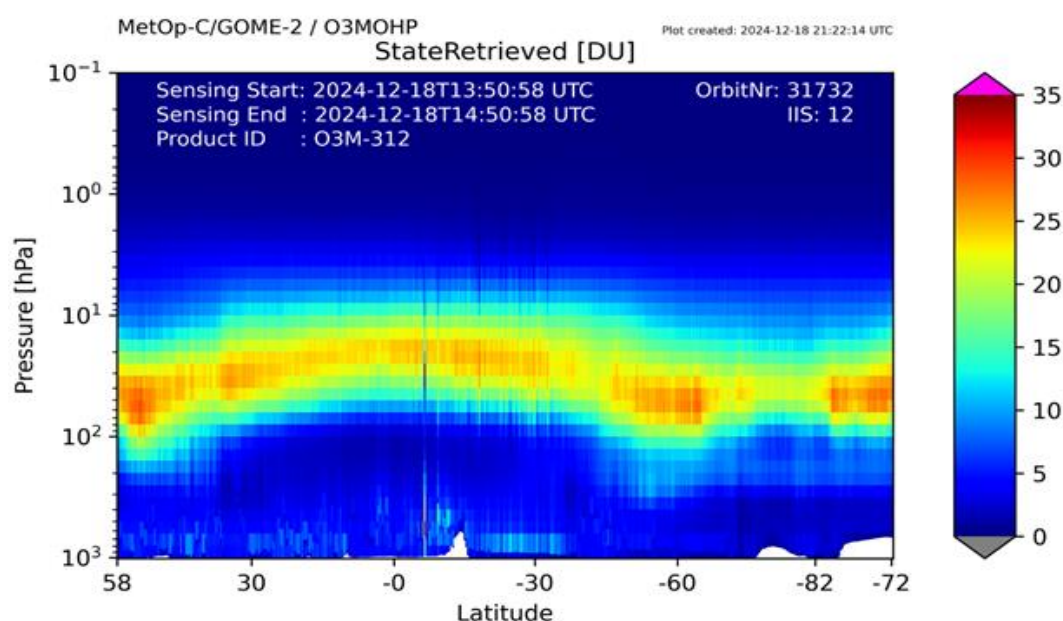
Para el caso de nuestro país, concentraciones de ozono relativamente bajas se han registrado entre los 70 hPa y 10 hPa con valores entre 11 UD y 22 UD, especialmente en la región central y sur del país, mientras que, en la sierra norte, las concentraciones oscilaron entre 13 UD y 21 UD a una altura de 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 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, por lo que las concentraciones de ozono han disminuido, pero ligeramente. En el hemisferio norte, se ha seguido observando una circulación que en cierta manera ha “encapsulado” este gas (vórtice polar) con flujos de viento mayormente meridionales, los cuales han mostrado concentraciones de ozono con una tendencia a la disminución con respecto a los del hemisferio sur. Es importante señalar que dicho hemisferio va ingresando a un periodo más frío, dado el inicio de la estación de invierno, motivo por el cual tanto los procesos físicos como químicos llegan a tener una menor actividad fotoquímica permitiendo una paulatina disminución 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.

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.

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.

