Diciembre 2023
vol. 12

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

Senamhi
SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

PERÚ Ministerio del Ambiente

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.

En los últimos tiempos, debido aún a la emisión de sustancias agotadoras de ozono es que en algunas regiones en el mundo se registra una disminución en la concentración de ozono, el cual altera el balance de radiación con lo que traería posibles consecuencias en el clima mundial.

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 (CO_2) (gas de efecto invernadero) y carbono negro (hollín).

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

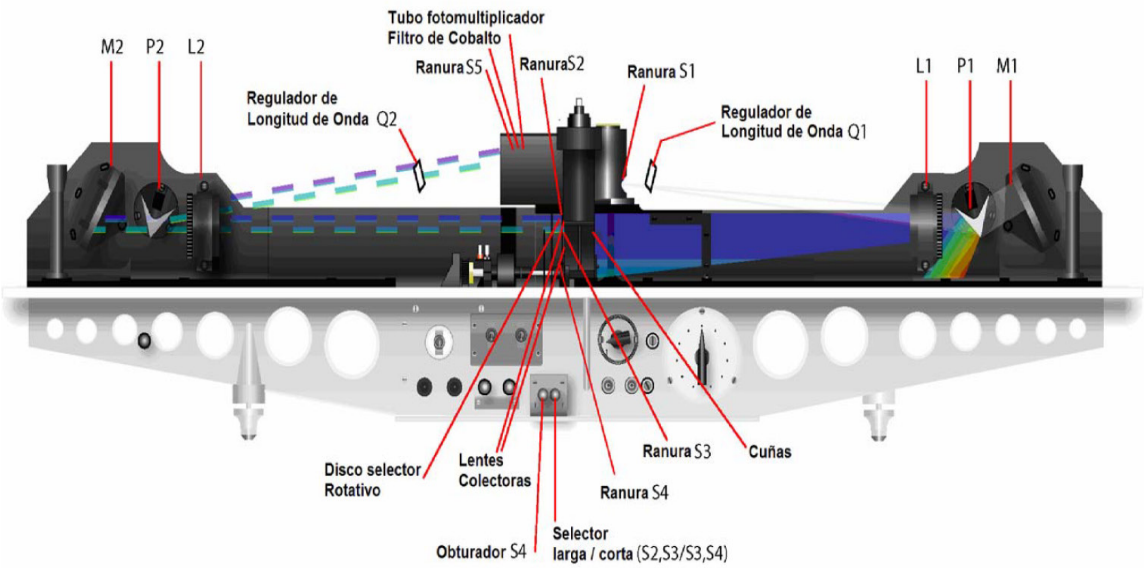
1.- MEDICION EN SUPERFICIE

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

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

FIGURA N° 1

Funcionamiento del Espectrofotómetro Dobson



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

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

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

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

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

2.- MEDICION DESDE SATÉLITE

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

El mes de diciembre continúa presentado características térmicas cada vez menores comparados al mes pasado, en la estratósfera baja de la región tropical, trayendo como consecuencia la disminución de las concentraciones de ozono en nuestro país, de acuerdo a la información generada en superficie. Se han registrado mayormente vientos del este en la estratósfera baja de esta parte de la región, aportando pocas cantidades de ozono atmosférico. En el caso de la alta tropósfera, los sistemas atmosféricos que gobiernan el tiempo sobre nuestro país, se han ido estableciendo en forma paulatina, producto del inicio de la estación de verano. Cabe mencionar que se continua con la presencia del periodo cálido denominado Fenómeno El Niño Costero sobre el Pacífico oriental y central de América del Sur, pero con menor intensidad permitiendo aún, que las temperaturas sigan registrando valores por encima de sus normales afectando la convección húmeda. Estos procesos, aunados a otros, llegan a tener incidencia en las propiedades físicas de la baja estratósfera permitiendo obtener valores de ozono atmosférico menores al mes pasado.

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 procesos que involucran el inicio de la estación de verano, interactúan entre sí en las diferentes capas de la atmósfera. Siendo así, se analiza la capa de 70 hPa (día 15 de diciembre) dado de que es representativa de la baja estratósfera. A lo largo del mes, climáticamente, las concentraciones de ozono disminuyen en esta parte del continente debido a la aparición de flujos de viento zonal negativo. En el presente año durante la primera semana del mes los vientos fueron variables dado de que se tuvieron flujos del oeste, así como del noreste y noroeste, pero con una intensidad baja, mientras que, a partir de la segunda semana hasta la cuarta, los flujos fueron del este aportando cantidades bajas de ozono sobre

nuestras latitudes permitiendo que el espectrofotómetro Dobson registre menos ozono comparado al mes de noviembre.

Por otro lado, en latitudes medias, del hemisferio sur, la circulación de vientos ha sido mayormente zonal (a nivel de 70 hPa), con formación de sistemas anticiclónicos de mayor persistencia los cuales incidieron en el ingreso de masas de aire hacia latitudes bajas, permitiendo que los flujos de viento zonal negativo aporten menos concentraciones de ozono sobre nuestro país (menor relación de mezcla).

En cuanto al régimen térmico podemos señalar lo siguiente: continúa el efecto de la disminución de la temperatura en niveles bajos de la estratósfera (100 hPa, 70 hPa, 50 hPa, 30 hPa, 10 hPa, 5 hPa y 1 hPa) en el corredor de 20°N-20°S, por debajo de sus valores climáticos. En el caso de Perú, se debe remarcar que, de acuerdo a la información climática de superficie, las concentraciones de ozono en este mes disminuyen reforzando lo ocurrido en la estratósfera baja (70 hPa) con vientos zonales negativos. Figura 2.

Con el fin de reforzar lo descrito a nivel de baja estratósfera, podemos mencionar que, de la vigilancia realizada en el mes de diciembre a nivel de superficie, en el Observadorio de Vigilancia Atmosférica (OVA) Marcapomacocha se observó que el comportamiento horario de la concentración de ozono atmosférico en general, estuvo oscilando entre 237.0 UD y 249.6 UD (UD = Unidades Dobson), valores menores si se analizan en forma diaria, mientras que a nivel promedio mensual también fue menor a lo registrado en el mes de noviembre.

