



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



Dirección de Meteorología y
Evaluación Ambiental
Atmosférica
Subdirección de Evaluación del
Ambiente Atmosférico

Monitoreo de la atmósfera en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica Marcapomacocha

Enero – Marzo 2025



PRESENTACIÓN

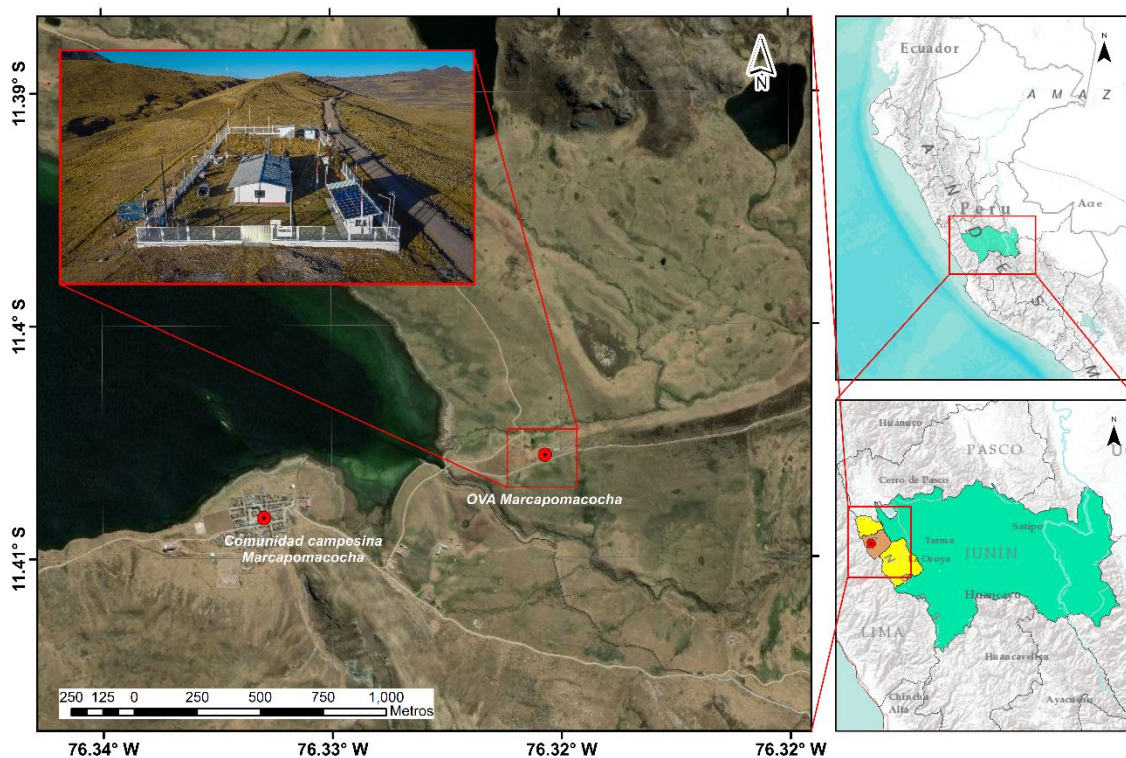
El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) a través de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico (SEA) de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica (DMA) publica el boletín trimestral de Monitoreo de la Atmósfera en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica Marcapomacocha (OVA Marcapomacocha) con la finalidad de informar a las autoridades, agricultores, profesionales y población en general sobre el comportamiento de las variables meteorológicas, así como, de las propiedades físicas y la composición química de la atmósfera en la sierra central del Perú durante el primer trimestre del 2025.

OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCHA

El Observatorio de Vigilancia Atmosférica Marcapomacocha (OVA Marcapomacocha), se encuentra ubicado políticamente en el departamento de Junín, provincia de Yauli y distrito de Marcapomacocha, asimismo, geográficamente se ubica en las coordenadas 11.4044°S, 76.3250°W y a una altitud de 4443 m s.n.m. (ver Figura N° 1).

En el OVA Marcapomacocha, se cuenta con una Estación Meteorológica Automática (EMA) que registra la temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar global y vientos. Por otro lado, el OVA Marcapomacocha forma parte de la red de estaciones del programa de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y es del tipo regional¹. Actualmente, cuenta con las seis (06) áreas focales que estudia el programa VAG, las cuales son: Ozono, Gases Reactivos, Gases de Efecto Invernadero, Deposición Atmosférica Total, Radiación Ultravioleta y Aerosoles.

Figura N° 1 Mapa de ubicación del OVA Marcapomacocha



¹ GAW Regional station in WMO Region III - South America: (<https://gawis.meteoswiss.ch/GAWIS/#/search/station/stationReportDetails/0-20008-0-MPO>)

I. ANÁLISIS SINÓPTICO

En enero², en niveles altos, predominó la presencia de la Alta de Bolivia (AB) con núcleo sobre Bolivia (en los 17°S y 65°W aproximadamente) y con una configuración mayormente zonal, asociada a la Vaguada al Noreste de Brasil (VNB), aportando inestabilidad sobre Brasil, Venezuela, Colombia y Perú, principalmente. Asimismo, desde los 10°N hasta los 10°S y a partir de los 15°S hacia latitudes mayores predominan vientos del oeste con componente zonal dominante (a partir de los 30°S), asociados a ondas ubicadas entre los 10°N a 10°S, 15°S a 35°S y entre los 35°S a 60°S (Ver Figura N° 2a). En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante desde los 28°S hacia latitudes mayores, asociados a una onda poco configurada (el cual se reflejó desde niveles altos) que presentó una vaguada de onda corta al sur de Brasil. También dominaron dos flujos anticiclónicos, uno configurado sobre el océano Pacífico (sin núcleo definido) y otro al este de Brasil (que se extendió desde el océano Atlántico). Estos sistemas favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad cercana al 70% hacia el Perú, norte de Bolivia, Brasil y sur de Colombia (Ver Figura N° 2d).

En febrero³, en niveles altos, predominó la presencia de la Alta de Bolivia (AB) con núcleo sobre Bolivia (en los 22°S y 73°W aproximadamente) y con una configuración mayormente meridional, asociada a una débil Vaguada al Noreste de Brasil (VNB), aportando inestabilidad sobre Brasil, Venezuela, Colombia, Perú y Bolivia, principalmente. Asimismo, desde los 10°N hacia el sur predominaron vientos del oeste, con componente zonal dominante a partir de los 30°S, asociados a ondas ubicadas entre los 25°S a 35°S y entre los 35°S a 60°S (Ver Figura N° 2b). En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante desde los 30°S hacia latitudes mayores, asociados a una onda poco configurada (el cual se reflejó desde niveles altos) que presentó una vaguada de onda corta entre el sur de Brasil y Uruguay. También dominaron dos flujos anticiclónicos, uno configurado sobre el océano Pacífico (con núcleo en 25°S y 80°W) y otro al este de Brasil (que se extendió desde el océano Atlántico). Estos sistemas favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad cercana al 80% hacia el Perú, norte de Bolivia, Brasil, sur de Colombia y Ecuador. (Ver Figura N° 2e).

Durante marzo⁴, en niveles altos, predominó la presencia de la Alta de Bolivia (AB) con núcleo sobre Bolivia (en los 15°S y 72°W aproximadamente) y con una configuración mayormente zonal, asociada a una débil Vaguada al Noreste de Brasil (VNB), aportando inestabilidad sobre Brasil, Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú, principalmente. Asimismo, desde los 10°N hacia los 10°S predominaron vientos del este; a partir de los 20°S hacia el sur prevalecieron vientos del oeste con componente zonal dominante, asociado a una onda débil ubicada entre los 25°S a 55°S (Ver Figura N° 2c). En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante desde los 25°S hacia latitudes mayores, asociados a una onda poco configurada (el cual se reflejó desde niveles altos) que presentó una vaguada de onda corta sobre el centro-norte de Chile y Argentina. También dominaron dos flujos anticiclónicos, uno configurado sobre el océano Pacífico (con núcleo no definido) y otro al este de Brasil (que se extendió desde el océano Atlántico). Estos sistemas

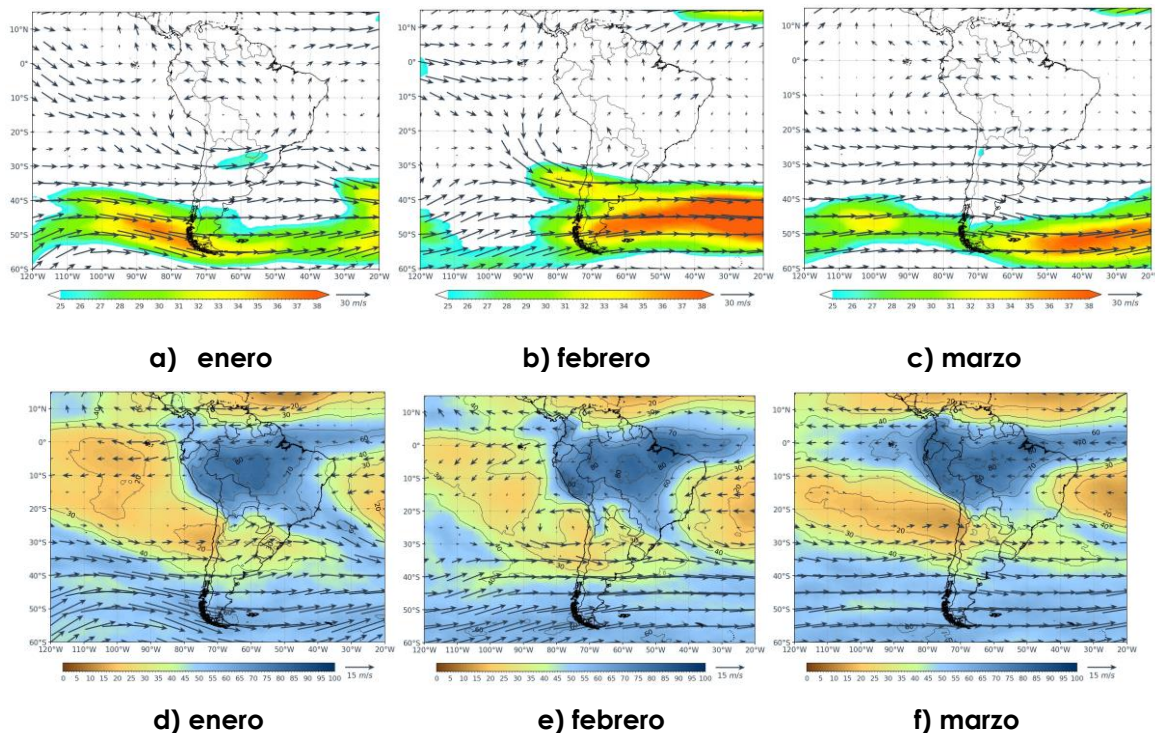
² VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, ENERO: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-119.pdf>

³ VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, FEBRERO: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-120.pdf>

⁴ VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, MARZO: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-121.pdf>

favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad cercana al 80% hacia el Perú, Brasil, Colombia y Ecuador. (Ver Figura N° 2f).

Figura N° 2 Campos de viento en niveles altos de la atmósfera 250 hPa por mes (a, b y c) y Campos de humedad relativa y vientos en niveles medios de la atmósfera 500hPa por mes (d, e y f).



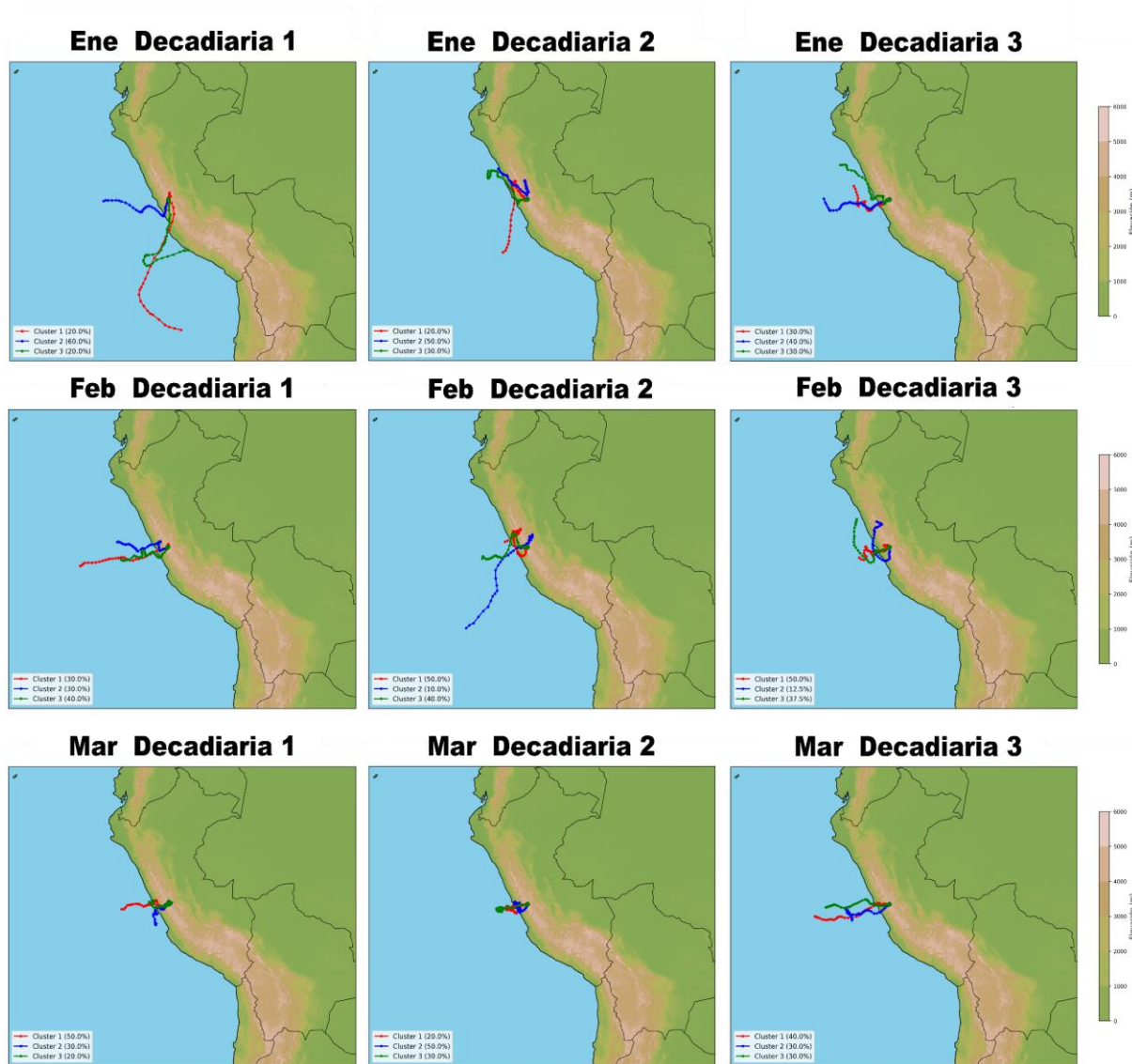
II. ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS

Con fines de analizar la predominancia de las masas de aire que llegan al OVA Marcapomacocha, se estimaron retror trayectorias con el modelo Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPPLIT) y para lo cual se utilizó datos de reanálisis. Dichas retror trayectorias para 500h Pa se analizaron por decadiarias mediante la estimación de clústeres o agrupamientos, donde la primera decadiaria del mes corresponde desde el día 1 al 10, la segunda decadiaria corresponde desde el día 11 al 20 y la tercera corresponde desde el día 21 hasta último día de cada mes.