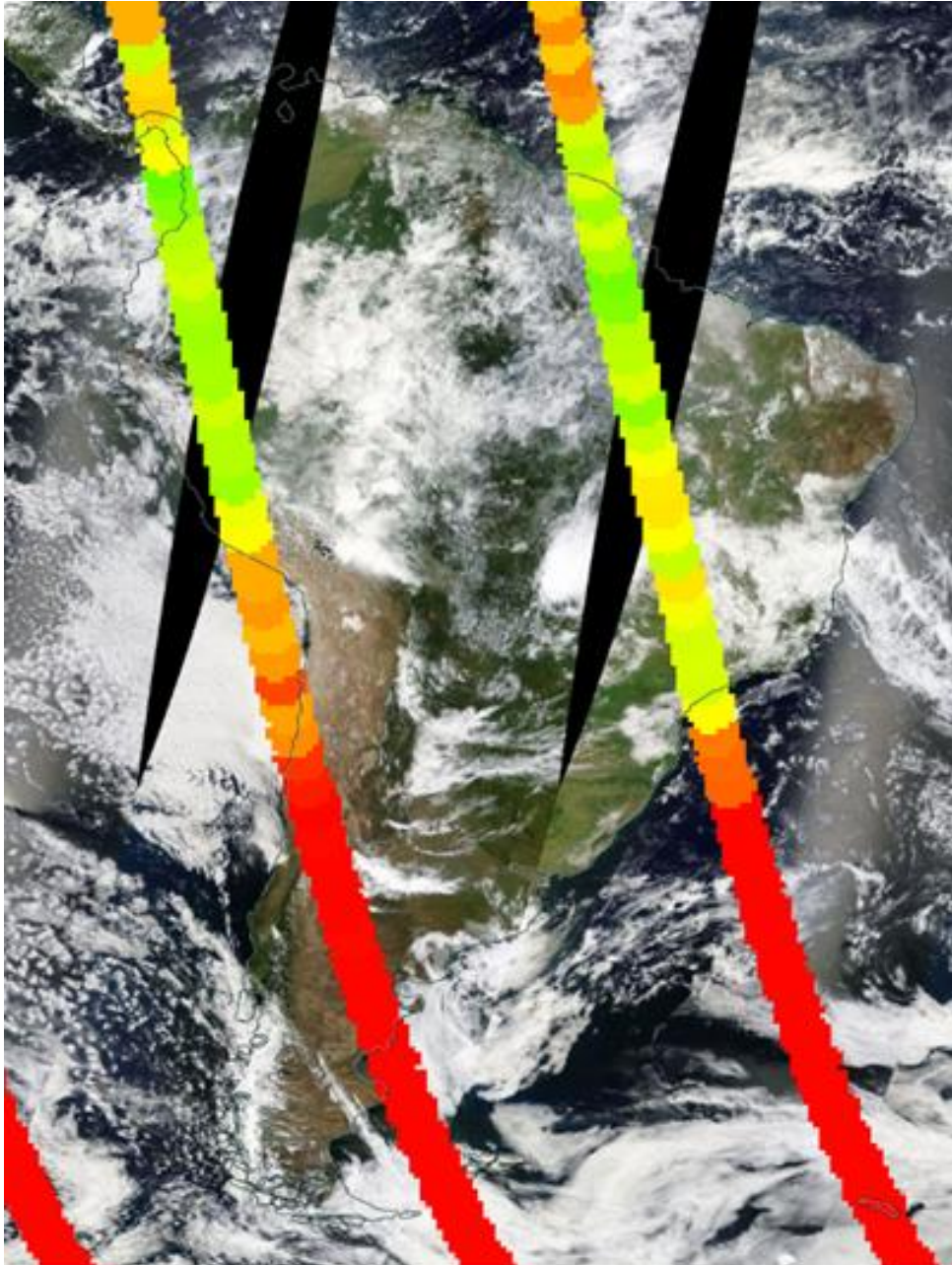
En la figura 7 se observa un mapa con concentraciones de vapor de agua a nivel de 46 hPa (límite entre la estratósfera baja y media) para un día típico del mes (12 diciembre 2024), obtenida de la Earth Data de la National Aeronautics Space Administration - NASA. En ella se observa sobre Perú, concentraciones de vapor de agua relativamente moderadas (algo superior al mes anterior, especialmente en la región norte del país, con una tendencia a continuar incrementándose). Por ejemplo, en la región norte del país las concentraciones oscilaron entre 3.52 ppmv a 3.74 ppmv, mientras que en la región central valores entre 3.27 ppmv y 3.50 ppmv. En el lado de la región sur del país, concentraciones entre 3.50