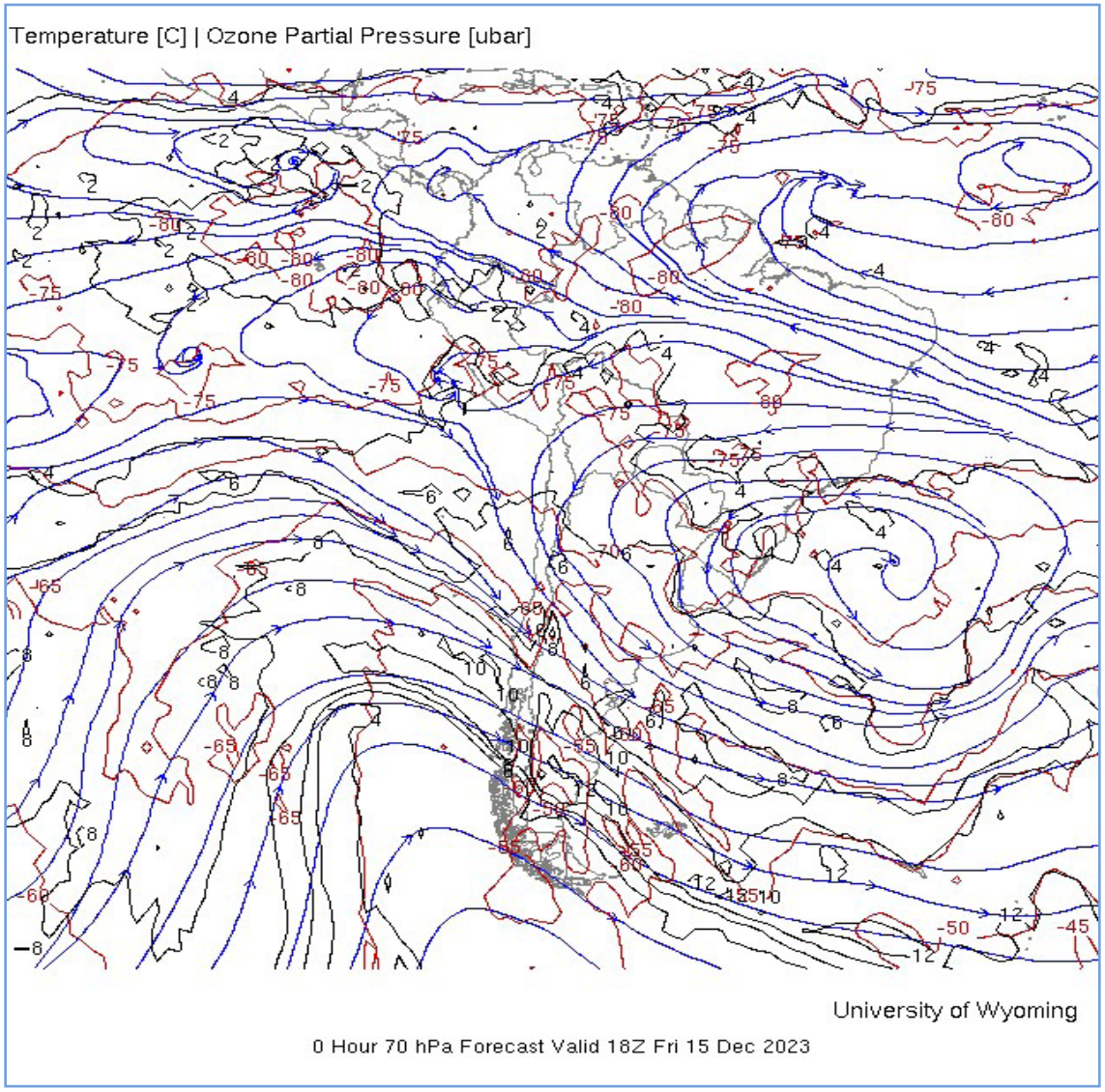
Se debe mencionar que en las primeras horas del día las concentraciones de ozono son relativamente altas debido al ozono acumulado en horas de la noche y a medida que transcurren las horas hasta llegar al mediodía los valores empiezan a disminuir para luego en horas de la tarde volver a incrementarse.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

Este proceso físico, se enmarca en que durante las primeras horas de la mañana la incidencia de la radiación ultravioleta es baja, por ende las concentraciones de ozono son relativamente altas (debido al ozono residual), a medida que la intensidad de la radiación ultravioleta se incrementa en forma paulatina hacia el mediodía, donde los valores son altos (en los meses de primavera y verano son mayores), permite una reducción del ozono y en horas de la tarde a medida que el sol va llegando al ocaso (disminución de la intensidad de la radiación solar) las concentraciones de ozono vuelven a incrementarse. Este comportamiento horario también va a depender de otros factores como los ambientales (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 ascenso, en algunas regiones se mantuvieron similares y en otras disminuyeron debido al efecto de la cobertura nubosa y la cantidad de aerosoles en la atmósfera. Se espera que en el mes siguiente dichos valores de radiación, sigan incrementándose y el ozono más bien, continúe disminuyendo.

FIGURA N° 2

Flujos de masas de aires zonales



En cuanto al comportamiento de la concentración de ozono atmosférico promedio diario mensual multianual (2000-2020) del mes de diciembre oscila entre 239.9 UD y 249.5 UD aproximadamente (Figura 3), mientras que

los medidos en el mes de diciembre del presente año, oscilaron entre 239.0 UD y 248.1 UD.

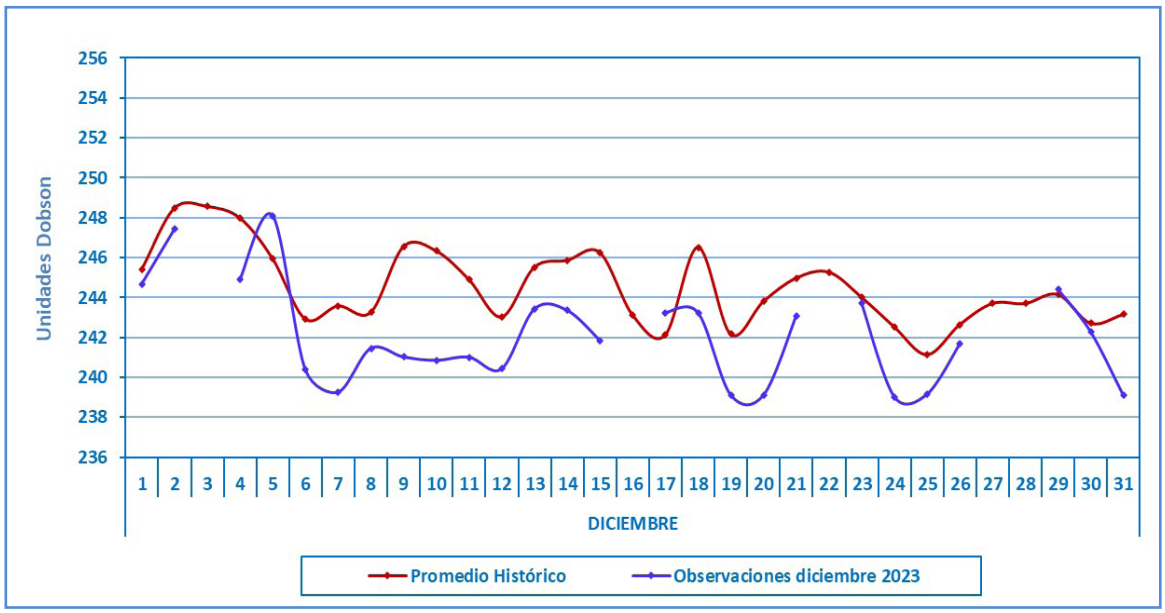
En la figura se aprecia que los valores registrados en el presente mes, estuvieron un 88% por debajo de sus valores climáticos, mientras que un 12% por encima.