Para la primera decadiaria del mes de enero se observó que predominaron masas de aire provenientes del oeste (O), con origen principalmente marítimo; para la segunda decadiaria el trayecto de dichas masas de aire fue ligeramente más corto donde se tuvo vientos de dirección noroeste principalmente de continente y para la tercera decadiaria se presentaron masas de aire del oeste y del noroeste, principalmente del mar. En cuanto a febrero, la primera decadiaria evidenció una predominancia de masas de aire de dirección oeste (O), de carácter mayormente marítimo, la segunda decadiaria se origina principalmente en la zona continental al noroeste y en la tercera decadiaria, el trayecto presentó un desplazamiento más corto desde el oeste y noroeste, concentrándose sobre la costa de Lima y Ancash. Finalmente, en marzo se apreció una configuración homogénea del patrón de vientos, con predominancia de masas de aire del oeste (O) en las tres

decadarias evaluadas, siendo particularmente más cortas de las dos primeras decadarias y la tercera presenta un recorrido más largo.

Figura N° 3 Clúster de retro trayectorias por cada decadaria y mes del primer trimestre del 2025



III. MONITOREO METEOROLÓGICO LOCAL

A partir de los datos de la Estación Meteorológica Automática del OVA Marcapomacocha, se llevó a cabo un análisis de la temperatura del aire (°C), humedad relativa (%), precipitación (mm), radiación solar (W/m²), intensidad (m/s) y dirección (°) de vientos durante el primer trimestre del año 2025.

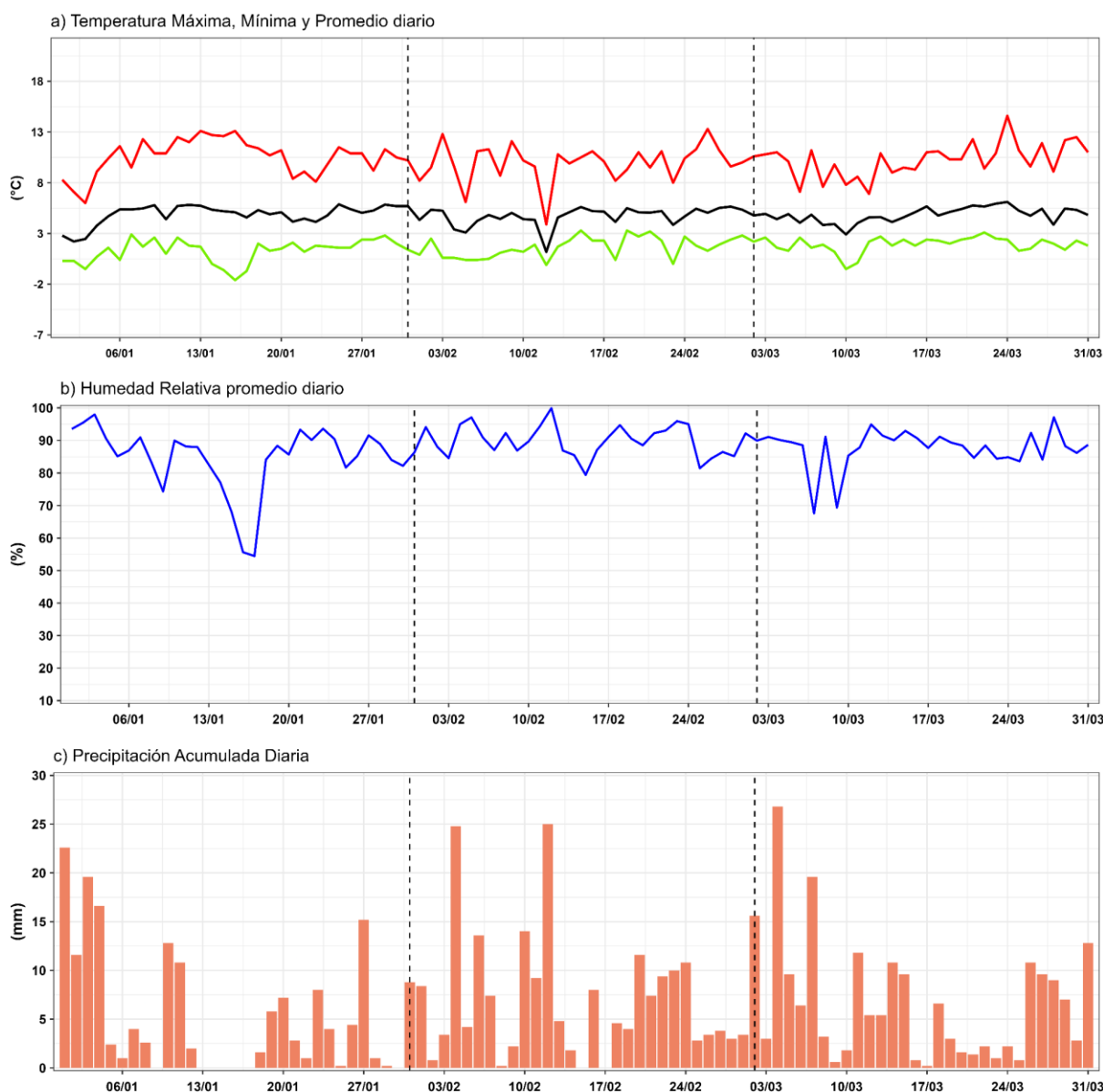
En enero, la temperatura máxima promedio del aire fue de 10.5°C, mientras que la mínima promedio fue de 1.2°C. En febrero, se registró una temperatura máxima promedio de 9.9°C

y una mínima promedio de 1.6°C. Para marzo, la temperatura máxima promedio fue de 10.2°C, mientras que la mínima promedio subió a 1.6°C (Figura N°4a).

En cuanto a la humedad relativa promedio diario, en enero se alcanzó una máxima de 98%, una mínima de 54.5% y un promedio mensual de 84.8%. En febrero, se registró una máxima de 100%, una mínima de 79.4% y un promedio mensual de 89.9%. En marzo, se registró una máxima de 97.1%, una mínima de 67.6% y un promedio mensual de 87.8% (Figura N°4b).

En relación con la precipitación acumulada diaria, en enero se alcanzó un valor máximo de 22.6 mm y un acumulado mensual de 166.2 mm. En febrero, se obtuvo un valor máximo de 25 mm y un acumulado mensual de 199 mm. En marzo, se obtuvo un valor máximo de 26.8 mm y un acumulado mensual de 205 mm (Figura N°4c).

Figura N° 4 Series temporales de la temperatura, humedad relativa y precipitación



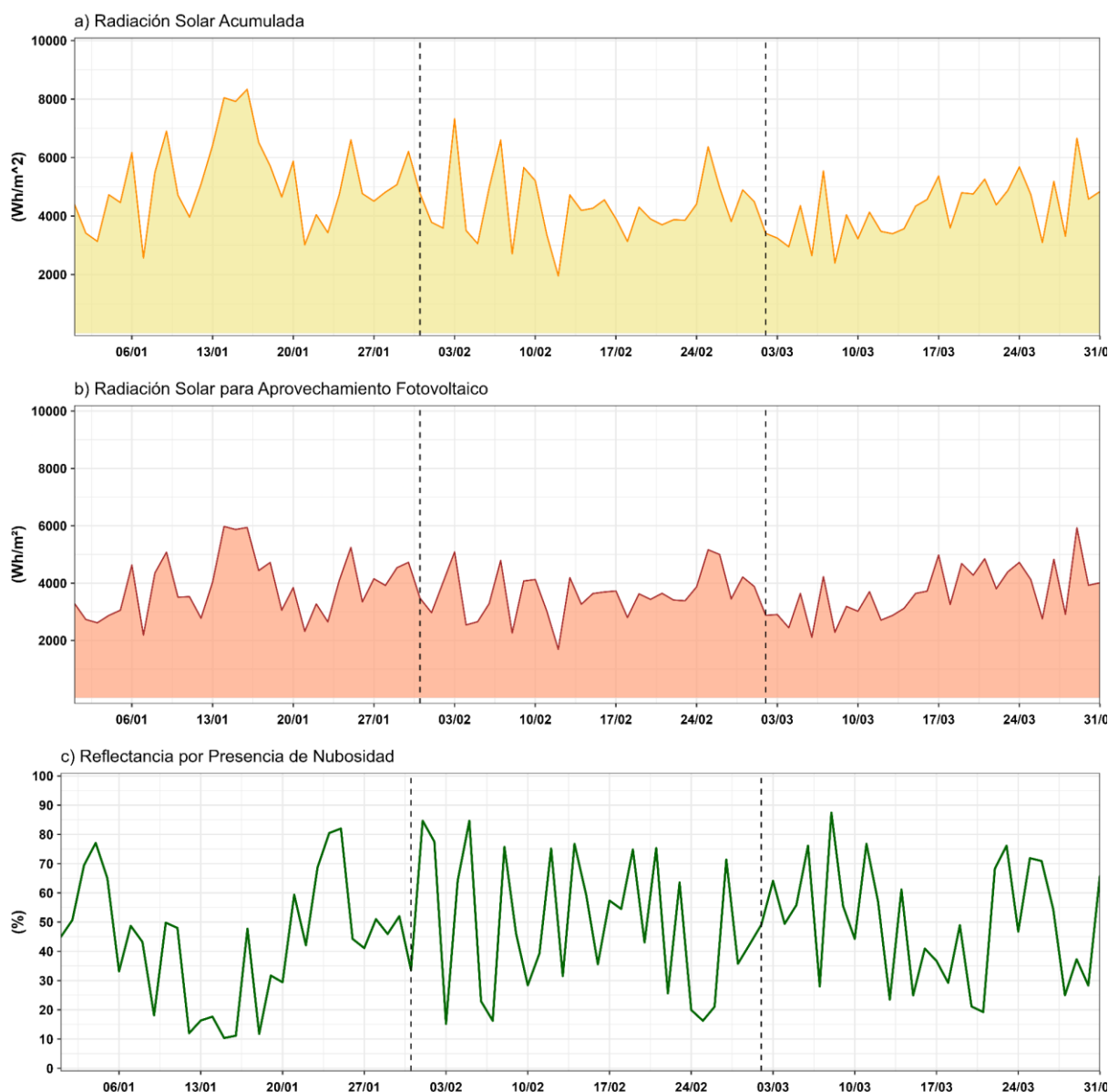
Respecto a la radiación solar global acumulada, en enero se obtuvo una máxima de 8335 W/m² (día 16), mientras que el valor mínimo fue de 2567 W/m² (día 7). Durante febrero, se alcanzó una máxima de 7331 W/m² (día 3), mientras que el valor mínimo fue de 1954 W/m²

alcanzado el día 12. En marzo, se alcanzó una máxima de 6664 W/m² (día 29), mientras que el valor mínimo fue de 2395 W/m² (día 8) (ver Figura N°5a).

Asimismo, respecto a la radiación solar para aprovechamiento fotovoltaico (con una inclinación de 30° al norte), se alcanzó un pico máximo de 5977 W/m² para el 16 de enero. Para febrero, se registró un valor máximo de 5165 W/m² (día 25) y finalmente, en marzo se encontró un valor máximo de 5929 W/m² (día 29) (ver Figura N°5b).

Con respecto a la reflectancia por nubosidad, se observó que durante enero se alcanzó un valor máximo de 82%, registrado el día 25, durante el mes de febrero se alcanzó el valor máximo de 84.5% el día 1, y en marzo se registró el valor más alto alcanzando un 87% el día 8 (ver Figura N°5c).

Figura N° 5 Series temporales de radiación solar y reflectancia por nubosidad



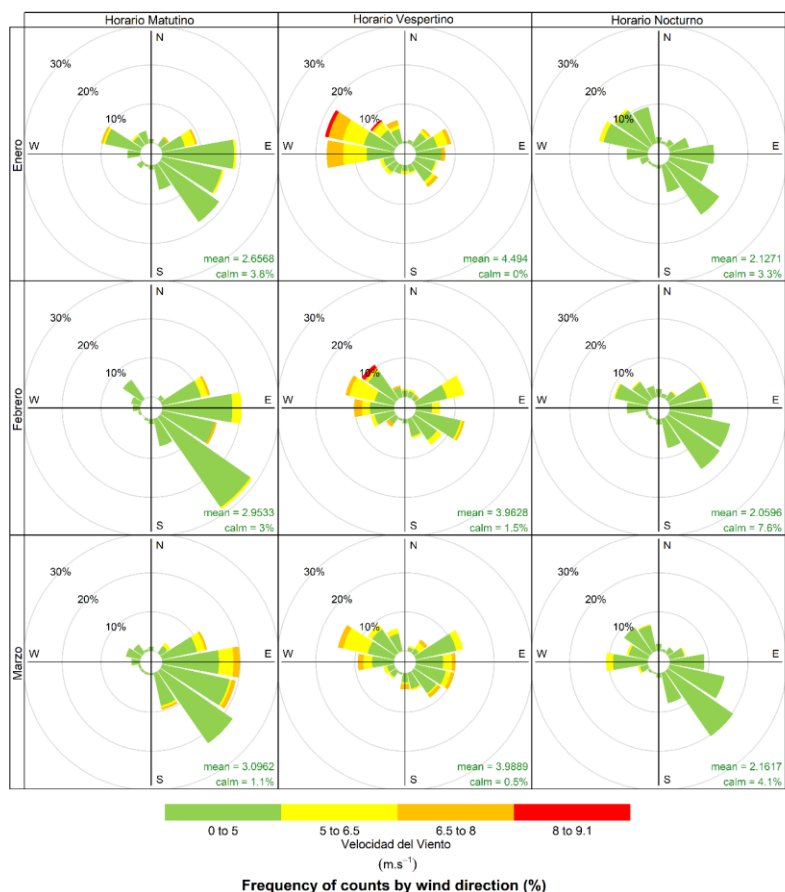
En la Figura N° 6, se observan las rosas de vientos para los horarios matutino (07:00 a 11:59 horas), vespertino (12:00 a 18:59 horas) y nocturno (19:00 a 06:59 horas) de los meses

evaluados, en donde las categorías de la intensidad del viento corresponden a: débiles (0 – 5 m/s), moderados (5 – 6.5 m/s), fuertes (6.5 – 8 m/s) y extremos (>8m/s).

Durante el horario matutino, la dirección del viento predominante fue del este (E) en enero, con intensidad moderada; mientras que en febrero y marzo se tuvo una dirección predominante del sureste (SE) con intensidad moderada. Por otra parte, en el horario vespertino, la dirección predominante fue del oeste noroeste (ONO) en todos los meses, alcanzando la intensidad extrema para enero; mientras que en febrero y marzo se alcanzó la intensidad fuerte. Finalmente, para el horario nocturno, durante todo el trimestre los vientos tuvieron una dirección predominante del sureste (SE), con una intensidad débil.

Cabe resaltar que, el horario vespertino presentó, durante los tres meses de estudio, los vientos con intensidades máximas siendo estos de categoría fuerte y extrema.