ppmv y 3.90 ppmv. Tal como se observa, la concentración de humedad se ha incrementado solo en el norte, mientras que en el centro y sur disminuyó permitiendo en cierta manera la disminución de las concentraciones de ozono atmosférico. Esta disminución también está asociada 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 diciembre fue de 24%, 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 una ligera disminución con respecto al mes pasado (especialmente a nivel de 100 hPa). A partir del 21 de diciembre 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 diciembre, 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 algo menores a lo registrado en el mes de noviembre, debido a la ocurrencia de flujos de viento del este, sureste y noreste mayormente durante gran parte del mes. Tal como se explicó en párrafos anteriores, se registró una disminución en la concentración de humedad en la baja estratósfera (100 hPa) como producto de flujos de viento variable, aunque con una ligera tendencia de vientos del este lo cual permitió esa disminución. 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 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 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.

Durante casi todo el mes de diciembre 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 abarcaron la región central y norte del país (especialmente costa y sierra). La disminución de

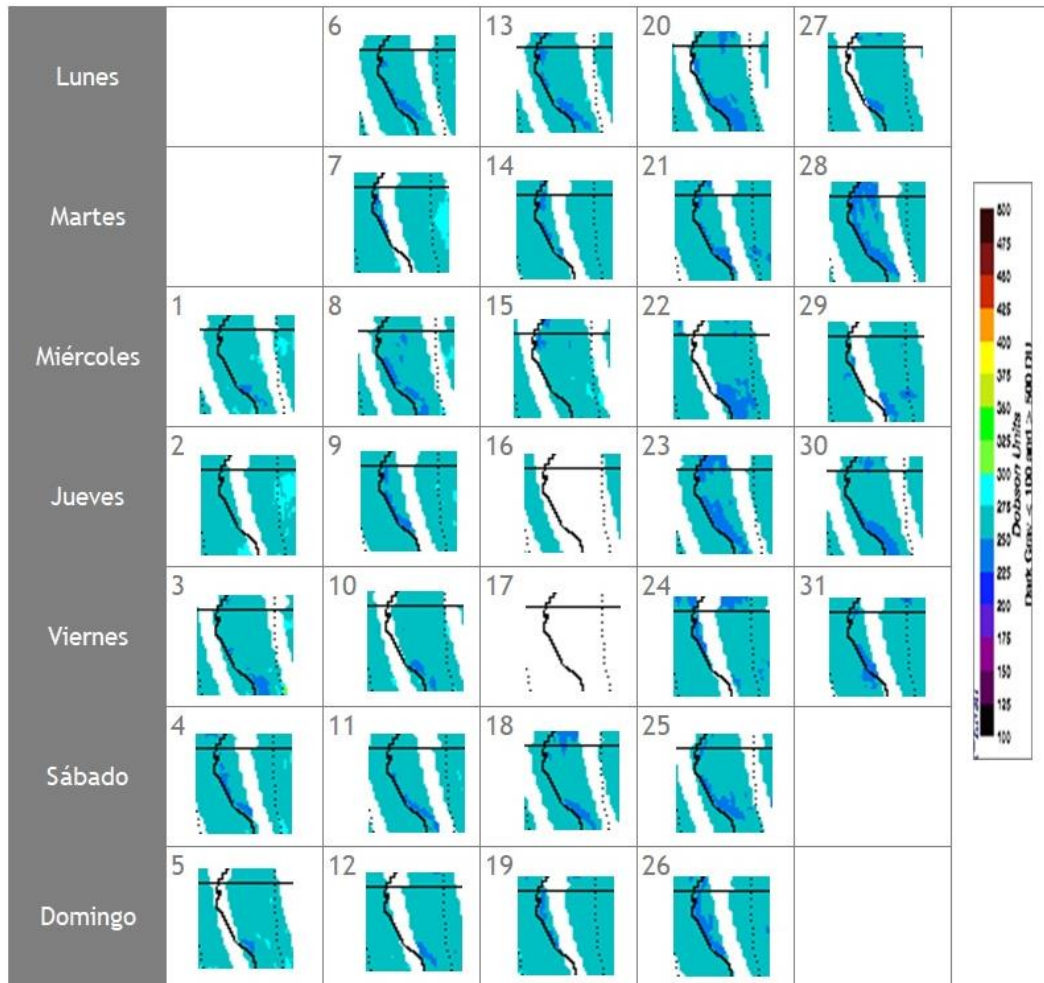
las concentraciones es típica para nuestras latitudes debido a lo explicado en párrafos anteriores. Este proceso debe continuar hasta el mes de enero aproximadamente debido a los procesos fotoquímicos que ocurren en la estratósfera baja y media principalmente, así como a la circulación de los vientos y la relación de mezcla, ya que en dichas capas es donde se concentra la mayor cantidad de ozono atmosférico. El mismo comportamiento se registra en las partes altas de Bolivia (altiplano peruano-boliviano). La circulación de los vientos en la baja y media estratósfera registraron ciertas similitudes con la circulación en nuestro país durante el último mes del año.