Cuando se comparan ambas series se ha observado un comportamiento variable, con valores que en algunos momentos se acercan a sus normales y en otros más bien alejándose (por debajo mayormente), lo cual puede atribuirse a los procesos tanto físicos como químicos, así como a los cambios en la circulación atmosférica (vientos del este), ahora mucho más por el Fenómeno El Niño Costero y probablemente 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 teniendo 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 menores en forma diaria, así como también a nivel de promedio mensual.

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 diciembre, en las capas bajas, medias y altas de la estratósfera las temperaturas siguen por debajo de sus valores normales (como ya se mencionó anteriormente), lo cual redunda en concentraciones bajas de ozono tal como se ha registrado en el mes de diciembre.

FIGURA N° 3

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



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 242.1 UD inferior en 2.6 UD al promedio mensual multianual (244.7 UD).

Se debe tener presente que, en la región tropical durante los meses del verano austral, vale decir enero hasta marzo, las concentraciones de ozono continúan disminuyendo en enero para luego a partir del mes de febrero incrementar hasta el mes de marzo, debido a la circulación de masas de aire al nivel de baja estratósfera, así como también por efectos térmicos y fotoquímicos. Por otro lado, la circulación de los vientos, a nivel vertical, desde la tropósfera hacia la estratósfera permite el traslado de cantidades de ozono los cuales a lo largo de los meses lo van redistribuyendo hacia latitudes mayores (Circulación Brewer-Dobson), lo cual permite el déficit de ozono atmosférico en latitudes bajas (mucho más en los meses de mayo-junio). Cabe remarcar que esta circulación está conducida por ondas atmosféricas lo cual puede ser acelerada por el cambio climático repercutiendo en la distribución global de las concentraciones de ozono. En el mes de diciembre, no ocurrió este proceso, sino que más bien se vio alterada por masas de aire provenientes del este en latitudes bajas de la estratósfera baja.

Debido al proceso de calentamiento en la tropósfera por efecto de El Niño que se viene presentando (aunque cada vez con menor intensidad), es importante mencionar los flujos verticales por advecciones húmedas los cuales permiten también el traslado de vapor de agua hacia la alta tropósfera pudiendo llegar inclusive hasta la estratósfera, modificando las concentraciones de ozono atmosférico en la región.

Al igual que la información de superficie, lo que proviene de los satélites es muy importante ante la falta de cobertura por parte de los primeros. En ese sentido, al realizar la comparación de los datos de ozono atmosférico provenientes de los satélites AURA (Plataforma OMI) y SUOMI (Plataforma OMPS) con lo registrado en superficie, continúa observándose un desfase entre ellos. Con respecto a la información proveniente del AURA/OMI, durante el 64% 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 que durante el 88% de días del mes estuvieron por encima de lo registrado en superficie. Figura 4.

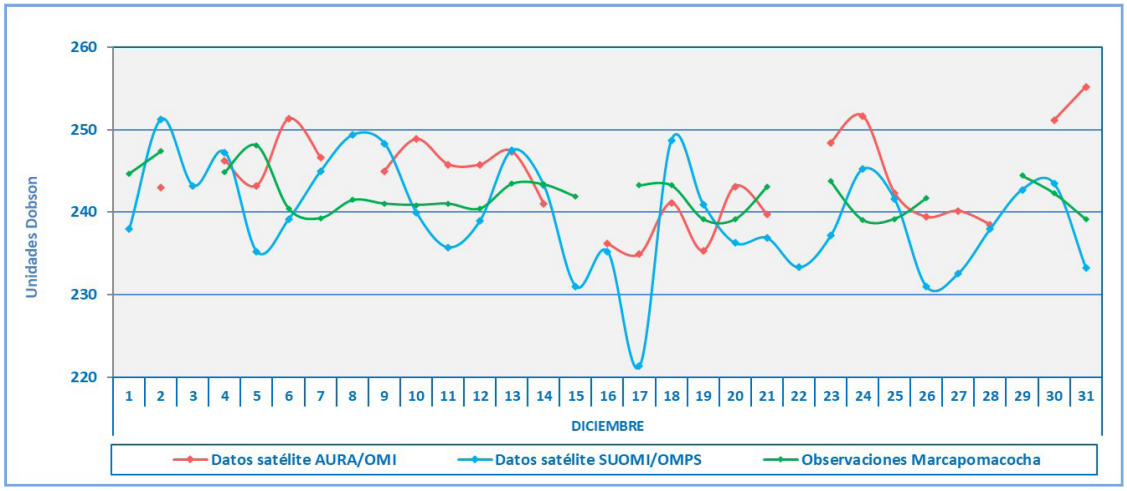
De este análisis podemos decir que la información proveniente de estos dos satélites es variable, pero a veces fuera de los márgenes de lo que registra la estación de superficie (como lo ocurrido en este mes). Existen días donde las diferencias entre los valores registrados por el satélite y el medido en superficie, son bastante altas en el orden de 1 a 22 UD.

Cabe mencionar, que la tendencia de las concentraciones de ozono medidos en superficie ha presentado una disminución en el tiempo, mientras que los medidos con los satélites, también presentan esa tendencia, pero no tan marcada.

El pronóstico, de acuerdo a la climatología, es que las concentraciones de ozono deben de disminuir en el mes de enero, salvo algunos procesos que puedan revertir esta aseveración como lo ocurrido en el mes de noviembre.

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

Debemos saber que, 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 aumentaron, mucho más, los usos de las sustancias agotadoras de ozono, así como los sustitutos, también ha sido 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 estos procesos el evento cálido que se viene registrando a nivel global, en el presente año, debido al Fenómeno de El Niño Costero, los cuales tienen cierta repercusión en el flujo de vientos verticales de tropósfera a estratósfera.

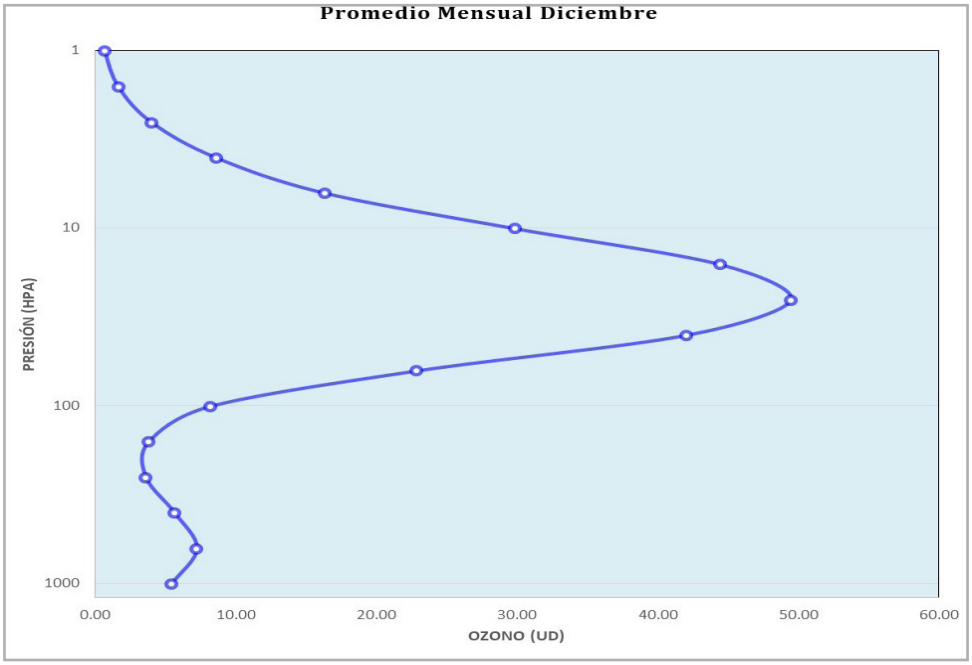
Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial), desde el año 2000 hasta el 2020 se han observado por medio de mediciones del perfil vertical de la atmósfera y el desarrollo de modelos numéricos, una disminución en las concentraciones de ozono (~2% por década) en la estratósfera baja de la región tropical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