Figura N° 6 Rosa de vientos por horario y mes del primer trimestre 2025



IV. MONITOREO DE FOCOS DE CALOR

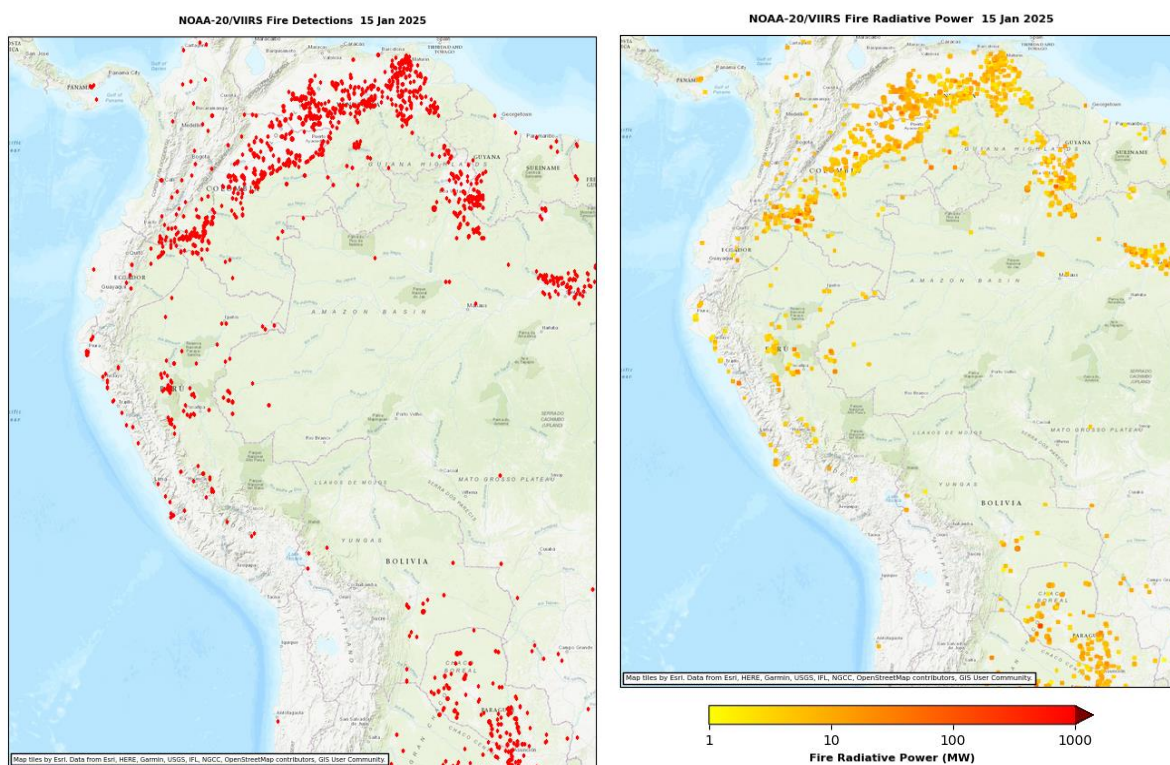
La quema de biomasa (vegetación viva o muerta) que se da durante los incendios en pastizales, bosques y residuos agrícolas constituye una importante fuente de emisiones gaseosas: gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O), gases reactivos (CO, NO₂, NO) e hidrocarburos que actúan como precursores de ozono troposférico, gases que agotan la

capa de ozono como cloruro y bromuro de metilo (CH₃Cl y CH₃Br); así como de material particulado ⁵.

Por ello, es crucial realizar un seguimiento permanente de los focos de calor, no solo a nivel nacional, sino también en toda Sudamérica. Esto se debe a que los sistemas atmosféricos pueden transportar estos contaminantes desde países vecinos. Es así que, utilizando el producto ABI Full Disk (ABI-L2-FDCF) del Geostationary Operational Environmental Satellite-16 (GOES-16)⁶ y el producto VIIRS-AF-Iband-EDR del Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) del Satélite NOAA-20⁷, se realizó el seguimiento de los focos de calor durante el primer trimestre del 2025.

En la Figura N° 7 se presentan los focos de calor y su potencial radiativo de fuego en Sudamérica durante el 15 de enero del 2025, donde se destaca una menor presencia de focos de calor en comparación con el trimestre pasado. En el caso de Perú, se observa la presencia de focos de calor de manera localizada, principalmente en la selva norte. Asimismo, se observó un mayor potencial radiativo en los países vecinos del norte como Colombia y Venezuela.

Figura N° 7 Focos de calor en Sudamérica y su potencial radiativo de fuego (FRP)



Por otro lado, en la Figura N° 8 se muestra una serie temporal de la cantidad diaria de focos de calor en Perú durante el primer trimestre del año. Se puede observar que los mayores valores se presentaron en la segunda decadiaria de enero, alcanzando los 232, 217 y 135

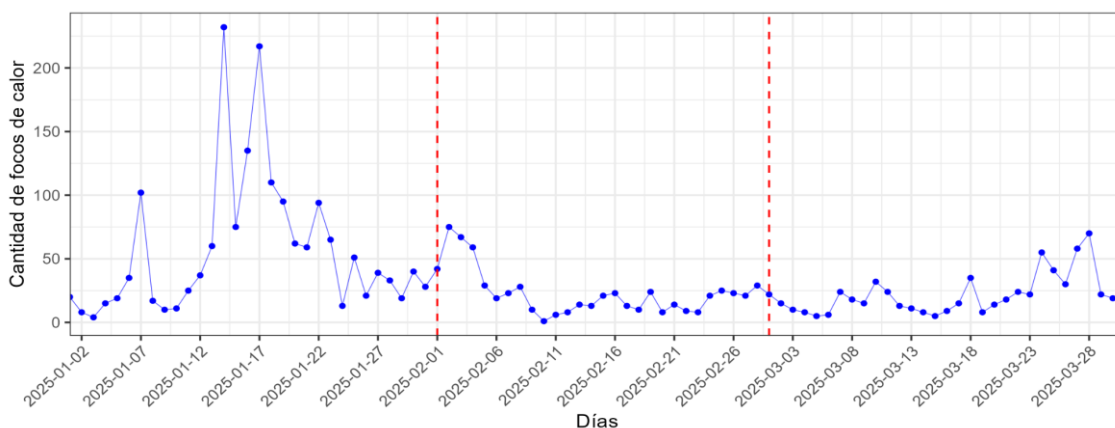
⁵ La quema de biomasa en Sudamérica vista desde el espacio. Obtenido de: https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Canziani/publication/242093033_LA_QUEMA_DE_BIOMASA_EN_SUDAMERICA_VISTA_DESDE_EL_ESPACIO/links/00463528378a684dfd000000/LA-QUEMA-DE-BIOMASA-EN-SUDAMERICA-VISTA-DESDE-EL-ESPACIO.pdf

⁶ Documentación del GOES-16: https://www.star.nesdis.noaa.gov/atmospheric-composition-training/satellite_data.php#abi_documentation

⁷ Datos VIIRS : <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:24hrs;@0,0,0,0,3,0z>

focos de calor los días 14, 17 y 16 de enero, respectivamente. Asimismo, se observa una clara tendencia a la disminución de los focos de calor para los meses de febrero y marzo.

Figura N° 8. Cantidad de focos de calor en el Perú durante el primer trimestre de 2025



V. MONITOREO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA ATMÓSFERA

V.1 ÁREA FOCAL DE OZONO

En el OVA Marcapomacocha, se realiza el monitoreo de la Columna Total de Ozono (CTO), a través del Espectrofotómetro Dobson (Ver Figura N°9).

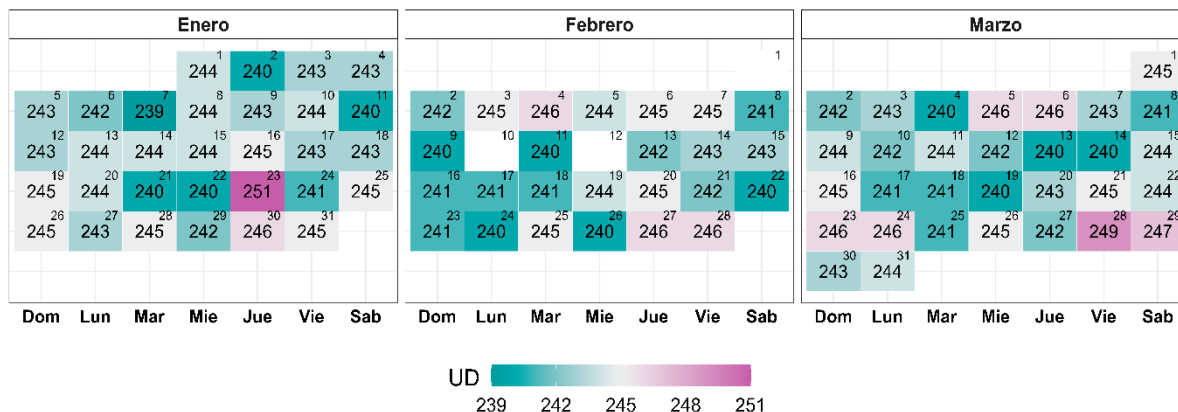
Figura N° 9 Espectrofotómetro Dobson N°087



En la Figura N° 10 se presentan los promedios diarios de la CTO en Unidades Dobson (UD) detallados en un calendario correspondiente al primer trimestre del 2025. De esta manera, en enero se observa que los valores mínimos y máximos de la CTO varían entre 239 UD (día 7) y 251 UD (día 23). Para febrero, los valores oscilaron entre 240 UD (día 9, 11, 22, 24 y 26) y 246 UD (día 4, 27 y 28) y para marzo, entre 240 UD (día 4, 13, 14 y 19) y 249 UD (día 28). En general, los valores de CTO no estuvieron por debajo de 220 UD, por lo que no se observaron eventos de agujeros de ozono sobre el OVA Marcapomacocha. Cabe

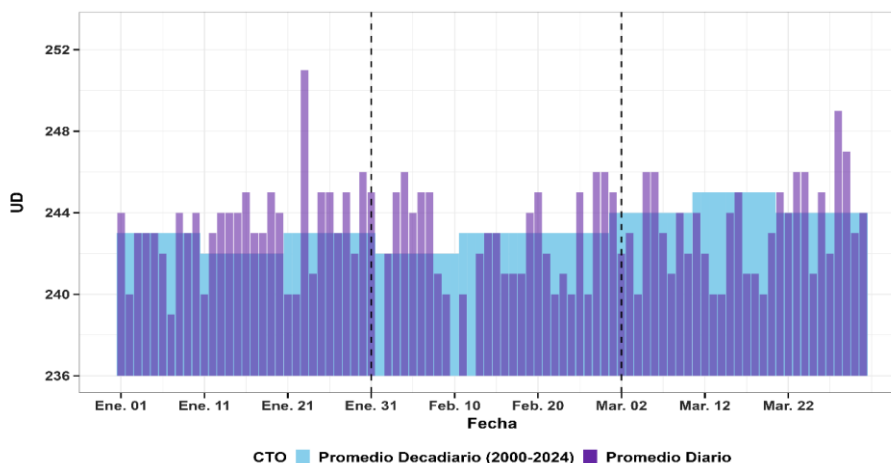
precisar que, los valores de la CTO en el observatorio son usualmente bajos en todas las estaciones del año en comparación con latitudes medias y altas. Un análisis detallado del comportamiento de la CTO se encuentra en los boletines mensuales de vigilancia del ozono atmosférico realizados por el SENAMHI^{8, 9, 10}.

Figura N° 10 Calendario de promedios diarios de la CTO



Asimismo, se realizó una comparación de los valores promedio diarios de la CTO con respecto a los promedios decadiarios del periodo 2000- 2024 (Ver Figura N°11). En ese sentido, se evidencia que la mayoría de los valores diarios estuvieron por encima de su promedio decadiario, a excepción de la segunda decadiaria de diciembre. Con respecto a las excedencias, se evidencia que los mayores incrementos con respecto a la normal decadiaria, se encuentran en la tercer decadiaria de enero (día 23) y la tercer decadiaria de marzo (día 28). En general, se observa una ligera tendencia al incremento hacia el mes de marzo, a pesar de que el valor más alto del trimestre se encuentra en la tercera decadiaria de enero (día 23).

Figura N° 11 Variación de promedios diarios de la CTO



⁸ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCCHA, ENERO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-141.pdf>)

⁹ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCCHA, FEBRERO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-142.pdf>)

¹⁰ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCCHA, MARZO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-144.pdf>)

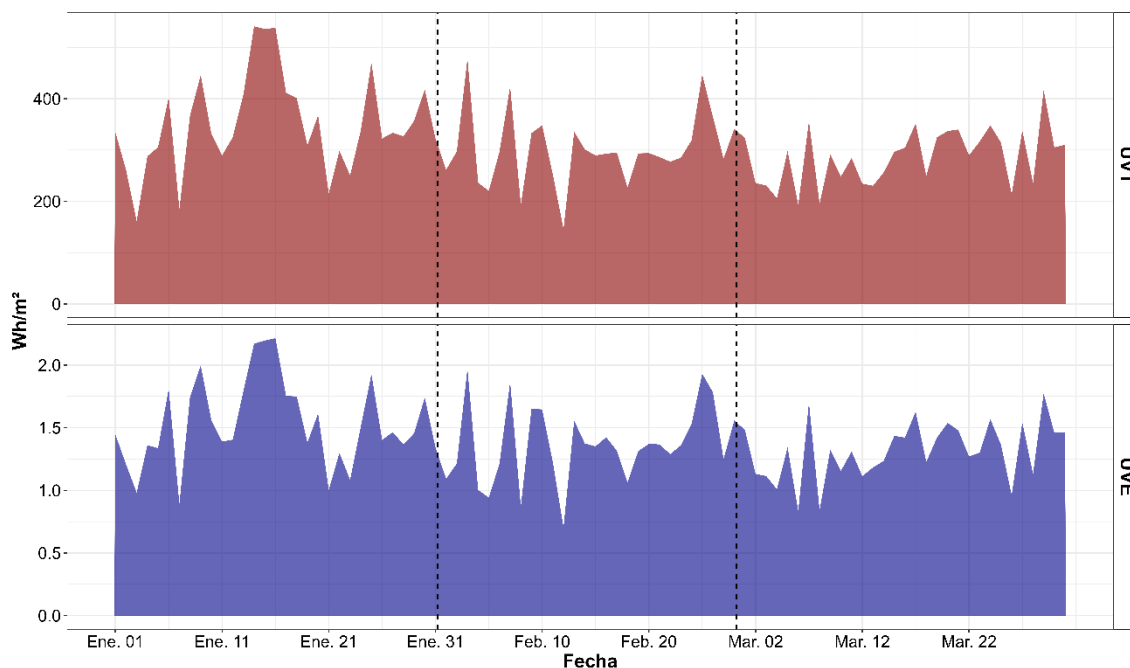
V.2 ÁREA FOCAL DE RADIACIÓN

A. RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

La radiación ultravioleta (UV) se divide en tres bandas principales según la longitud de onda: UVC (100-280 nm), UVB (280-315 nm) y UVA (315-400 nm). La radiación UV que alcanza la superficie terrestre se compone en su mayor parte de radiación UVA con una pequeña parte de radiación UVB; en cambio, la radiación UVC es absorbida en la atmósfera por lo cual no alcanza a la superficie terrestre.¹¹ Por su parte, La radiación ultravioleta eritemática (UVE) es una medida específica de la capacidad de la radiación UV para causar eritema, o enrojecimiento de la piel (quemaduras solares). No toda la radiación UV contribuye igualmente al eritema; la UVB tiene un impacto mucho mayor que la UVA. Por lo tanto, la radiación UVE pondera las diferentes longitudes de onda de la radiación UV según su capacidad para causar eritema.¹²

En la Figura N°12, se muestra la variación de los valores diarios acumulados de la radiación ultravioleta eritemática (UVE) y de la radiación ultravioleta total (UVT) para el primer trimestre de 2025. Durante el mes de enero, se observaron valores acumulados entre 0.9 y 2.2 Wh/m² para el UVE y entre 161.5 y 541.2 Wh/m² para el UVT. Con respecto a febrero, el UVE se encontró entre 0.7 y 1.9 Wh/m² y el UVT entre 145.7 y 478.9 Wh/m². Por su parte, marzo presentó oscilaciones del UVE entre 0.8 y 1.8 Wh/m²; y del UVT entre 192.9 y 417.3 Wh/m². En general, el mayor valor de la UVE y la UVT se encontraron en la segunda decadiaria de enero (día 14 para el UVT y día 16 para el UVE); mientras que, los menores valores de ambas variables se encontraron en la segunda decadiaria de febrero (día 12).