Se debe mencionar que, en este mes, se registraron ingresos de masas de aire del este a nivel de 70 hPa, lo que acentuó la disminución paulatina de las concentraciones de ozono sobre nuestro país. Diciembre 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 diciembre 2024

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 diciembre 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 diciembre 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 3 m/s y 11 m/s con una persistencia de 52%. Asimismo, se registraron vientos del norte, noroeste, oeste y sur con una persistencia de 45% y con una velocidad entre 3 m/s y 8 m/s. En otras direcciones la persistencia fue de 3%. 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 noreste, este y sureste con velocidades que oscilaron entre 4.0 m/s y 15 m/s con una persistencia de 75%. En otras direcciones la persistencia fue de 25% 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 este y sureste, con una persistencia del 59% con velocidades entre 5 m/s y 15 m/s.

MEDIA ESTRATÓSFERA

En el nivel de 30 los flujos predominantes de viento fueron del primer y cuarto cuadrante o sea del noreste, este y sureste con una persistencia de 71%. Las velocidades de viento oscilaron entre 1 m/s y 10 m/s. Por otro lado, en otras direcciones la persistencia fue de 26 % con velocidades de viento entre 1 m/s y 14 m/s.

Finalmente, en el nivel de 15 hPa los flujos fueron netamente del este, sureste y noreste, con velocidades que oscilaron entre 6 m/s y 22 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