Teniendo en cuenta lo descrito líneas arriba y de acuerdo a la figura 5 se ha podido observar el comportamiento típico del perfil vertical de ozono para el mes de diciembre en la estación 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 aumento de la temperatura. En la estratósfera alta empiezan a disminuir en forma paulatina. El gráfico presentado es para remarcar que las mayores concentraciones de ozono se registran en esta segunda capa de la atmósfera. Se observa que las concentraciones de ozono son ligeramente menores a lo observado en el mes pasado, de acuerdo al perfil mostrado. Las concentraciones mayores la encontramos en la media estratósfera con valores entre 42 UD a 47 UD (valores menores al mes anterior).

FIGURA N° 5

Perfil vertical de ozono atmosférico



Según información de perfil vertical de ozono atmosférico para un día típico del mes de diciembre (día 17) 2023 obtenida por Metop-C/GOME-2, muestra para el hemisferio norte concentraciones bajas, cuyos valores han oscilado entre 12 UD y 22 UD (menores al mes pasado) entre la baja y alta estratósfera (el área de cobertura latitudinal de estas concentraciones bajas se dio entre 15N°-70°N). Cabe resaltar que desde el 21 de diciembre dicho hemisferio pasa a la estación de invierno, registrándose concentraciones bajas de ozono en latitudes bajas y parte de latitudes medias, debido a que el régimen de temperatura continúa disminuyendo en la atmósfera alta. 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.

La altura de las concentraciones de ozono (19 UD a 22 UD), en latitudes bajas (de ambos hemisferios), se registra entre los 40 hPa y 10 hPa, mientras que, en latitudes medias del hemisferio sur, la altura de las concentraciones de ozono se dio entre los 100 hPa y 20 hPa con valores entre 12 UD a 20 UD. Finalmente, en latitudes altas la altura de las altas concentraciones, se dio entre 200 hPa y 20 hPa con valores entre 18 UD y 30 UD. La desaparición del vórtice polar permite que las concentraciones de ozono se incrementen.

Para el caso de nuestro país, concentraciones altas se han registrado entre los 40 hPa y 10 hPa con valores entre 20 UD y 23 UD.

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.

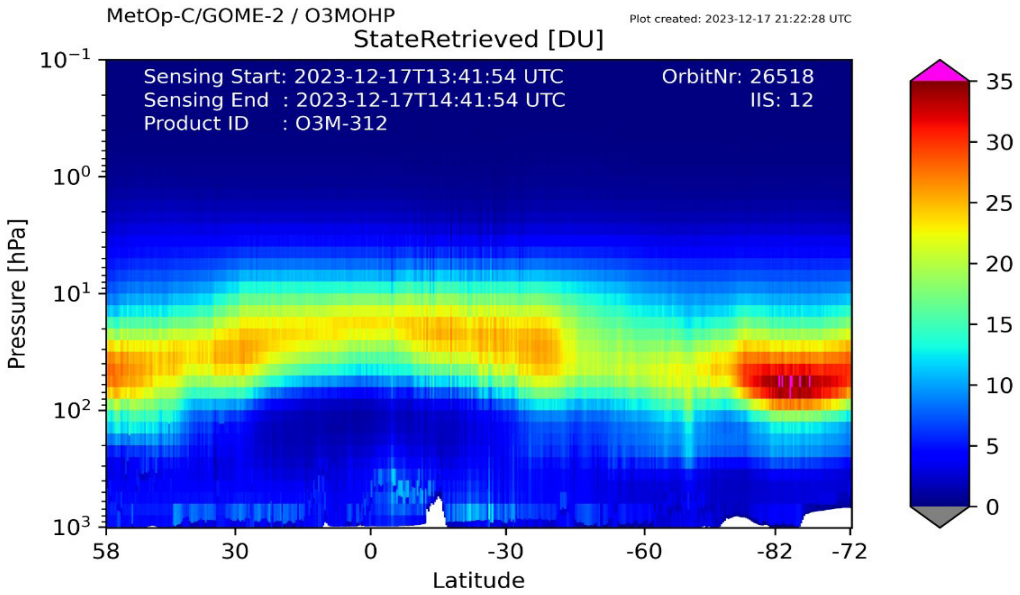
Debe considerarse que la forma que adquiere la distribución vertical es típica en la atmósfera, sabiendo que las concentraciones pueden variar de acuerdo a la latitud, estación astronómica, condiciones meteorológicas, así como al efecto que tienen los gases de efecto invernadero, especialmente en la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

Entre los 45°N y 70°N las concentraciones fueron mayores con valores entre 14 UD y 23 UD a una altura entre 80 hPa y 20 hPa, debido a procesos de circulación atmosférica, de radiación y estacionalidad), características que son debidas a la baja densidad del aire en esa parte de la atmósfera como producto de las bajas temperaturas (debido a condiciones propias de la

estación de invierno). Las reacciones fotoquímicas tienden a ser nulas debido a la exigua cantidad de insolación que llega en dicho lugar.