Figura N° 12 Variación de los acumulados diarios de la radiación UVE y UVT



¹¹ Adaptado de Guía Práctica del Índice UV Solar Mundial. Obtenido de: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/d24c554a-aa30-4d9c-a6c0-df67484f7b7e/content>

¹² Adaptado de Nota Técnica N° 002-2016 SENAMHI. Obtenido de: <https://idsep.senamhi.gob.pe/portaldesep/files/tematica/pronostico/indiceuv/indiceuv.pdf>

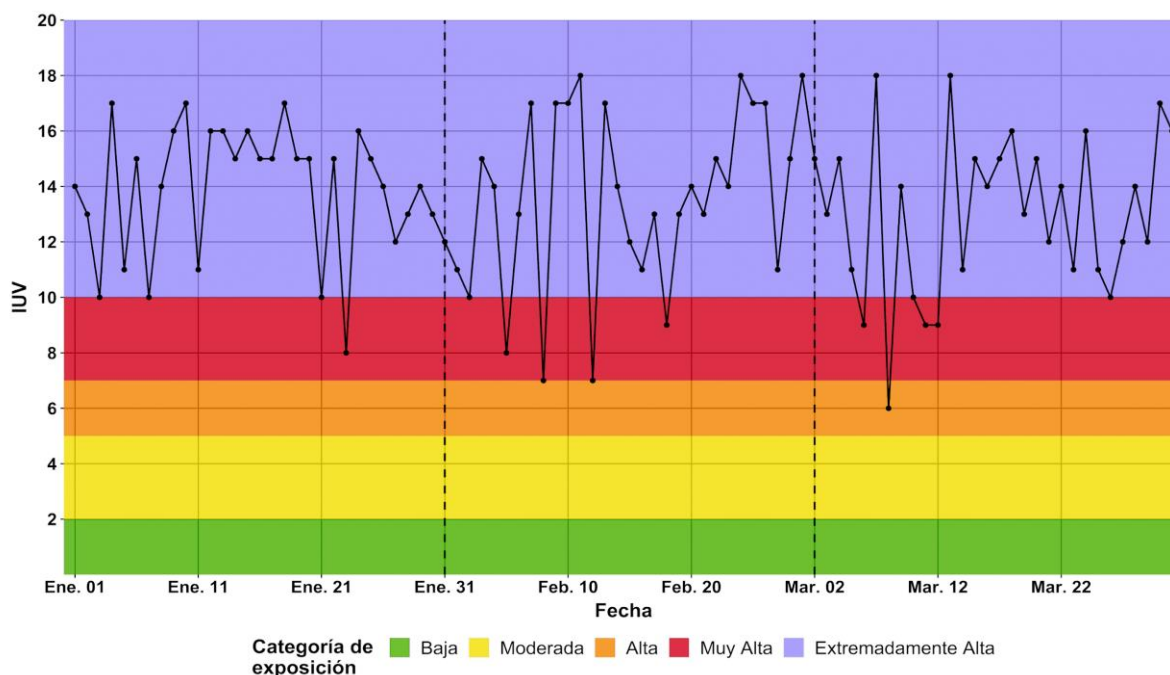
Asimismo, en promedio, la UVE representó el 0.45% de la UVT. Es importante señalar que el monitoreo de ambos tipos de radiación UV son complementarios y necesarios para una comprensión integral de la citada variable ambiental que contribuya al diseño de medidas adecuadas de protección a la salud de las personas ante los efectos nocivos por sobre exposición.

B. ÍNDICE ULTRAVIOLETA

El Índice Ultravioleta (IUV) es una magnitud adimensional que se expresa como un valor entero superior a cero; cuanto más alto es el valor, mayor es la probabilidad de sufrir lesiones cutáneas y oculares, y menos tiempo se necesita para que estas se produzcan¹³. De esta manera, al igual que la radiación ultravioleta eritemática, el índice UV pondera la radiación UV según su capacidad para causar daño a la piel, utilizando la curva de acción eritemática¹⁴.

En la Figura N°13 se muestra la variación de los valores máximos diarios del IUV (promedios de 30 minutos) para cada categoría de exposición según la Organización Mundial de la Salud (OMS). Para enero, estos valores oscilaron entre 8 y 17; para febrero, entre 7 y 18; y para marzo, entre 6 y 18. Los valores alcanzados del IUV se encuentran conforme a su comportamiento estacional típico del verano en el hemisferio sur.

Figura N° 13 Variación de los valores máximos diarios del IUV



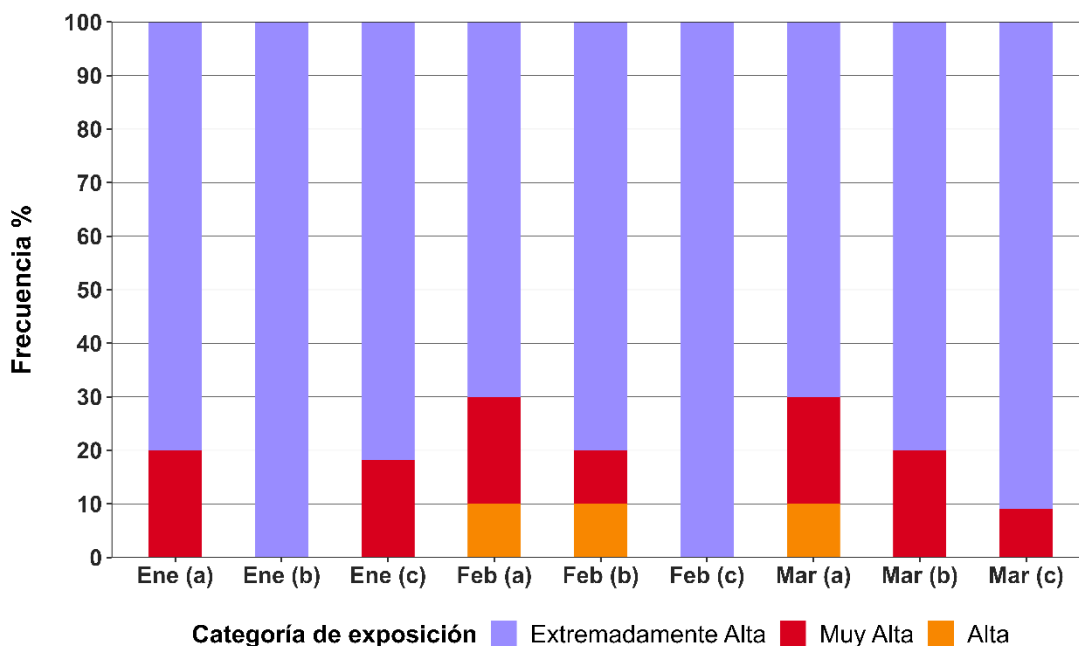
La Figura N° 14 presenta las frecuencias de las categorías de exposición de la OMS alcanzadas de acuerdo con los valores del IUV (máximos diarios) en el OVA

¹³ Adaptado de Guía Práctica del Índice UV Solar Mundial. Obtenido de: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/d24c554a-aa30-4d9c-a6c0-df67484f7b7e/content>

¹⁴ Adaptado de Nota Técnica N° 002-2016 SENAMHI. Obtenido de: <https://idsep.senamhi.gob.pe/portaldesep/files/tematica/pronostico/indiceuv/indiceuv.pdf>

Marcapomacocha durante la primera (a), segunda (b) y tercera (c) decadiaria de los meses de enero, febrero y marzo. Durante el primer trimestre se evidencia una predominancia en la ocurrencia de la categoría de exposición Extremadamente Alta (por lo menos un 70%). En ese sentido, para la segunda decadiaria de enero y tercera decadiaria de febrero se evidencia que todos los días presentaron una categoría de exposición Extremadamente Alta. Cabe resaltar que la exposición a valores del IUV por encima de la categoría “moderada” representa un riesgo para la salud de las personas. Un análisis detallado del comportamiento del IUV se encuentra en los boletines mensuales de vigilancia de la Radiación UV-B realizados por el SENAMHI^{15, 16, 17}.

Figura N° 14 Frecuencia de las categorías de exposición del IUV por decadiaria



En general, mayores valores del IUV diario en el OVA Marcapomacocha estarían asociados a una menor cantidad de ozono en la atmósfera, es decir, disminuye la CTO (Figura N°11) y se reduce la capacidad de la atmósfera para filtrar la radiación ultravioleta, y viceversa, cuando hay valores altos de la CTO tienden a reducirse los valores del IUV. Esto se puede evidenciar en la segunda decadiaria de octubre (día 22) y la primera decadiaria de diciembre (día 5 y 6).

Por otro lado, las condiciones meteorológicas también influyen en los valores altos del IUV, por ejemplo, a partir de una menor presencia de cobertura nubosa, que puede evidenciarse con menores valores de reflectancia de la banda 2 del satélite GOES16 (Figura N°5c) y viceversa, cuanto hay mayor nubosidad, ello se traduce en menores valores del IUV. Dicha asociación se presenta en gran medida en la primera decadiaria de febrero (día 5 y 8) y la tercera decadiaria de febrero (día 24, 25 y 26).

¹⁵ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAÍS, ENERO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-110.pdf>)

¹⁶ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAÍS, FEBRERO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-111.pdf>)

¹⁷ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAÍS, MARZO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-112.pdf>)

V.3 ÁREA FOCAL DE GASES REACTIVOS

Durante el primer trimestre del año, se ha realizado la vigilancia ambiental atmosférica del Ozono Troposférico (O_3) mediante el equipo monitor de marca 2B Technologies modelo 205 (ver Figura N°15) del OVA Marcapomacocha.

Figura N° 15 Monitor de O_3 troposférico del OVA Marcapomacocha



Asimismo, se ha utilizado imágenes satelitales obtenidas mediante el instrumento TROPOMI del satélite Sentinel-5 Precursor, parte del programa Copernicus, para la vigilancia de los siguientes gases reactivos: Compuestos Orgánicos Volátiles - Formaldehído (HCHO), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y Dióxido de Azufre (SO_2). El análisis decadiario de los mencionados gases se desarrolla a continuación:

A. OZONO TROPOSFÉRICO (O_3)

El ozono troposférico no se emite directamente a la atmósfera, sino que se forma a partir de reacciones químicas entre óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Esto ocurre cuando los contaminantes emitidos por automóviles, centrales eléctricas, entre otras fuentes, reaccionan químicamente en presencia de luz solar.¹⁸ La velocidad y el grado de formación de O_3 troposférico depende fuertemente de la radiación solar, de las emisiones antropogénicas de precursores y del ciclo biogénico de los COV. Sus concentraciones suelen ser mayores en zonas rurales o en la periferia urbana, ya que la generación fotoquímica de O_3 requiere cierta distancia desde las fuentes de emisión. Asimismo, en áreas urbanas con altos niveles de NO, el O_3 se destruye rápidamente al oxidar NO a NO_2 , lo que explica sus bajas concentraciones. Por el contrario, en entornos menos contaminados, donde no hay suficiente NO para consumirlo, se puede observar mayores niveles de O_3 generado o transportado desde áreas urbanas e industriales.¹⁹

La Figura N° 16 presenta la evolución temporal del O_3 troposférico, expresado en microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$), correspondiente al primer trimestre de 2025. Los valores fueron obtenidos a partir de promedios móviles de 8 horas y se emplearon para su comparación con el Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA-aire), establecido en $100 \mu g/m^3$. Cabe señalar que durante el mes de marzo de 2025 no se contó con registros de O_3 troposférico debido a que el equipo de monitoreo permaneció en mantenimiento; por tal motivo, el análisis trimestral se realizó únicamente con la información disponible para los meses de enero y febrero.

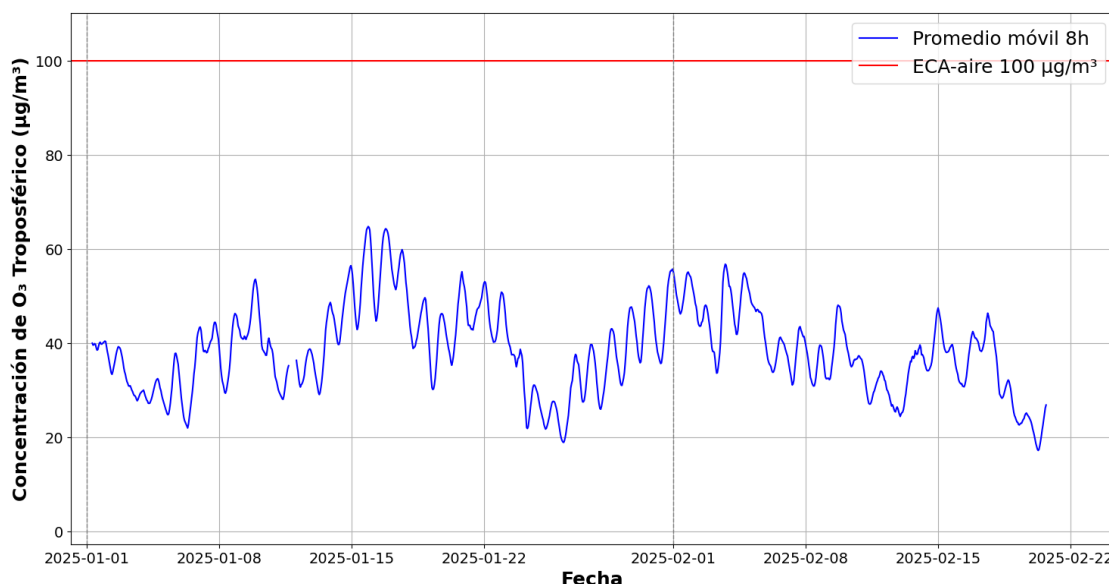
En enero de 2025, las concentraciones de O_3 registraron un valor mínimo de $18.9 \mu g/m^3$ (día 26) y un valor máximo de $64.8 \mu g/m^3$ (día 15), con un promedio mensual de $39.3 \mu g/m^3$ y un percentil 90 de $52.2 \mu g/m^3$. En febrero, el valor mínimo fue de $17.2 \mu g/m^3$ (día 20) y el máximo de $56.8 \mu g/m^3$ (día 3), alcanzando un promedio mensual de 37.6

¹⁸ Ground-level Ozone Basics. Obtenido de: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics>

¹⁹ Ozono. Obtenido de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/glosario-de-terminos/glosario-contaminantes/ozono.html>

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un percentil 90 de $48.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo, durante el periodo evaluado no se registraron excedencias al ECA-aire.