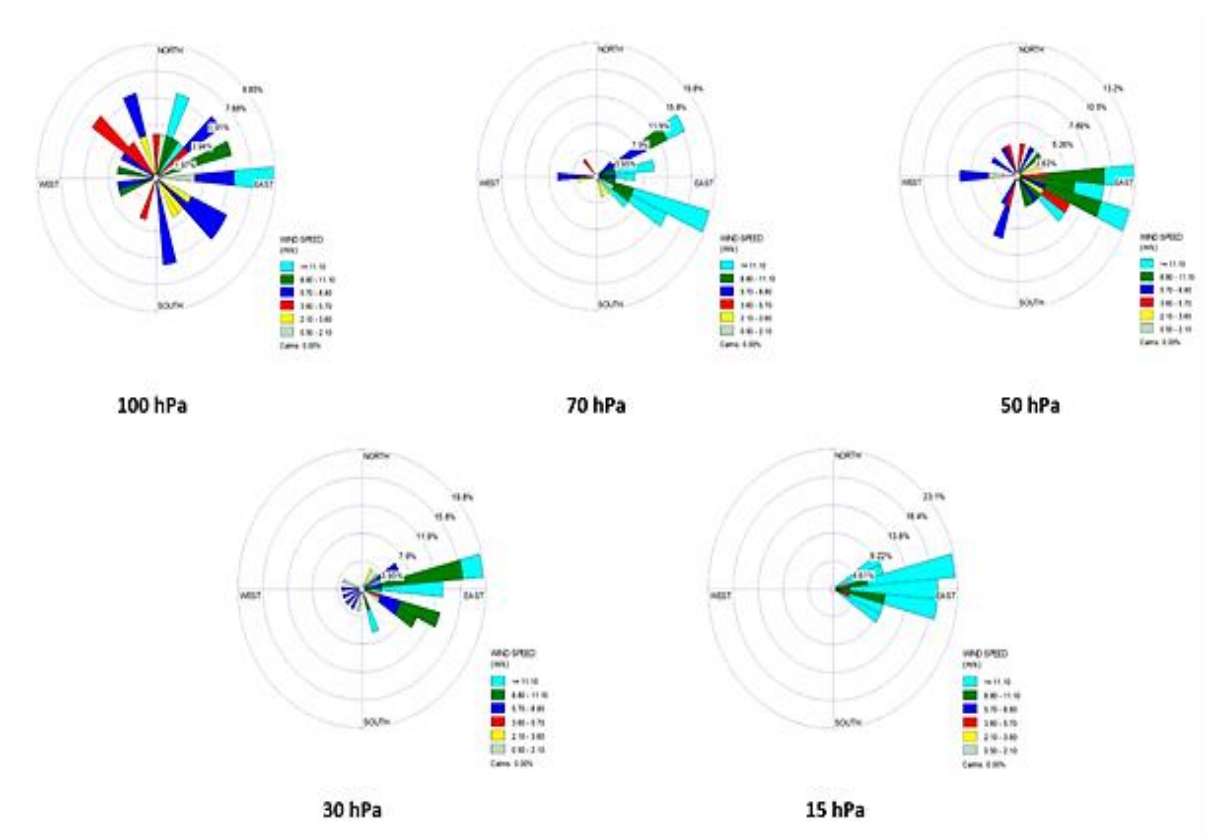
la baja estratósfera como en la media. Esta persistencia de flujos mayormente del este ha tenido incidencia en el transporte de ozono atmosférico sobre nuestras latitudes, permitiendo que se registre bajas concentraciones de este gas. En esta temporada las concentraciones de ozono disminuyen hasta el mes de enero debido a estos flujos, 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.

Por otro lado, en este mes se registró una ligera disminución 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. La figura 2 donde los vientos son zonales negativos sustenta los bajos ingresos de ozono sobre nuestras latitudes permitiendo una disminución.

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 diciembre 2024



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 2023 hasta el mes de diciembre 2024, 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), ha registrado una tendencia al descenso (enfriamiento), pero siempre por encima de sus valores climáticos, tal como muestra la figura, permitiendo una cierta reducción en las concentraciones de ozono atmosférico en dicha franja tropical (cabe mencionar que dicha disminución ha sido moderada). Debido al comportamiento térmico del aire en ese nivel, las concentraciones de ozono, en nuestro país, lograron registrar valores inferiores a nivel diario (especialmente los valores extremos superiores), con una tendencia a continuar registrando concentraciones cada vez menores hasta el mes de enero del siguiente año. Se debe remarcar que, durante el mes de diciembre, las temperaturas, observadas en las capas bajas de la estratósfera estuvieron por encima de sus valores climáticos, con excepción de la capa de 100 hPa, donde estuvieron cercanos a sus valores normales. 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 semana del mes, pero aun así por debajo de sus valores climáticos. La tendencia a lo largo del mes siguiente es a seguir disminuyendo.