FIGURA N° 6

Perfil Vertical de Ozono según GOME-2



RELACIÓN DE MEZCLA DEL OZONO

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

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

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

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

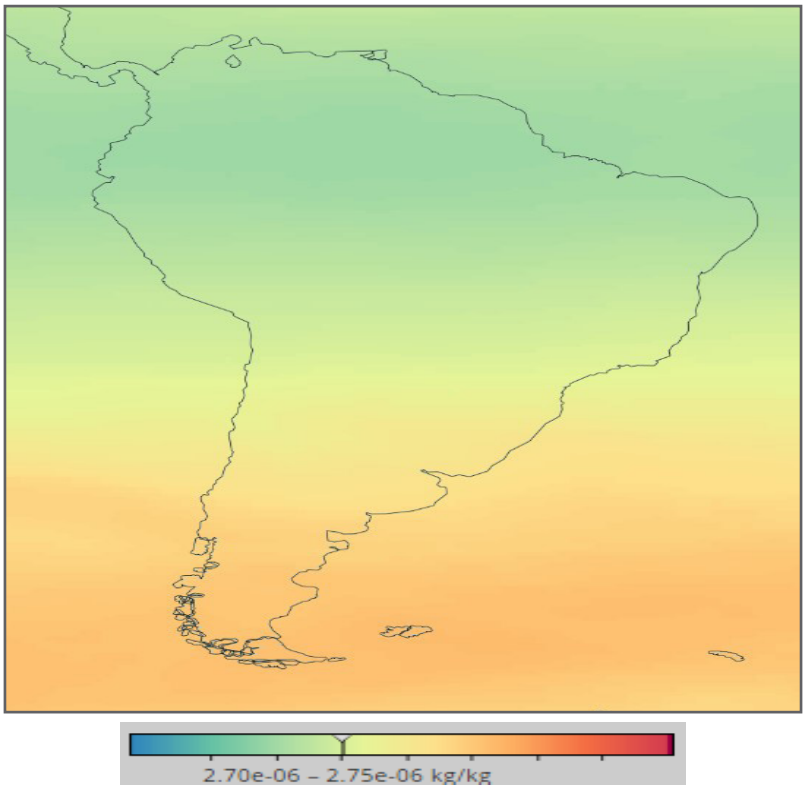
La figura 7 muestra justamente tal comportamiento mensual (diciembre) de la relación de mezcla de ozono para Sudamérica. Para el caso específico de

Perú, en la costa norte se observaron valores entre 2.05e-06 a 2.10e-06 kg/kg, mientras que en la sierra norte la mezcla registró valores entre 2.00e-06 a 2.05e-06 kg/kg. Asimismo, en la costa central los valores de relación de mezcla oscilaron entre 2.30e-06 a 2.35e-06 kg/kg. En la sierra central oscilaron entre 2.25e-06 a 2.30e-06 kg/kg. Finalmente, en la costa sur los valores oscilaron entre 2.55e-06 a 2.60e-06 kg/kg, mientras que en la sierra sur valores entre 2.50e-06 a 2.55e-06 kg/kg. En la región de la selva estos valores oscilaron entre 2.00e-06 a 2.40e-06. Los valores de mezcla en nuestro país, se redujeron con respecto al mes pasado, debido a la circulación atmosférica en niveles bajos y medios de la estratósfera con dirección zonal negativa. Los valores mostrados nos brindan una idea, del escaso aporte de ozono sobre nuestras latitudes). Se recalca que en este mes en la región tropical las concentraciones de ozono disminuyen debido a lo mencionado anteriormente. En latitudes medias, mas bien las concentraciones de ozono son mayores.

En países como Chile, Argentina, Uruguay y Paraguay, la relación de mezcla osciló entre 3.10e-06 y 4.25e-06 kg/kg. Finalmente, en la región antártica la mezcla osciló entre 3.20e-06 a 3.40e-06 kg/kg (valores relativamente altos debido a la desaparición del vórtice polar). La mezcla se incrementó debido a procesos de circulación atmosférica a nivel de 50 hPa ayudados por la circulación Brewer-Dobson y la Oscilación Quasi Bienal, así como al incremento de la temperatura.

FIGURA N° 7

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



VAPOR DE AGUA

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

Se debe 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 SO_2 (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 los meses o años, aunque ya hay indicios en el adelanto o retraso de la aparición del vórtice polar.

Tanto el vapor de agua como los aerosoles permiten la reflexión de la radiación solar directa al espacio, si estos existieran en cantidades considerables permitiría un enfriamiento en la superficie de la tierra.

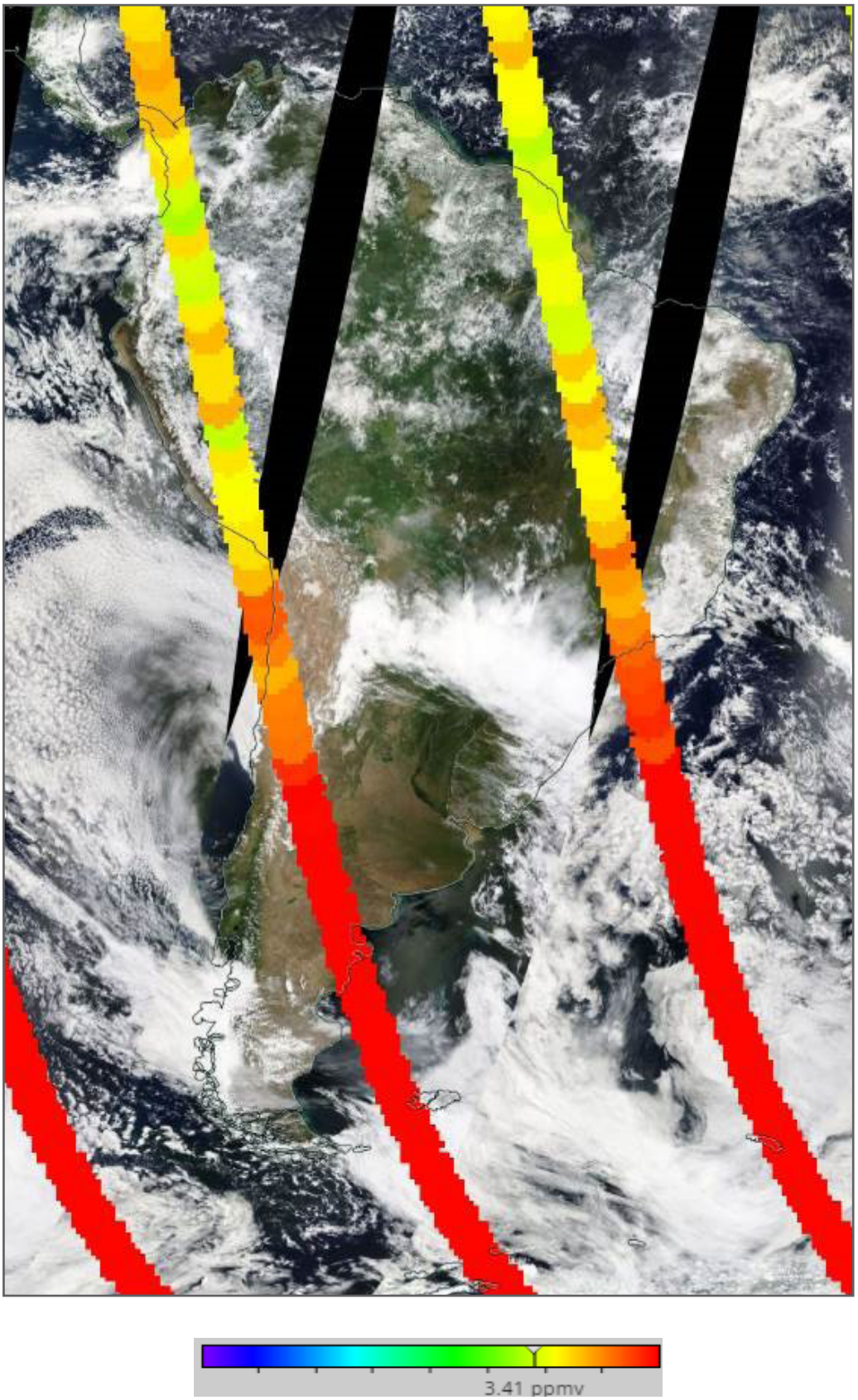
El vapor de agua genera calentamiento en la estratósfera y esto permitiría un cambio en las concentraciones de ozono y por ende su impacto a nivel de tropósfera.