Figura N° 16 Comportamiento del O₃ troposférico durante el primer trimestre (promedio móvil de 8h)

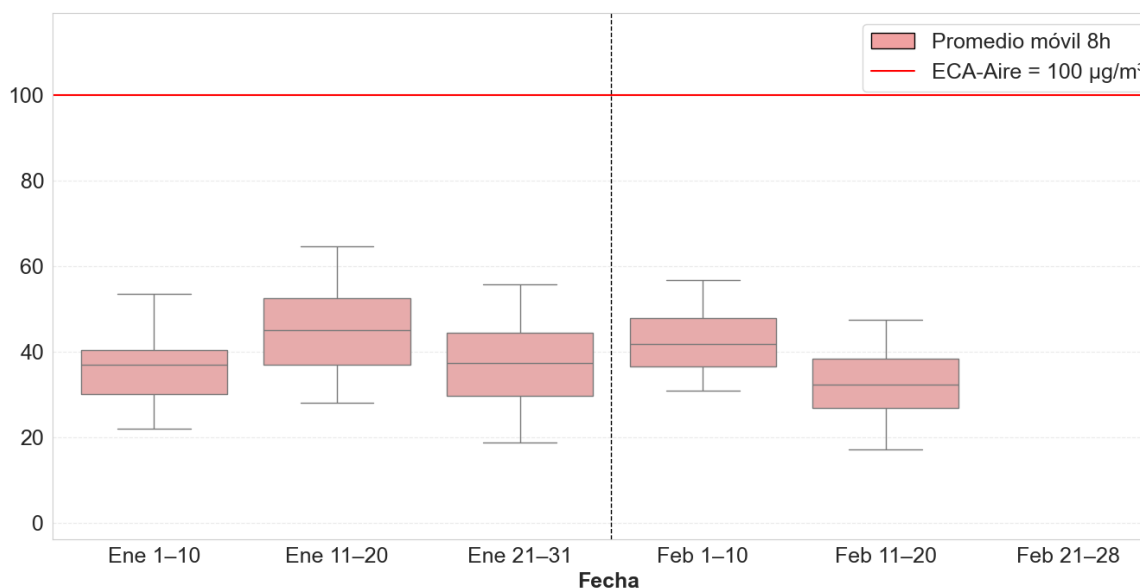


Asimismo, se realizó el análisis decadiario de la variabilidad de los promedios móviles de 8 horas del O₃ troposférico (ver Figura N°17). Al respecto, la primera decadiaria de enero presentó una mediana de $36.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un rango intercuartílico (IQR) de $10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y valores entre 22.0 y $53.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La segunda decadiaria de enero registró la mediana más alta del mes ($45.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la mayor dispersión (IQR de $15.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con concentraciones entre 28.1 y $64.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte, la tercera decadiaria del mismo mes mostró una mediana de $37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con un IQR de $14.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y valores comprendidos entre 18.9 y $55.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En febrero, la primera decadiaria registró una mediana de $41.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un IQR de $11.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores entre 30.9 y $56.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En contraste, la segunda decadiaria presentó una mediana más baja ($32.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y un IQR de $11.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con concentraciones entre 17.2 y $47.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En general, las concentraciones de O₃ mostraron una mayor variabilidad durante enero, en comparación con febrero, mes en el cual se registraron las medianas más bajas, particularmente en la segunda decadiaria.

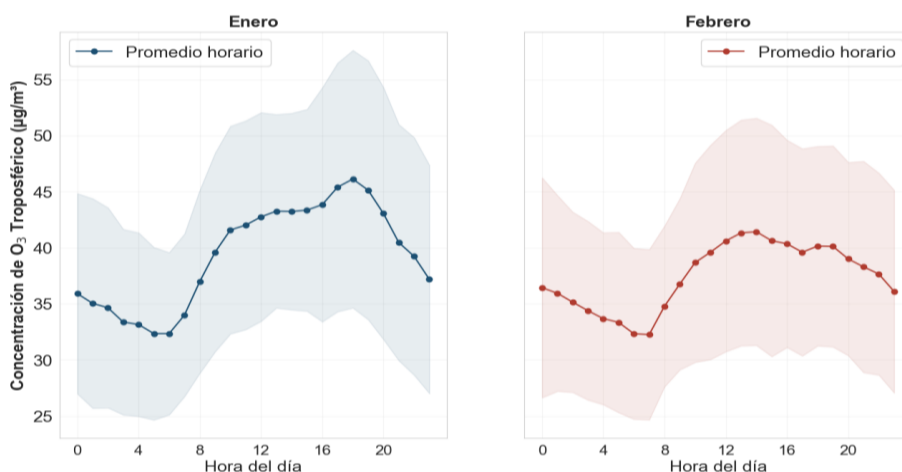
Figura N° 17 Variabilidad de las concentraciones de O₃ troposférico por decadiaria del mes



Respecto al ciclo horario de las concentraciones de O₃ troposférico (ver Figura N°18), en enero se registró un promedio horario mínimo de 32.36 µg/m³ a las 6:00 h y un promedio horario máximo de 46.14 µg/m³ a las 18:00 h. En cuanto a la variabilidad horaria, la desviación estándar mínima por hora fue de 7.23 µg/m³ a las 6:00 h, mientras que la máxima alcanzó 11.54 µg/m³ a las 19:00 h. El promedio mensual fue de 39.33 µg/m³ con una desviación estándar de 10.30 µg/m³.

Durante febrero, el promedio horario mínimo fue de 32.28 µg/m³ a las 7:00 h y el promedio horario máximo de 41.44 µg/m³ a las 14:00 h. Además, la desviación estándar mínima por hora se registró a las 8:00 h con un valor de 7.17 µg/m³, mientras que la máxima ocurrió a las 15:00 h con 10.31 µg/m³. El promedio mensual fue 37.45 µg/m³ con una desviación estándar mensual de 9.11 µg/m³, inferior a la observada en enero, lo que indica una menor variabilidad de las concentraciones durante febrero.

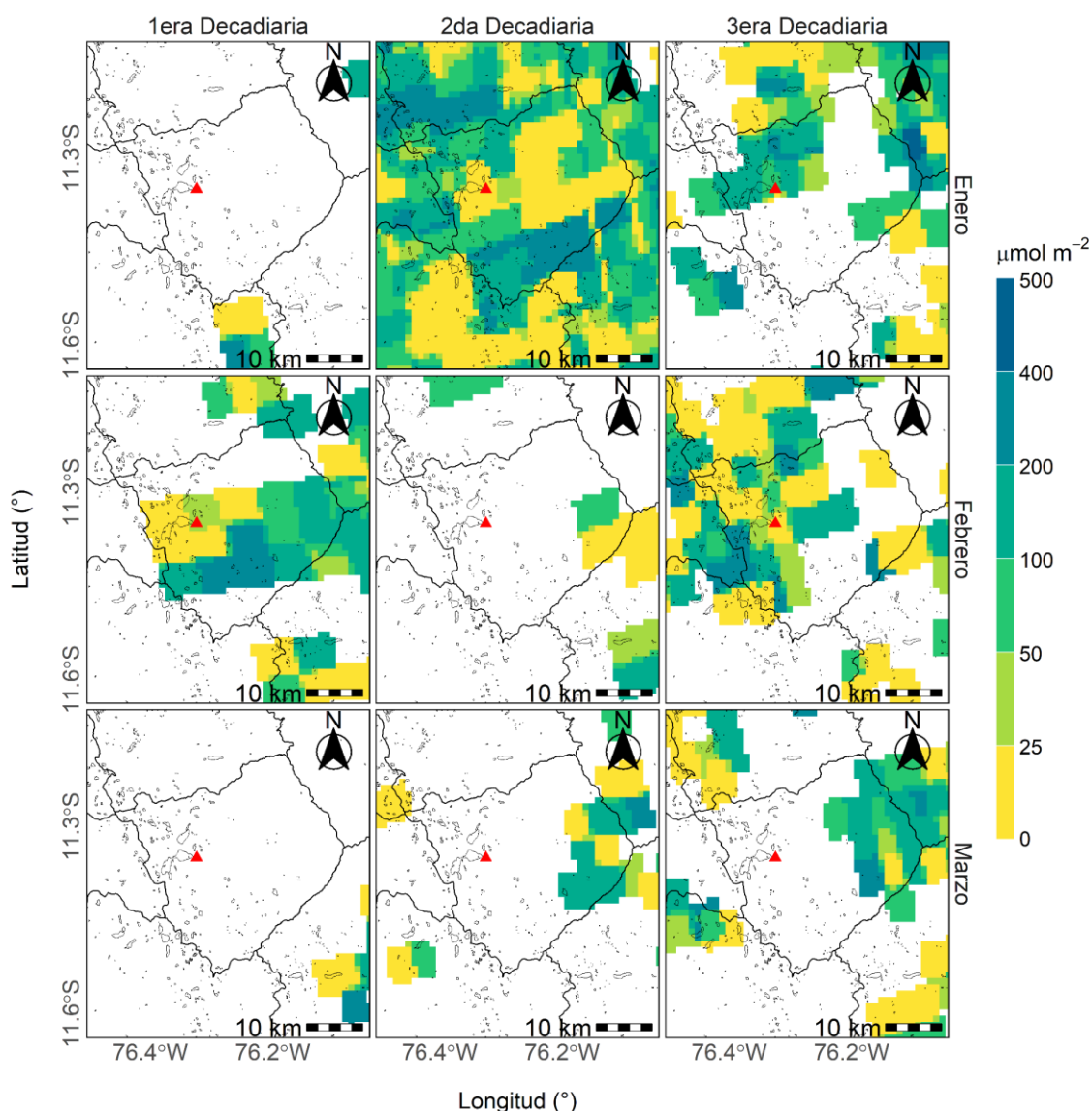
Figura N° 18 Ciclo horario promedio del O₃ troposférico por cada mes del trimestre



B. FORMALDEHIDO (HCHO)

En el distrito de Marcapomacocha la densidad de HCHO en la columna troposférica presentó diferencias entre las decadiarias del trimestre (ver Figura N°19). El valor máximo distrital se registró en la tercera decadiaria de enero con 387.72 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, mientras que los promedios areales se ubicaron entre 85.01 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la segunda decadiaria de febrero y 138.40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la segunda decadiaria de marzo. La desviación estándar alcanzó un máximo de hasta 86.28 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la segunda decadiaria de enero y presentó un mínimo de 11.07 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ para la segunda decadiaria de febrero. Asimismo, para la ubicación del OVA Marcapomacocha se alcanzó un valor máximo de 94.09 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la tercera decadiaria de enero y un mínimo de 20.38 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la tercera decadiaria de febrero.

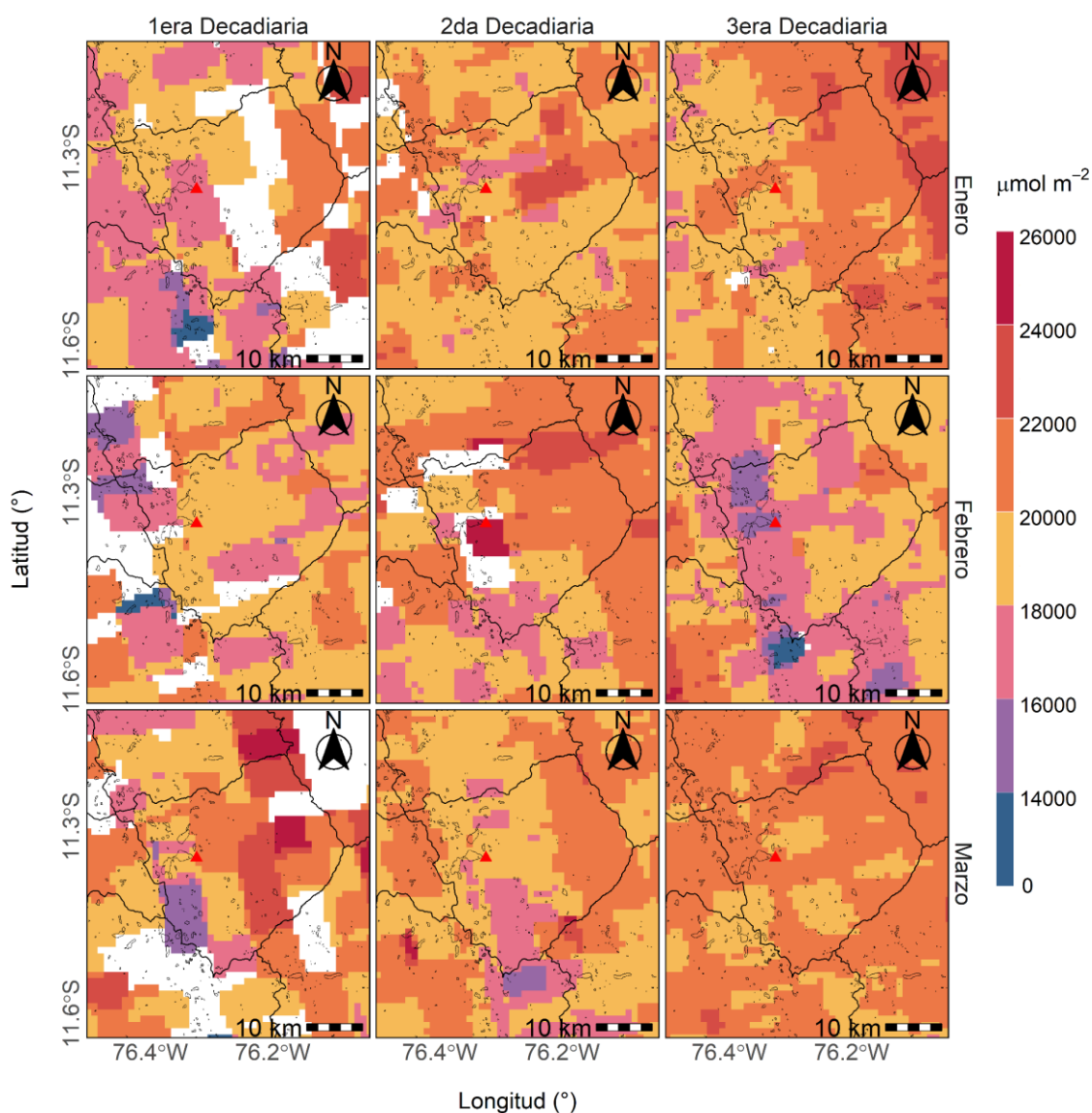
Figura N° 19 Variación espacial del HCHO por decadiaria del trimestre



C. MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

En relación a la variación espacial de la densidad de CO en la columna troposférica del distrito de Marcapomacocha por decadiaria del trimestre (ver Figura N.º20), se presentaron los valores máximos en la segunda decadiaria de febrero con 25400.95 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$; mientras que, los promedios areales se ubicaron entre 17886.95 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la tercera decadiaria de febrero y 20599.35 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la segunda decadiaria de febrero. La desviación estándar alcanzó hasta 2466.18 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la primera decadiaria de marzo y presentó un mínimo de 659.93 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ para la tercera decadiaria del mismo mes. Asimismo, en el OVA Marcapomacocha se alcanzó un valor máximo de 25400.95 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la segunda decadiaria de febrero y un mínimo de 15887.08 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la tercera decadiaria de febrero. En general, se evidencia una tendencia al aumento de la densidad de columna de CO hacia la segunda decadiaria de febrero.