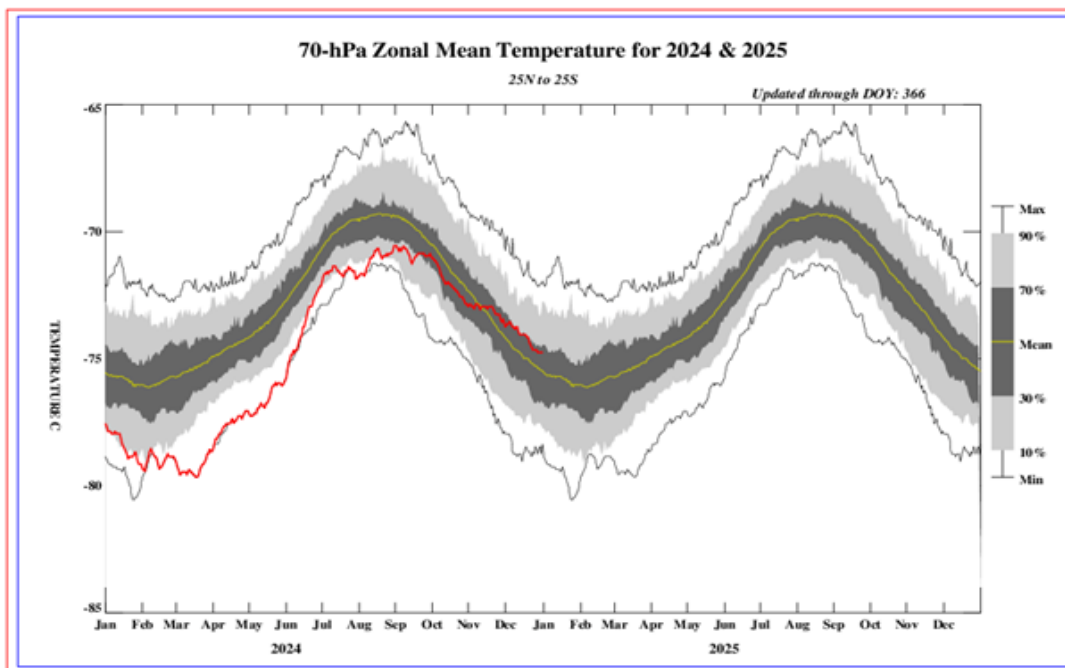
La variabilidad de la concentración de ozono en el nivel de 70 hPa, asociado a los cambios en la temperatura es una consecuencia del movimiento de traslación de la tierra con respecto al sol, así como a procesos de transferencia radiativa y reacciones fotoquímicas. Se suma también, el proceso de la circulación Brewer-Dobson, la Oscilación Quasi 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. 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 -75.0°C , mayor en valor numérico al mes pasado, pero físicamente “menos cálido”. La temperatura calculada en este mes, fue de -74.0°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 241.8 UD, menor al mes anterior.

FIGURA N°10

Comportamiento de la temperatura en la baja estratósfera para el mes de diciembre 2024
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 -78.6°C , mientras que a nivel de 70 hPa fue de -74.7°C , valores relativamente distantes con una diferencia entre ellas, de 4.0°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 -66.2°C (menor al mes anterior, más frío).

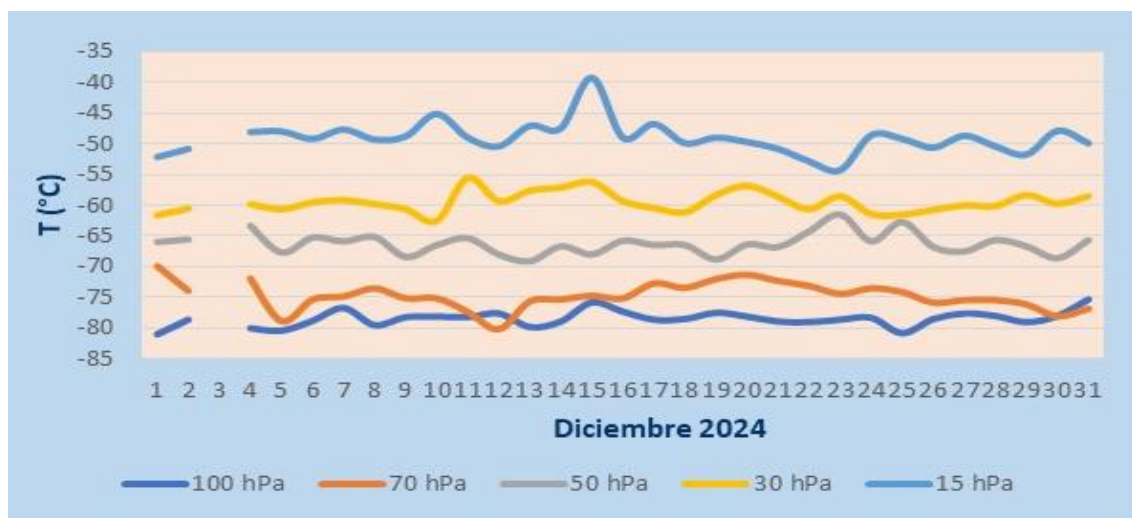
En la media estratósfera, a 30 hPa, la temperatura promedio registrada fue de -59.4°C (valor menor al mes pasado) para finalmente, a 15 hPa, la temperatura fuera de -49.1°C (ligero enfriamiento comparado al mes anterior). La relación de mezcla de ozono en esta capa ha sido baja.