Hay que recalcar que a nivel global se viene registrando un periodo cálido (aunque cada vez con menor intensidad) conocido como Fenómeno El Niño Costero, los cuales podrían inyectar (por procesos de advección húmeda) vapor de agua hacia niveles bajos de la estratósfera, lo cual podría tener una injerencia en las concentraciones de ozono.

En la figura 8 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 (10 diciembre 2023). En ella se puede notar sobre Perú, concentraciones de vapor de agua relativamente moderadas. Por ejemplo, en el sur del país las concentraciones oscilaron entre 3.85 ppmv a 4.00 ppmv, mientras que en la sierra central valores entre 3.70 ppmv y 3.89 ppmv. En el lado de la región andina norte, concentraciones entre 3.85 ppmv y 4.14 ppmv. En la región de la costa norte se registraron concentraciones de vapor de agua entre 3.63 ppmv y 3.70 ppmv, mientras que en el centro entre 3.70 ppmv y 3.90 ppmv. Estas condiciones aunadas a los de circulación en ese nivel estarían permitiendo un ligero descenso en las concentraciones de ozono atmosférico.

FIGURA N° 8

Vapor de Agua a 46 hPa



COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO SOBRE EL PERÚ

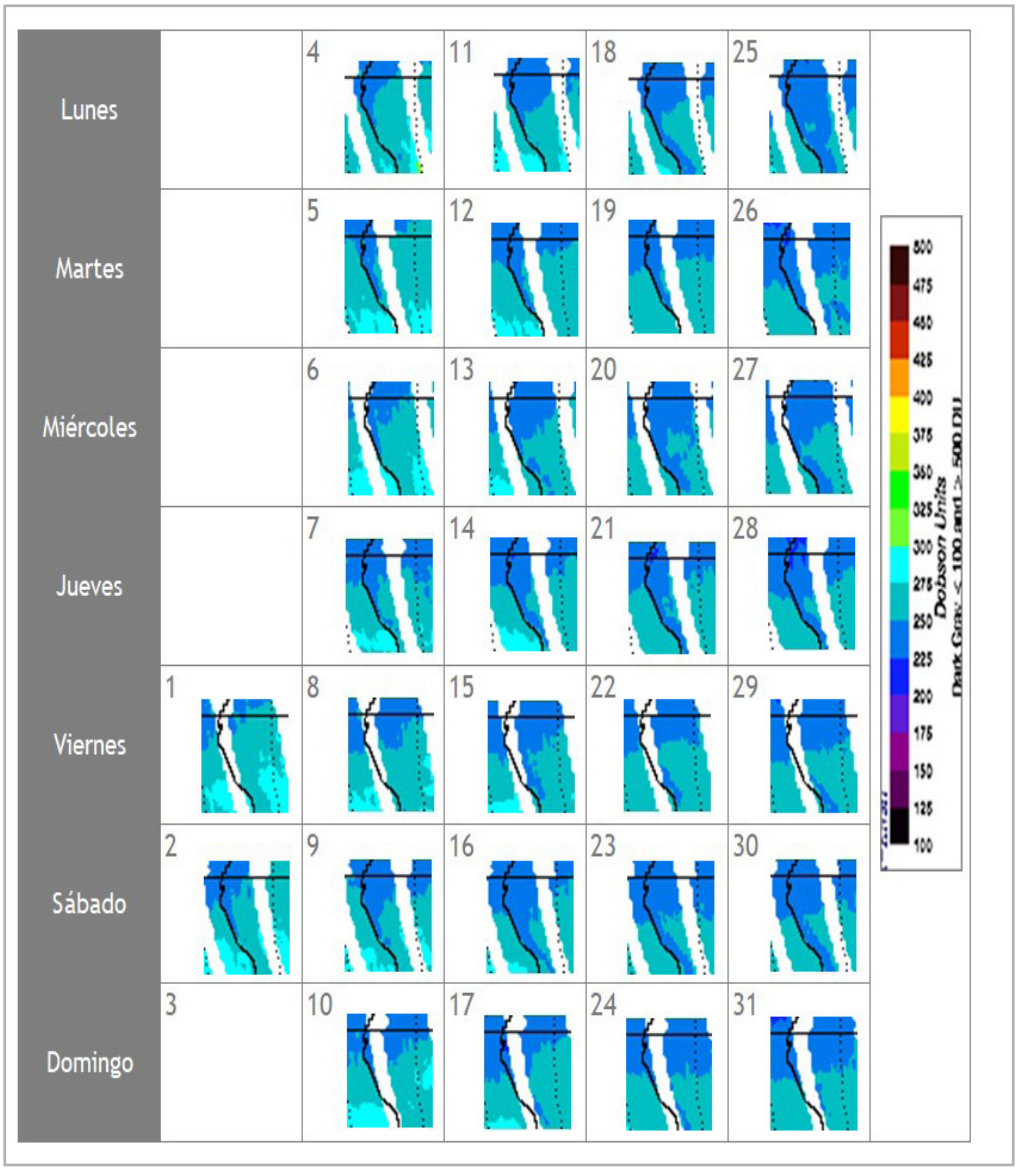
En cuanto al análisis de los mapas en forma diaria provenientes de la plataforma OMI del satélite AURA de la National Aeronautics and Space Administration – NASA (Figura 9), podemos mencionar que, para el caso de nuestro país, las concentraciones de ozono atmosférico, que muestra el mapa, fueron menores a lo registrado en el mes de noviembre, debido al poco aporte de ozono sobre nuestras latitudes. Nuevamente, por el lado del Pacífico se volvió a registrar concentraciones de ozono mucho mayores entre 275 UD y 300 UD, especialmente frente a las costas de Moquegua y Tacna, así como frente a la costa central. En todo el mes, sobre nuestro país, las concentraciones de ozono oscilaron entre 225 UD y 275 UD, mayormente. Las menores concentraciones se dieron generalmente en toda la región norte y central con valores entre 225 UD y 250 UD.

Cabe remarcar que entre el 01 al 08 de diciembre se registraron concentraciones bajas de ozono, tanto en la costa norte como central, con valores que oscilaron entre 225 UD y 250 UD, mientras que en otras regiones del país fluctuaron entre 250 UD a 275 UD. Por otro lado, del día 09 al 31 de diciembre las concentraciones bajas aumentaron en todo el país. La cobertura en área fue mayor. Se observó una mayor continuidad de bajas concentraciones en la región norte (225 UD y 250 UD). Finalmente, en la selva central y sur se registraron altas concentraciones con valores entre 250 UD y 275 UD. Conviene señalar que no hubo ingresos continuos de masas de aire con ozono desde latitudes bajas del hemisferio norte hacia el hemisferio austral, traduciéndose en una disminución en las concentraciones de ozono en el corredor tropical.