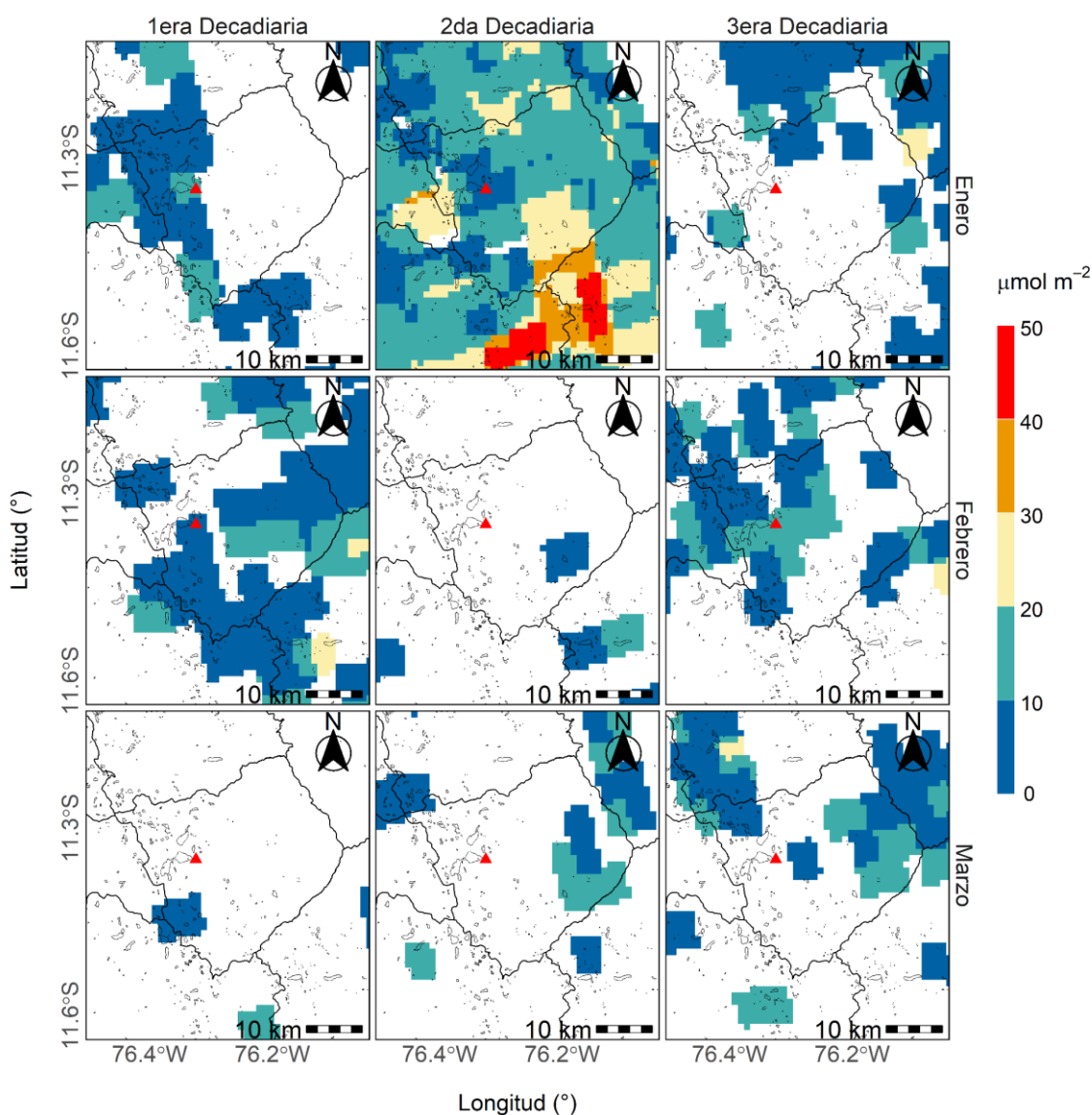
Figura N° 20 Variación espacial del CO por decadiaria del trimestre



D. DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂)

En relación a la variación espacial de la densidad de NO₂ en la columna troposférica para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N°21), durante las decadiarias analizadas del primer trimestre se registraron valores máximos de hasta 33.56 μmol/m² en la segunda decadiaria de enero; mientras que, los promedios areales se ubicaron entre 0.50 μmol/m² en la segunda decadiaria de febrero y 15.33 μmol/m² en la segunda decadiaria de enero. Asimismo, para la ubicación del OVA Marcapomacocha, los valores máximos se observaron en la tercera decadiaria de febrero con 16.85 μmol/m², mientras que los mínimos corresponden a la primera decadiaria de febrero con 4.63 μmol/m².

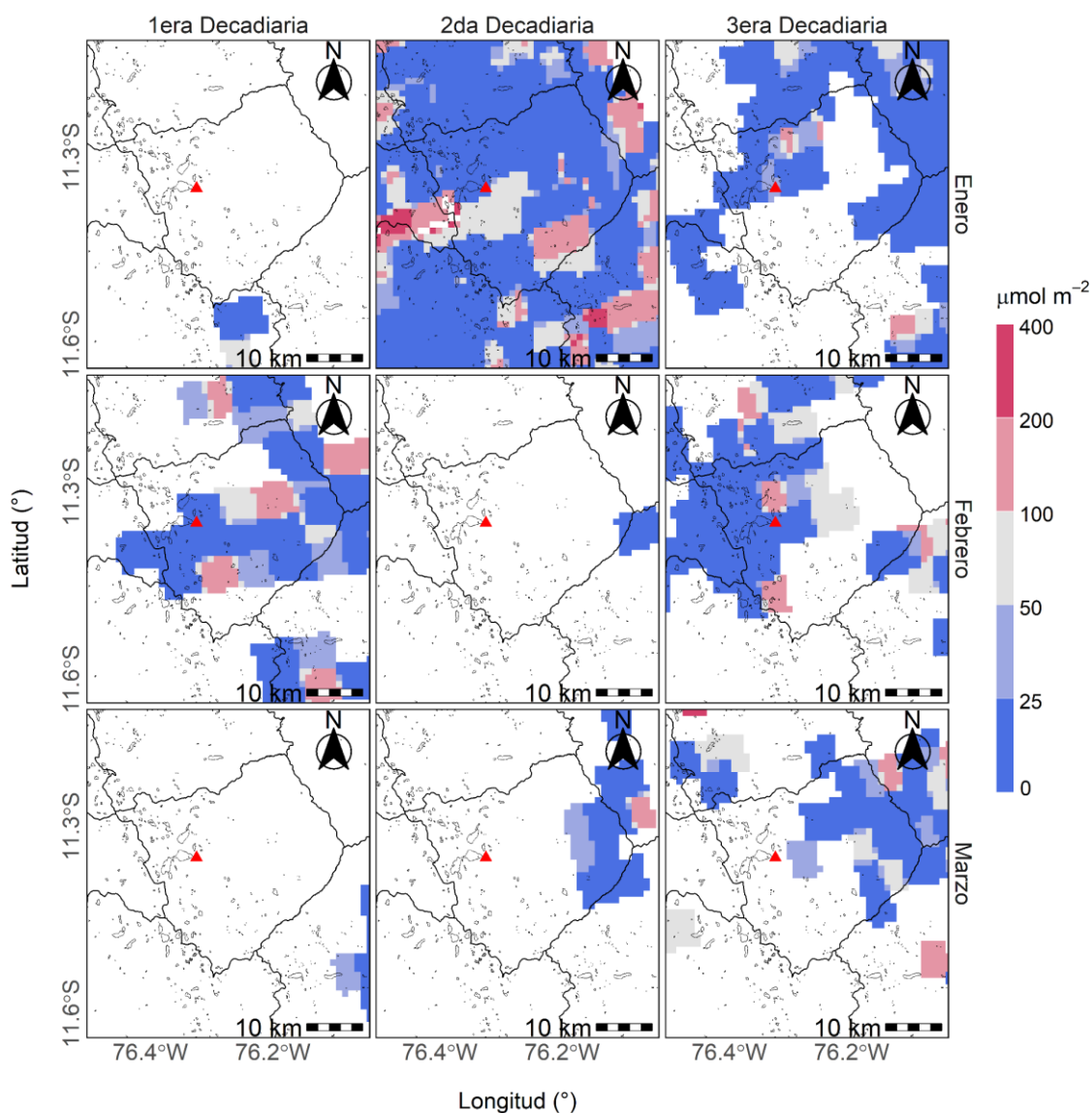
Figura N° 21 Variación espacial del NO₂ por decadiaria del trimestre



E. DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

En relación a la variación espacial de la densidad de SO₂ en la columna troposférica para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N.º22), durante las decadiarias analizadas del primer trimestre se observó que se alcanzaron valores máximos de hasta 388.99 µmol/m² en la segunda decadiaria de enero. En cuanto a los promedios areales se ubicaron entre 28.09 µmol/m² en la tercera decadiaria de enero y 74.40 µmol/m² en la primera decadiaria de febrero. Asimismo, para la ubicación del OVA Marcapomacocha se registró un valor máximo de 25.61 µmol/m² en la tercera decadiaria de enero.

Figura N° 22 Variación espacial del SO₂ por decadiaria del trimestre

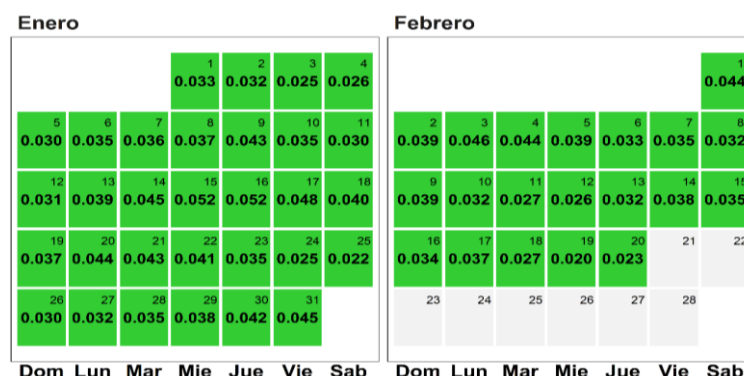


F. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE PARA O₃ TROPOSFÉRICO

El índice de calidad del aire (ICA), está basado en valores de concentración establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA por sus siglas en inglés). Asimismo, permite informar a la población sobre el estado de la calidad del aire, es decir, que tan limpio o saludable está el aire y los efectos que podría causar en la salud.²⁰

La Figura N° 23 muestra los estados de calidad del aire para el O₃ troposférico a partir de máximos diarios de promedios de cada 8 horas. Se observa que durante el mes de enero se presentó los 31 días, una calidad del aire "Buena". Asimismo, en el mes de diciembre se presentó 20 días con una calidad del aire "Buena".

Figura N° 23 Estados de calidad del aire para O₃ troposférico



Concentración O ₃ (ppm)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	0.054	Buena	0	50
0.055	0.070	Moderada	51	100
0.071	0.085	Insalubre para grupos sensibles	101	150
0.086	0.105	Insalubre	151	200

V.4 DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA TOTAL

Durante el primer trimestre del año 2025, se ha realizado la vigilancia ambiental atmosférica de la deposición atmosférica húmeda, a través de un muestreador semiautomático (ver Figura N°24) y posterior análisis de las muestras en laboratorio considerando lo estipulado en el Manual Técnico: MT-DMA-001²¹.

²⁰ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/air-quality_brochure_02_14_0.pdf

²¹ MONITOREO DE LA DEPOSICIÓN HÚMEDA Manual Técnico: MT-DMA-001 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/00711SENA-93.pdf>)

Figura N° 24 Muestreador de deposición atmosférica



Las variables más importantes para el monitoreo de la calidad de agua de lluvia son el Potencial de Hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica. Para su determinación, se utilizan equipos especializados y que permiten realizar un monitoreo de frecuencia semanal siguiendo lineamientos técnicos establecidos por la OMM con fines de garantizar la representatividad y calidad de los datos obtenidos.

Para la determinación de la calidad del agua de lluvia, se emplean umbrales establecidos internacionalmente. Se considera lluvia ácida cuando la muestra posee un pH menor a 4.4²², mientras que, para la conductividad eléctrica, valores superiores a 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ²³ indican también la presencia de lluvia ácida.

En el Cuadro N°1 y en la Figura N°25a, se observan los valores de pH de la deposición atmosférica húmeda recolectados por el muestreador, donde los valores mínimo y máximo fueron 6.4 y 8.7, respectivamente. Se puede observar que todos los valores de pH registrados se encontraron por encima del umbral de lluvia ácida (4.4).

Respecto a la conductividad eléctrica de la deposición atmosférica húmeda, en el Cuadro N°1 y la Figura N°25b, se muestran los registros, donde los valores mínimo y máximo fueron 2.1 y 15.1, respectivamente. Asimismo, se observa que no se registraron valores por encima del umbral de lluvia ácida (20 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

²² Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (<https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>)

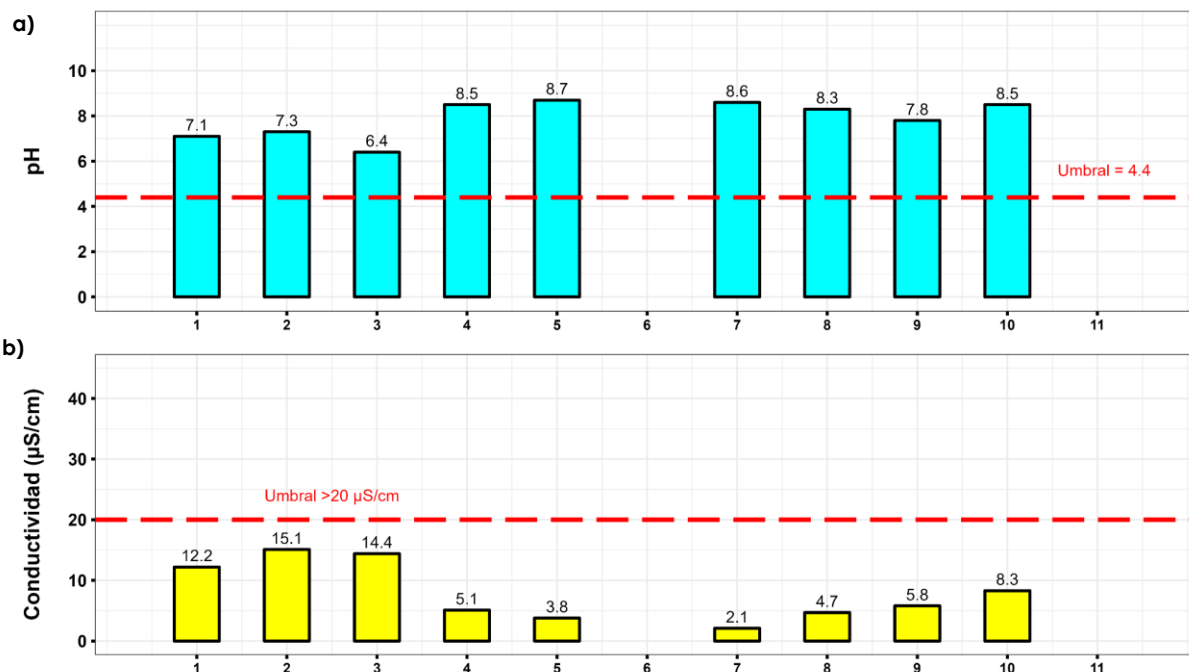
²³ Antolínez, A. y Díaz, C. (2003) Lluvia Ácida en la zona norte de Bogotá.