La temperatura promedio mensual a nivel de 70 hPa obtenida por la NOAA (-74.0°C) y la obtenida por un equipo de altura (-74.7°C), valores relativamente cercanos. 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 decremento (proceso físico “frío”).

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 diciembre, es mostrado en la Figura 13 (University of Wyoming) en donde se aprecia que las temperaturas, específicamente, en el continente Antártico han registrado valores entre -50°C a -40°C , debido a condiciones relativamente “cálidas” debido a la desaparición del vórtice polar. Las temperaturas en dicho continente paulatinamente registrarán un ascenso debido al inicio de la estación de verano.

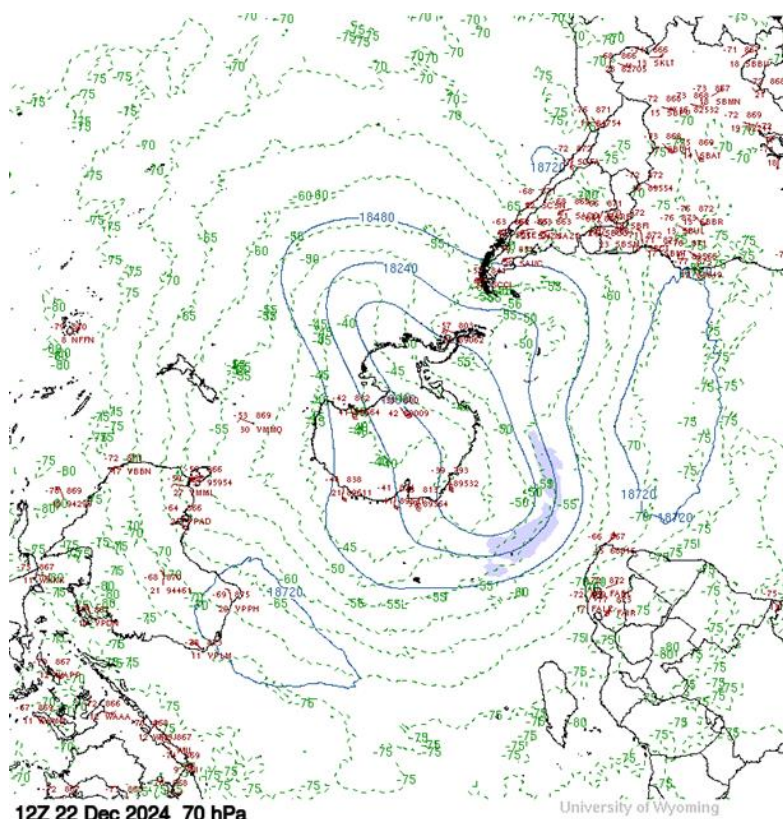
La posición de la tierra con respecto al sol (inclinación con respecto al plano ecuatorial) juega un papel importante en los procesos físico-químicos de la atmósfera. Asimismo, es importante señalar que aparte del factor astronómico, una disminución de la temperatura en ese nivel de la estratósfera (70 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 (baja estratósfera), como se ha mencionado anteriormente, ha registrado un descenso, pero siempre por encima de sus normales climáticas. Los procesos de transferencia radiativa se han incrementado en forma paulatina dado el cambio de estación desde fines de diciembre.