Es importante mencionar que, en el mes de diciembre, climatológicamente, se registran menores concentraciones de ozono, traduciéndose en altos niveles de radiación ultravioleta aunados estos a otros factores meteorológicos y ambientales.

FIGURA N° 9

Mapa diario del ozono total atmosférico para el mes de diciembre 2023



TEMPERATURA EN LA BAJA ESTRATOSFERA

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

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

estacionalidad y la circulación atmosférica, 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 del año 2023 (enero a diciembre), al nivel de 70 hPa y entre las latitudes 25°S – 25°N.

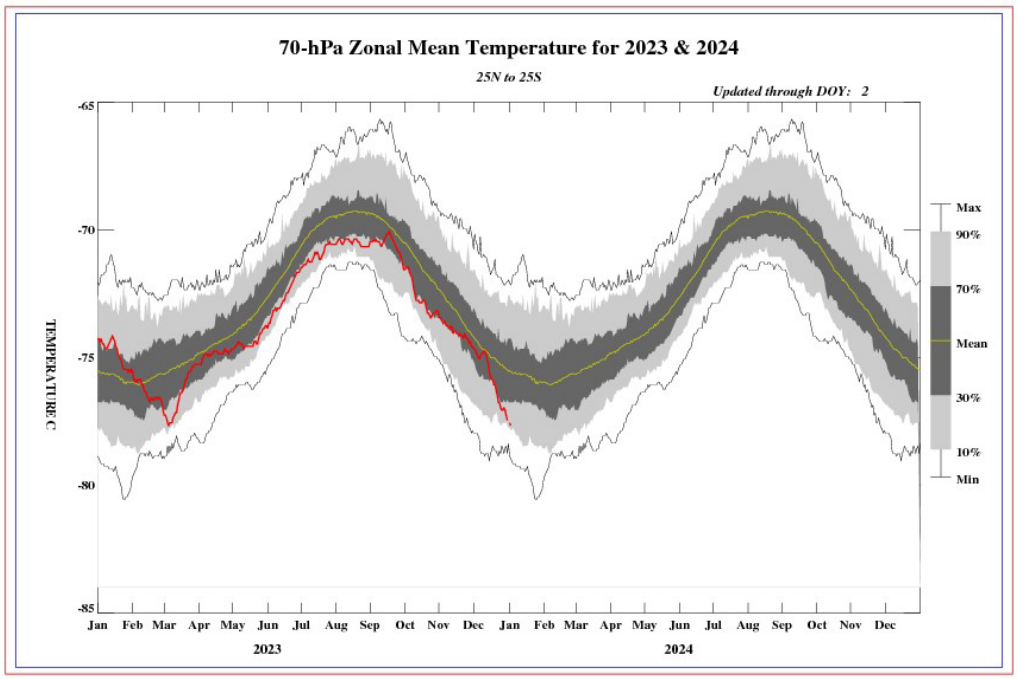
Durante los días de registro, la temperatura en ese nivel (línea de color rojo), ha mostrado una tendencia a alejarse de sus valores climáticos (pero siempre con temperaturas hacia la baja), tal como se puede apreciar en la figura, permitiendo un mayor "enfriamiento" del aire, incluso muy por debajo de sus valores normales o climáticos. Debido al comportamiento térmico del aire en ese nivel, las concentraciones de ozono lograron registrar menores valores al mes anterior. Cabe destacar que, durante el mes de diciembre, las temperaturas, observadas en todas las capas de la estratósfera continúan persistiendo por debajo de sus valores normales, pero todas, con tendencia a la disminución (caídas bruscas en la tendencia).

La variabilidad de la concentración de ozono en ese nivel (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 posible impacto que tuviera la concentración de vapor de agua debido a la erupción del volcán submarino Hunga Tonga en enero del 2022. Por otro lado, hay que destacar el impacto que tiene la emisión de sustancias agotadoras de ozono (elementos substitutos) 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 -75.5°C, mayor en valor numérico al mes pasado, pero físicamente menor. La temperatura calculada en este mes, fue de -76.8°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 242.1 UD, menor en 3.9°C al mes anterior.

FIGURA N° 10

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



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

Por otro lado, 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 11 en donde se aprecia que las temperaturas, específicamente, en el continente Antártico han registrado un valor promedio de -55°C, debido a condiciones propias del mes (mayor calentamiento). Las temperaturas en dicho continente paulatinamente mostrarán incrementos debido a la desaparición del vórtice polar y aumento en las concentraciones de ozono.

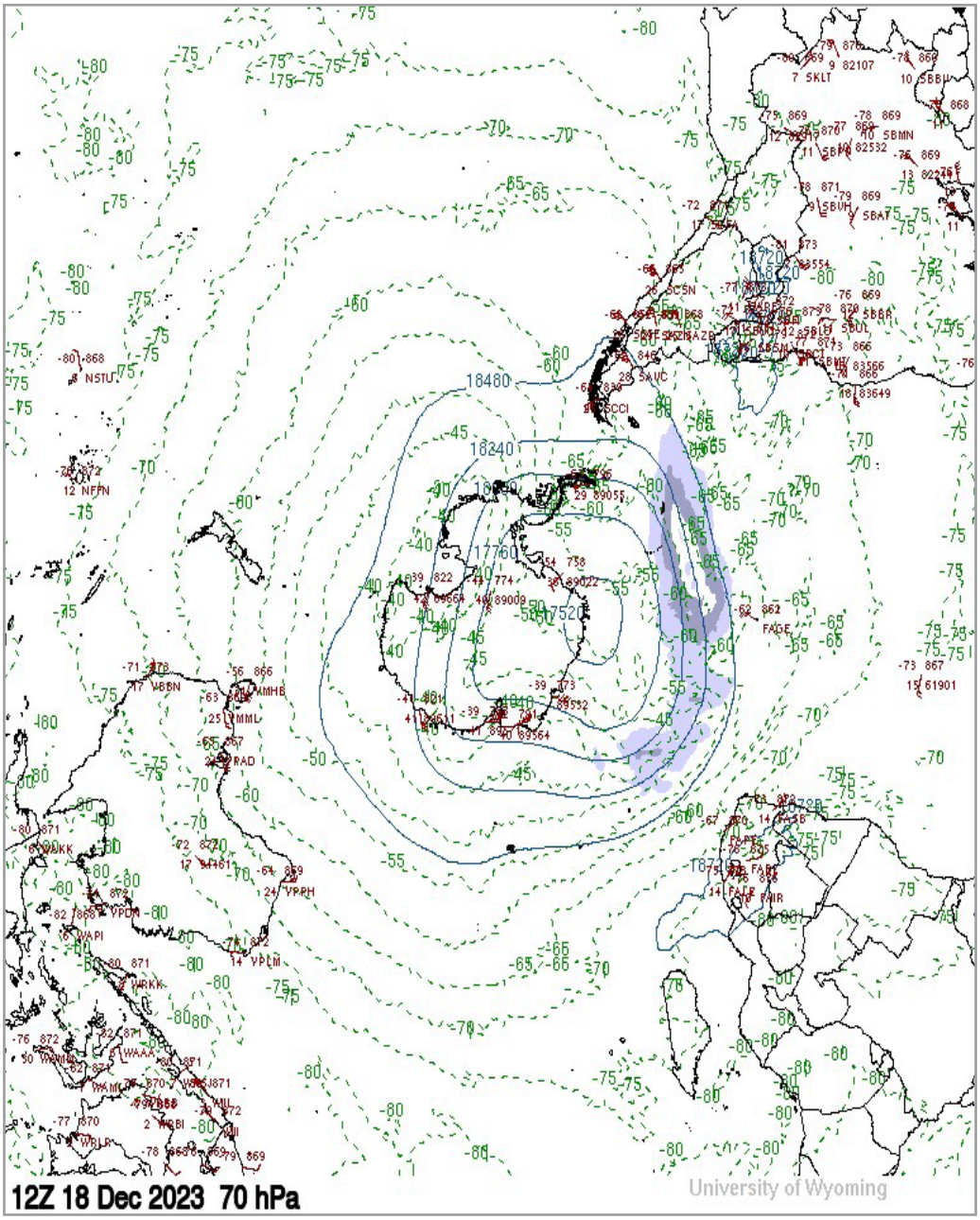
Cabe remarcar que la posición de la tierra con respecto al sol (inclinación con respecto al plano ecuatorial) juega un papel importante en los procesos físico-químicos de la atmósfera. Asimismo, es importante señalar que aparte del factor astronómico, una disminución de la temperatura en ese nivel de 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, media y alta estratósfera), como se ha mencionado anteriormente, han registrado valores muy por debajo de sus normales climáticas, permitiendo un incremento en los niveles de radiación UV.