Cuadro N°1 Resultados de pH y conductividad eléctrica de las muestras de deposición atmosférica húmeda

Número de muestra	Periodo de muestreo		Variables	
	Inicio	Fin	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad eléctrica (µS/cm)
1	7/01/2025	14/01/2025	7.1	12.2
2	14/01/2025	21/01/2025	7.3	15.1
3	21/01/2025	28/01/2025	6.4	14.4
4	28/01/2025	4/02/2025	8.5	5.1
5	4/02/2025	11/02/2025	8.7	3.8
6	11/02/2025	18/02/2025	*	*
7	18/02/2025	25/02/2025	8.6	2.1
8	25/02/2025	4/03/2025	8.3	4.7
9	4/03/2025	11/03/2025	7.8	5.8
10	11/03/2025 ⁴	18/03/2025	8.5	8.3
11	18/03/2025	25/03/2025	*	*
Valor mínimo			6.4	2.1
Valor máximo			8.7	15.1
Valor promedio			7.9	7.9

(*) Cantidad de muestra insuficiente para análisis de laboratorio

Figura N° 25 Registros de pH y conductividad eléctrica de la deposición atmosférica húmeda



V.5 ÁREA FOCAL DE AEROSOLES

En el OVA Marcapomacocha, se realiza la vigilancia de aerosoles mediante equipos automáticos (ver Figura N° 26) para determinar la concentración en masa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y en número de aerosoles (cantidad de partículas/ m^3).

Figura N° 26 Equipamiento de medición para aerosoles en el OVA Marcapomacocha



Asimismo, se complementa con el uso de imágenes satelitales sobre el Índice UV Aerosol derivadas del instrumento TROPOMI del satélite Sentinel-5 Precursor, parte del programa Copernicus, y sobre la profundidad óptica de aerosoles (AOD por sus siglas en inglés) a partir del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) a bordo de los satélites Terra y Aqua de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA por sus siglas en inglés).

A. CONCENTRACIONES EN MASA

Con los datos del equipo METONE - 412 y monitor PurpleAir basado en sensores de bajo costo, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones de PM_{10} (Material Particulado con diámetro menor a 10 micras) y $\text{PM}_{2.5}$ (Material Particulado con diámetro menor a 2.5 micras) registradas en el OVA Marcapomacocha.

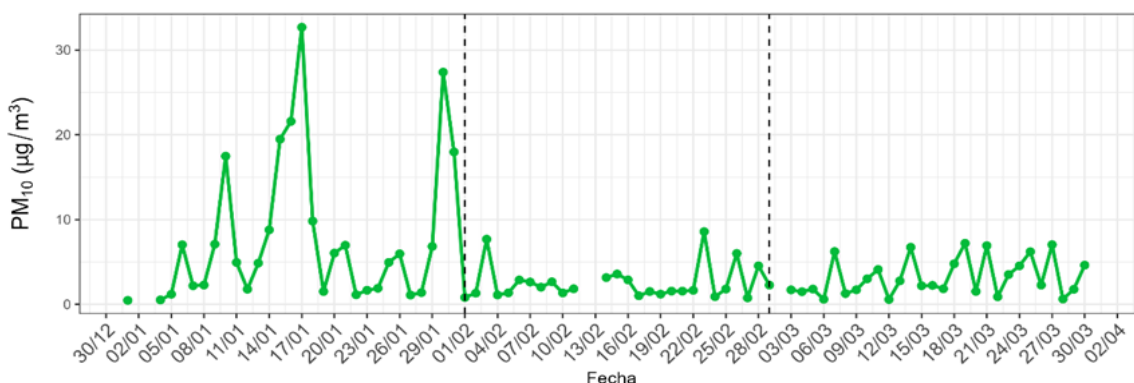
A.1. CONCENTRACIÓN EN MASA DEL PM_{10}

La Figura N° 27 muestra la evolución temporal de las concentraciones promedio diarias de PM_{10} registradas en el OVA Marcapomacocha durante el primer trimestre del año, a partir de mediciones provenientes del perfilador de partículas METONE – 412. En particular, se registró un promedio diario máximo de $32.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el viernes 17 de enero. Al respecto, el incremento de las concentraciones observado entre el 15 y el 17 de enero estaría asociado al aumento de la temperatura y a la disminución de la humedad relativa, condiciones que favorecieron la resuspensión de polvo por acción del viento durante dichos días. Asimismo, durante todo el periodo de análisis, no se registraron concentraciones diarias de PM_{10} superiores al ECA – aire de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (como promedio diario)²⁴. En

²⁴ De acuerdo con el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire (DS N° 010-2019-MINAM), para que un procedimiento alternativo automático – como el perfilador METONE-412 o el sensor PurpleAir – pueda ser comparados con los ECA correspondientes, es necesario que pase por un proceso de intercomparación. En este sentido, los procedimientos alternativos automáticos utilizados en el OVA para la medición de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, se encuentran actualmente en proceso de intercomparación; por ello, la comparación con los ECA presentada en este Boletín debe considerarse únicamente de carácter referencial.

general, el mes de enero presentó las mayores concentraciones de PM₁₀ con un promedio mensual de 7.8 µg/m³.

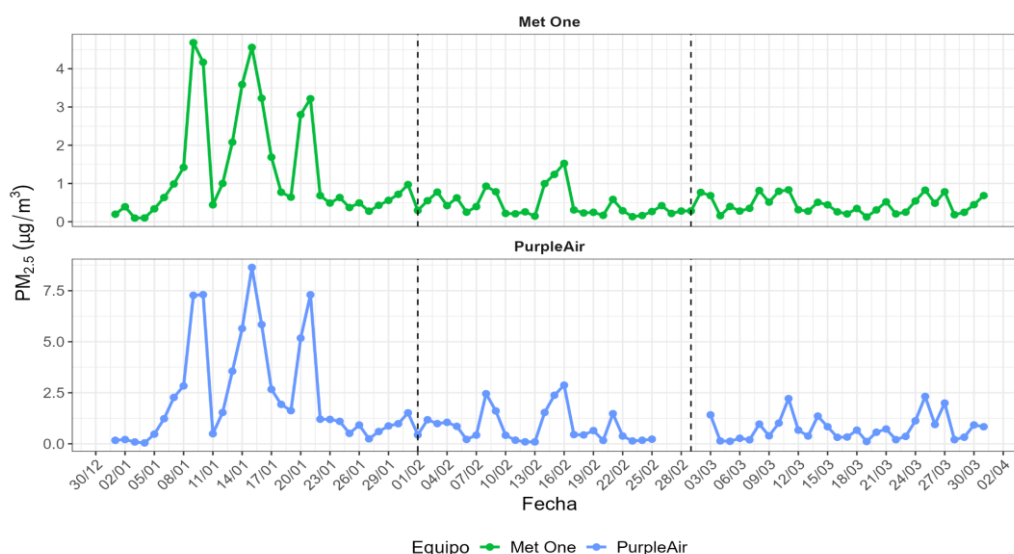
Figura N° 27 Variación de la concentración promedio diaria de PM₁₀



A.2. CONCENTRACIÓN EN MASA DEL PM_{2.5}

En la Figura N° 28 se presenta la evolución temporal de las concentraciones promedio diarias de PM_{2.5} durante el primer trimestre del año. En este periodo, el mes de enero registró los mayores incrementos en las concentraciones, posiblemente asociados a una mayor presencia de focos de calor, potencialmente vinculados a incendios forestales (ver Figura N° 8). En cuanto a los picos máximos, se destaca que, el 15 de enero el perfilador de partículas METONE – 412 reportó un promedio diario máximo de 4.6 µg/m³, mientras que el sensor PurpleAir alcanzó los 8.6 µg/m³ en la misma fecha. Ambos equipos coincidieron en que las concentraciones más altas ocurrieron entre las últimas horas de la noche (a partir de las 20:00 h) y las primeras horas de la madrugada (hasta las 01:00 h). Cabe resaltar que, durante todo el trimestre analizado, los niveles de PM_{2.5} se mantuvieron por debajo del ECA – aire (50 µg/m³ como promedio diario).

Figura N° 28 Variación de la concentración promedio diaria de PM_{2.5}



Generalmente, las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en esta zona son bajas, atribuible a la limitada actividad antropogénica cercana. Las concentraciones más elevadas de PM_{10} están asociadas a la resuspensión de polvo generada por la acción del viento, el paso de animales o vehículos en las proximidades del observatorio. Por otro lado, las concentraciones de $PM_{2.5}$ se vinculan principalmente con la ocurrencia de quemaduras reducidas o de incendios forestales.

B. CONCENTRACIÓN EN NÚMERO DE AEROSOLES

La mayoría de los estudios sobre la concentración de contaminantes atmosféricos se enfocan en la medición en masa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). No obstante, existe evidencia que sugiere que las concentraciones basadas en el número de partículas y su composición química tienen mayor relevancia para evaluar ciertos impactos en la salud que las concentraciones en masa²⁵ ²⁶. Para describir el comportamiento de la concentración en número de partículas en el OVA Marcapomacocha se han establecido rangos (R), los cuales están categorizados de acuerdo al diámetro aerodinámico (d)²⁷: R1 ($0,3 \mu\text{m} \leq d < 0,5 \mu\text{m}$), R2 ($0,5 \mu\text{m} \leq d < 0,7 \mu\text{m}$), R3 ($0,7 \mu\text{m} \leq d < 1,0 \mu\text{m}$), R4 ($1,0 \mu\text{m} \leq d < 2,0 \mu\text{m}$), R5 ($2,0 \mu\text{m} \leq d < 3,0 \mu\text{m}$), R6 ($3,0 \mu\text{m} \leq d < 5,0 \mu\text{m}$), R7 ($5,0 \mu\text{m} \leq d < 10,0 \mu\text{m}$) y R8 ($10,0 \mu\text{m} \leq d < 20,0 \mu\text{m}$)²⁸. En este contexto, la concentración en número de partículas se expresa como el total de partículas por unidad de volumen de aire.

Durante el primer trimestre (ver Figura N°29), las mayores concentraciones promedio diarias en número de partículas se observaron en el rango R1 y R2, alcanzando un máximo de 45542772 y 4271967 partículas/ m^3 el 9 de enero. Por otro lado, los rangos R3, R4, R5, R6, R7 y R8 registraron valores máximos de 1872255.2, 1829246.3, 1768018, 1688537.7, 1338531.3 y 515041.7 partículas/ m^3 respectivamente para el 31 de marzo.

En general, respecto a los aerosoles en la ubicación del OVA Marcapomacocha, las partículas finas (diámetro menor a 2,5 micras) están asociadas a la ocurrencia de quemaduras, incluyendo los incendios forestales ocurridos en otras latitudes (transporte transfronterizo). Por otro lado, las partículas en el rango de la fracción gruesa (diámetro entre 2,5 y 10 micras) provienen del polvo resuspendido por efecto de la actividad vehicular en caminos de trocha o por acción de los vientos.

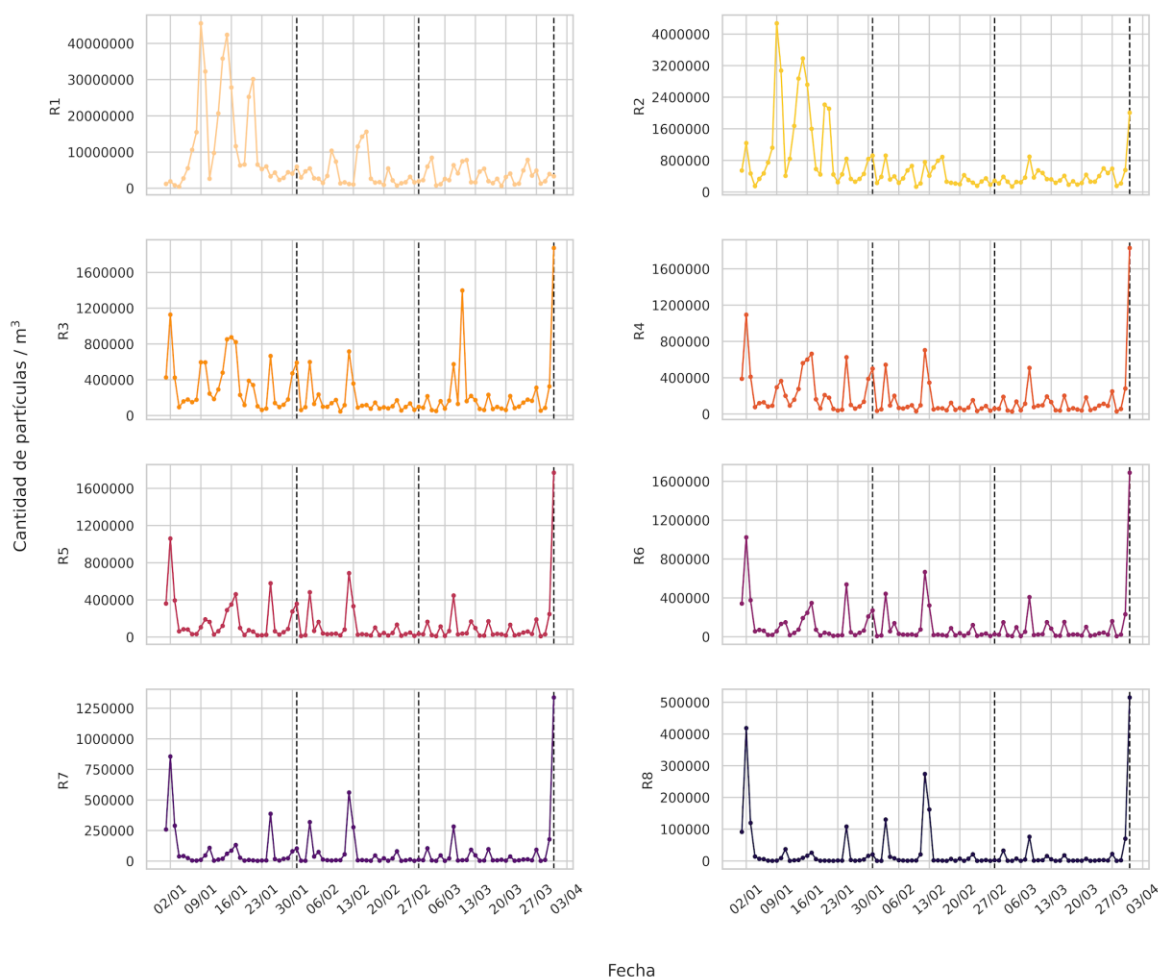
²⁵ "[...] Dado que la concentración de masa de las partículas ultrafinas es insignificante en comparación con la de las partículas de mayor tamaño, parece más adecuado correlacionar su concentración numérica con los efectos sobre la salud en lugar de su concentración de masa [...]". Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231097002604>

²⁶ UK AIR Air Information Resource (2022). Particle Numbers and Concentrations Network. Revisado el 1 de octubre del 2022 desde: <https://bit.ly/3D80Ap4>

²⁷ El diámetro aerodinámico es un indicador del tamaño de la partícula (World Health Organization Europe, 2005).