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 algo similar comparado al mes pasado, más “frío”, siendo uno de los factores para que las concentraciones de ozono atmosférico, en esta capa, hayan registrado una tendencia al descenso aunados a circulaciones de viento provenientes del este, así como a una baja relación de mezcla de ozono atmosférico y alta actividad fotoquímica.

FIGURA N°12

Comportamiento de la temperatura en 70 hPa para el hemisferio sur (22 diciembre 2024)



Fuente: Universidad de Wyoming

III. CONCLUSIONES

1. El mes de diciembre se caracteriza porque climáticamente las concentraciones de ozono sobre nuestro país (los medidos en superficie) han continuado con el proceso de disminución. El valor registrado, en este mes, fue de 241.8 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 mayormente zonales negativos, con excepción del nivel de 100 hPa donde se registraron vientos del este, sureste y noreste así como del oeste, norte y sur, los cuales fueron de moderada intensidad, aunado a una ligera disminución en las concentraciones de vapor de agua, especialmente en la capa de 100 hPa, mientras que en las demás capas se mantuvieron similares al mes de noviembre.
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 239.6 UD a 244.0 UD, límites inferior y superior, ligeramente superior e inferior respectivamente al mes anterior. Esta disminución, está ligado al menor traslado de concentraciones de ozono hacia nuestras latitudes por efecto de una menor relación de mezcla y al incremento de vientos del este tanto en la estratósfera baja como media. Debido a este proceso las temperaturas en ese nivel también disminuyeron.
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 diciembre, se puede concluir que la máxima concentración de la misma, en la región tropical del hemisferio sur, se registró entre los 70 hPa y los 6 hPa (baja y media estratósfera) con valores que oscilaron entre 12 UD y 22 UD (ligeramente menor al mes anterior), mientras que en latitudes medias del hemisferio sur, la altura de las máximas concentraciones se dieron entre los 200 hPa y 8 hPa con valores entre 15 UD y 23 UD. La variabilidad en las concentraciones de ozono de este mes con respecto al de noviembre, ha sido influenciada principalmente por la circulación de los vientos, así como por el régimen térmico (tendencia al descenso).
4. El registro de concentraciones de ozono atmosférico en latitudes medias y altas del hemisferio norte, oscilaron entre 15 UD y 25 UD, entre la baja y media estratósfera 150 hPa y 10 hPa a lo largo de 30°N - 60°N). Durante el mes de diciembre se registraron procesos físicos de moderada relación de mezcla de ozono de latitudes medias a altas, influenciados por el vórtice polar ártico (circulación meridional), el cual permitió un ligero incremento

del ozono atmosférico. 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 ligero incremento en la región norte con valores entre 3.52 ppmv y 3.74 ppmv), mientras que en la región central se registraron valores entre 3.27 ppmv a 3.50 ppmv (menores al mes de noviembre) para finalmente en la región sur, concentraciones entre 3.50 ppmv y 3.90 ppmv (condiciones menores al mes pasado). Cabe resaltar que concentraciones mayores, 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 la disminución de las concentraciones de ozono sobre nuestras latitudes, específicamente sobre nuestro país, han sido los vientos mayormente del este, 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, en gran parte del mes, pero con una mayor cobertura espacial y temporal. Los factores que determinaron el registro de estas concentraciones bajas fueron del tipo térmico, humedad y viento.
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 diciembre, se caracterizó por registrar valores menores al mes pasado (propios de su climatología), pero por encima de sus valores climáticos debido al inicio de la estación de verano en el hemisferio austral, así como a la poca concentración de ozono atmosférico
9. Debido a que diciembre es considerado como un mes donde 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 prácticamente en todas ellas se ha continuado registrando un enfriamiento ligero, con excepción de la capa de 100 hPa donde se registró un ligero calentamiento, probablemente a una ligera disminución en las concentraciones de vapor de agua.
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 febrero 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