Para el caso de nuestro país las temperaturas a este nivel han registrado un valor de -78°C (más frío), siendo uno de los factores para que las concentraciones de ozono atmosférico continúen con una tendencia a la disminución, aunados a circulaciones de viento con escaso aporte de ozono (vientos zonales negativos).

FIGURA N° 11

Comportamiento de la temperatura en 70 hPa para el hemisferio sur (18 diciembre 2023)



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) continúan disminuyendo durante el año. En el presente mes el valor registrado fue de 242.1 UD como valor promedio. Esta disminución tuvo como causa, el escaso aporte de ozono por parte de masas de aire cuyo flujo fue mayormente zonal negativo.

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 248.1 UD, también menores al mes pasado. Esta variabilidad, ha sido explicado por el párrafo anterior, pero también se le suma a ello, el impacto del periodo cálido a nivel global del Fenómeno El Niño, el cual repercute en la circulación de los vientos, así como en la transferencia radiativa aunado al posible impacto del vapor de agua emitido por el volcán submarino Hunga Tonga.en el Pacífico.

3. Con respecto a la distribución vertical del ozono, en el OVA Marcapomacocha, según información obtenida por el Metop-C/ GOME-2, durante un día típico del mes de diciembre, se puede concluir que la máxima concentración de la misma, en la región tropical, se registró entre los 40 hPa y los 10 hPa (media y alta estratósfera) con valores que oscilaron entre 19 UD y 22 UD (menor al mes anterior), mientras que en latitudes medias del hemisferio sur, la altura de las máximas concentraciones se dio entre los 100 hPa y 20 hPa con valores entre 12 UD y 20 UD mientras que en latitudes altas la altura de las concentraciones altas se dio entre 200 hPa y 20 hPa con valores entre 18 UD y 30 UD. Esta disminución de debió a la circulación de masas de aire con escaso aporte de ozono provenientes del este.

4. El registro de concentraciones de ozono atmosférico en latitudes medias del hemisferio norte, fueron ligeramente menores al mes pasado con valores entre 12 UD a 22 UD, entre la baja y media estratósfera. Procesos físicos de la estación de invierno en dicho hemisferio y otros como la circulación Brewer-Dobson, permiten registrar concentraciones menores aunados a la escasa reacciones fotoquímicas en la estratósfera baja y a circulaciones de viento en esa capa de la atmósfera.

5. En lo que respecta a la relación de mezcla se puede concluir que sobre nuestras latitudes, fue bastante baja debido a la presencia de circulación de vientos zonales negativos, los cuales no permitieron

que se registrara una buena mezcla de ozono permitiendo que sus concentraciones disminuyeran.

6. Por otro lado, la concentración de vapor de agua que se pueda tener en la estratósfera es importante para el balance radiativo de la atmósfera, así como para la variabilidad en el comportamiento del ozono. Sobre nuestro país, al nivel de 46 hPa, se observó concentraciones relativamente altas en la sierra sur (valor promedio 3.65 ppmv), mientras que en la sierra central fue de 3.80 ppmv (mayor al mes de noviembre) para finalmente en la sierra norte, concentraciones de 4.05 ppmv (valor promedio). Dichas concentraciones pueden afectar el comportamiento espacial y temporal del ozono atmosférico.

7. Los mapas de ozono total atmosférico (provenientes de la plataforma OMI del satélite AURA de la National Aeronautics and Space Administration – NASA), muestran el comportamiento de ozono, en todo el país, similares al mes pasado con valores que oscilaron entre 225 UD y 275 UD, pero con la particularidad: de que el área de la cobertura con concentraciones bajas, se amplió, especialmente en la región norte del país (225 UD y 250 UD). Estos valores corresponden a la variabilidad climática de la estación, mientras que en otras partes del país las concentraciones de ozono fueron mayores atribuidos a la circulación de los vientos.

8. En lo que concierne al comportamiento del régimen térmico en la baja estratósfera (70 hPa) se puede mencionar que, durante el mes de diciembre, los valores se caracterizaron por una disminución (-76.8°C), lo cual trajo como consecuencia la disminución de las concentraciones de ozono.

9. Debido a que diciembre es considerado como un mes donde los niveles de radiación solar continúan en ascenso debido al inicio de la estación del verano austral, trae como consecuencia, que los procesos físicos-químicos especialmente en la estratósfera sean cada vez más dinámicos, permitiendo que se presenten circulaciones de vientos en latitudes bajas y medias de dirección este, permitiendo el escaso aporte de ozono atmosférico hacia nuestro país.

10. El periodo cálido que se viene registrando a nivel global por efecto del Fenómeno El Niño Costero, continúa influyendo en los procesos atmosféricos tanto a nivel de tropósfera como estratósfera permitiendo cierta variabilidad en las concentraciones de ozono atmosférico.

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

Dirección de Meteorología y evaluación Ambiental Atmosférica:
ng. Vannia Aliaga Nestares
valiaga@senamhi.gob.pe

Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico:
Ing. Jhojan Rojas Quincho
jprojas@senamhi.gob.pe

Análisis y Redacción:
Ing. Orlando Ccora Tuya occora@senamhi.gob.pe
Bach. Juan Tacza Ordoñez
Tco. Rosalinda Aguirre Almeyda
Tco. Julia Astudillo Capcha

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

Próxima actualización: 15 de febrero de 2024

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:

PERÚ Ministerio del Ambiente