²⁸ Cangiamila, S. (2019). Utilizzo e prestazioni di sensori low-cost per il monitoraggio di varie frazioni dimensionali di particolato atmosferico. Universidad de Bologna.

Figura N° 29 Variación del promedio diario de la concentración en número de aerosoles



C. INDICE UV DE AEROSOLES

El índice UV Aerosol (UVAI), es una medida de la prevalencia de los aerosoles en la atmósfera, el cual se basa en la diferencia entre la reflectancia observada y la modelada para un par de longitudes de onda (354 y 388 nm) en el rango espectral ultravioleta (UV) que genera un valor residual. Cuando este valor residual es positivo, indica la presencia de aerosoles que absorben los rayos UV, como el polvo y el humo (p.ej. debido a la quema de biomasa), y a menudo se denomina índice de aerosoles absorbentes (IAA).²⁹ Las nubes generan valores residuales cercanos a cero, y los valores residuales muy negativos pueden indicar la presencia de aerosoles no absorbentes, incluidos los aerosoles de sulfato.³⁰

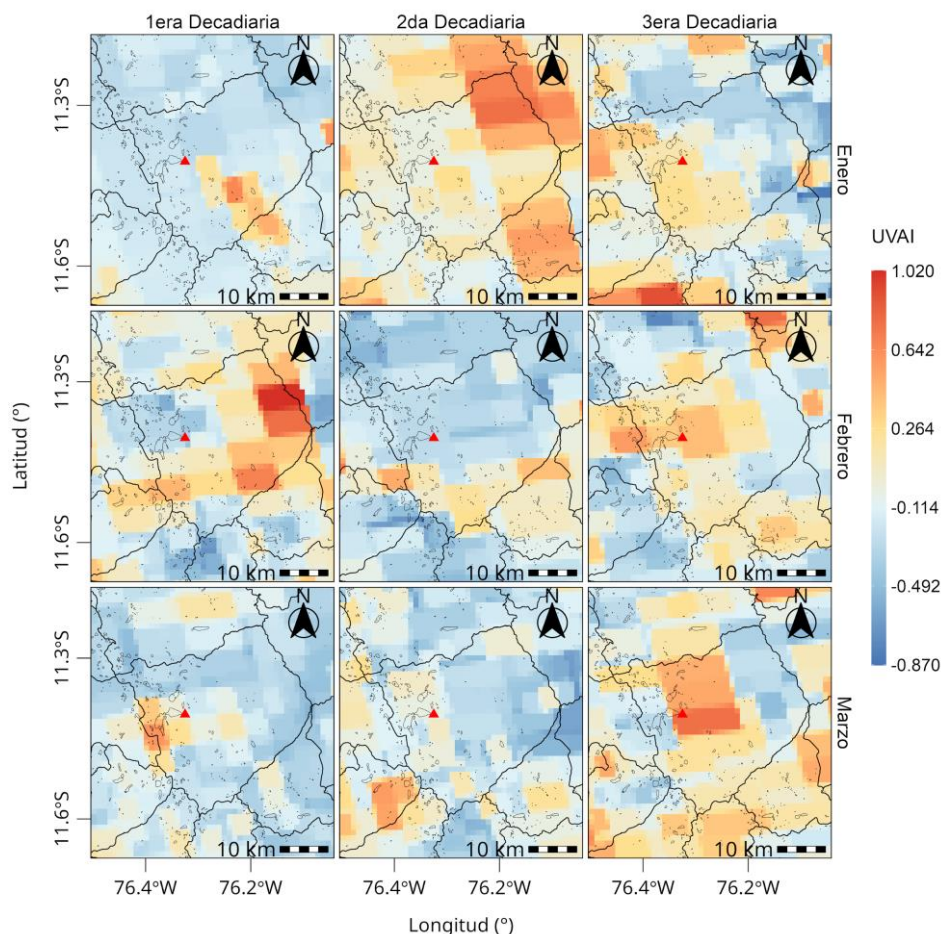
En relación con la variación espacial de los valores máximos del UVAI por cada decadiaria del primer trimestre para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N° 30), se observó que se alcanzaron valores máximos de hasta 1.02 en la primera decadiaria de febrero, 0.77 en la segunda decadiaria de enero y 0.76 en la tercera decadiaria de marzo. Asimismo, el promedio areal, indica que el mayor valor

²⁹ European Space Agency & KNMI, Sentinel-5P Level-2 Product User Manual – Aerosol Index (AER_AI), S5P-KNMI-L2-0026-MA, 2022. Disponible en: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2474726/Sentinel-5P-Level-2-Product-User-Manual-Aerosol-Index-product.pdf>

³⁰ European Space Agency (ESA) & KNMI, Sentinel-5P TROPOMI Algorithm Theoretical Basis Document: UV Aerosol Index (UVAI), S5P-KNMI-L2-0008-RP, 2018. Disponible en: <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-UV-Aerosol-Index.pdf>

corresponde a la segunda decadiaria de enero (0.19) seguido de la primera decadiaria de febrero (0.15). En general, para la ubicación del OVA Marcapomacocha, se observó una ligera tendencia al incremento, cuyo valor máximo se alcanzó en la tercera decadiaria del mes de marzo (0.76).

Figura N° 30 Variación espacial del UVAI por decadiaria del trimestre



D. PROFUNDIDAD ÓPTICA DE AEROSoles

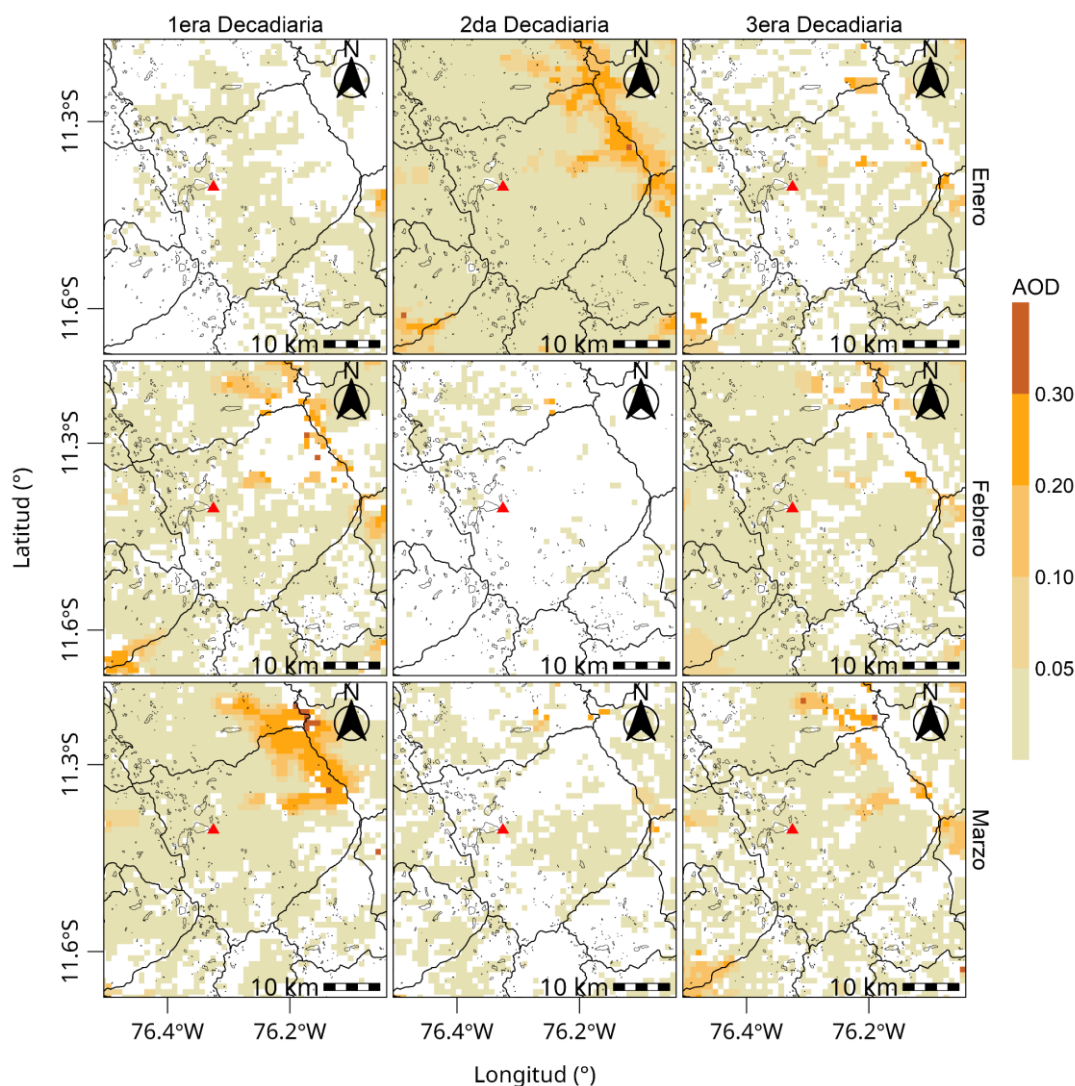
La profundidad óptica de aerosoles (AOD por sus siglas en inglés), es una medida de cuánto reducen las partículas en el aire el paso de la luz a través de la atmósfera. Los aerosoles absorben y dispersan la luz solar entrante, reduciendo así la visibilidad y aumentando la carga óptica. En términos generales, un AOD inferior a 0.1 indica un cielo cristalino con máxima visibilidad, mientras que valores cercanos a 1 indica la presencia de aerosoles tan densos que la gente tendría dificultades para ver el Sol incluso al mediodía.³¹

En relación a la variación espacial de los valores máximos del AOD por cada decadiaria del primer trimestre para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N° 31), se observó que se alcanzaron valores máximos de hasta 0.324 en la primera decadiaria de febrero. Asimismo, el promedio areal, indica que la decadiaria con el mayor valor corresponde a la primera decadiaria de marzo (0.05). En general, no

31 Aerosol Optical Depth. Obtenido de: https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2_M_AER_OD
https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_AER_OD&date=2025-11-01

se presenta ninguna tendencia, la variación de los valores se encuentran asociados a la ocurrencia de precipitaciones propia de la temporada de verano.

Figura N° 31 Variación espacial del AOD por decadiaria del trimestre



E. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE

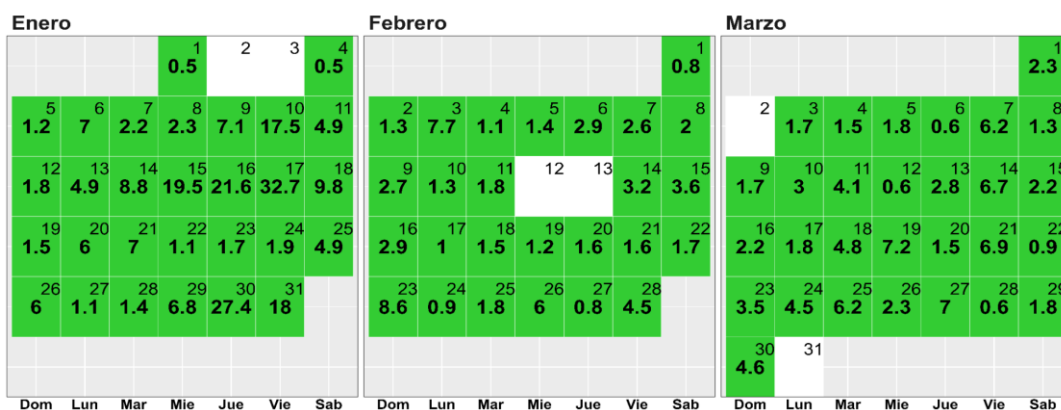
La estimación del índice de calidad del aire (ICA) por material particulado ³² consideró los promedios diarios de los valores de concentración en masa registrados por el METONE – 412.

E.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM₁₀

La Figura N° 32 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM₁₀ asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observa que durante los meses de enero a marzo se presentaron días con una calidad del aire “Buena”.

³² Final Updates to the Air Quality Index (AQI) for Particulate Matter. Obtenido de: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/pm-naaqs-air-quality-index-fact-sheet.pdf>

Figura N° 32 Estados de calidad del aire para PM₁₀

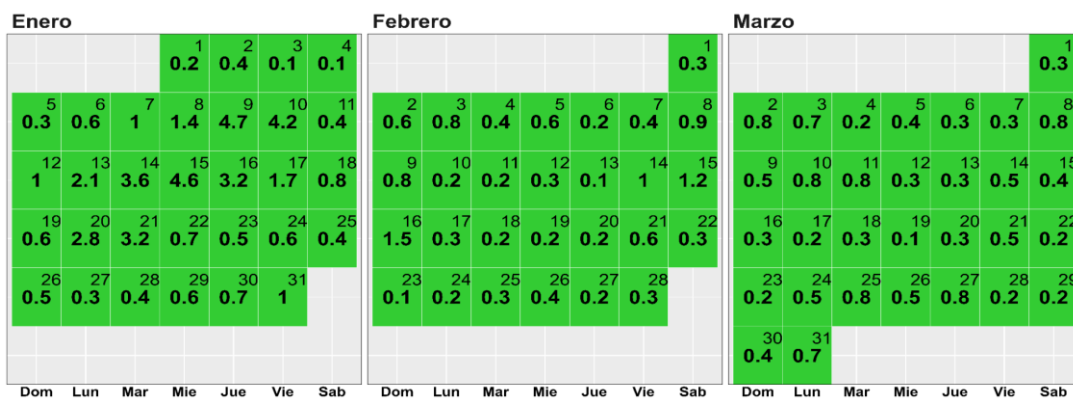


Concentración PM ₁₀ (µg/m ³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	54	Buena	0	50
55	154	Moderada	51	100
155	254	Insalubre para grupos sensibles	101	150
255	354	Insalubre	151	200

E.2. INDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM_{2.5}

La Figura N° 33 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM_{2.5} asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observa que durante los tres meses se presentaron días con una calidad del aire “Buena”.

Figura N° 33 Estados de calidad del aire para PM_{2.5}



Concentración PM _{2.5} (µg/m ³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	9	Buena	0	50
9.1	35.4	Moderada	51	100
35.5	55.4	Insalubre para grupos sensibles	101	150
55.5	125.4	Insalubre	151	200

V.6 ÁREA FOCAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Durante el primer trimestre del 2025, se realizó la vigilancia de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el OVA Marcapomacocha mediante el equipo analizador de gases de la marca Picarro modelo G2401 (ver Figura N° 34). Dicho equipo tiene el principio de medición basado en la técnica de espectroscopía de cavidad “ring-down” (CDRS, por sus siglas en inglés) que permite medir las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄)³³, con una resolución temporal de 2.5 segundos.

Figura N° 34 Equipo analizador de GEI - Picarro G2401



Asimismo, la toma de muestra de GEI, se ubica a una altura de 11 m del suelo (ver Figura N° 35).

Figura N° 35 Ubicación de la toma de muestra del equipo Picarro G2401



A. DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

El CO₂ es el gas de efecto invernadero o gas que atrapa el calor, más abundante en la atmósfera, contribuye en aproximadamente el 66 % al forzamiento radiativo producido por estos gases de larga vida. Asimismo, es responsable de alrededor del

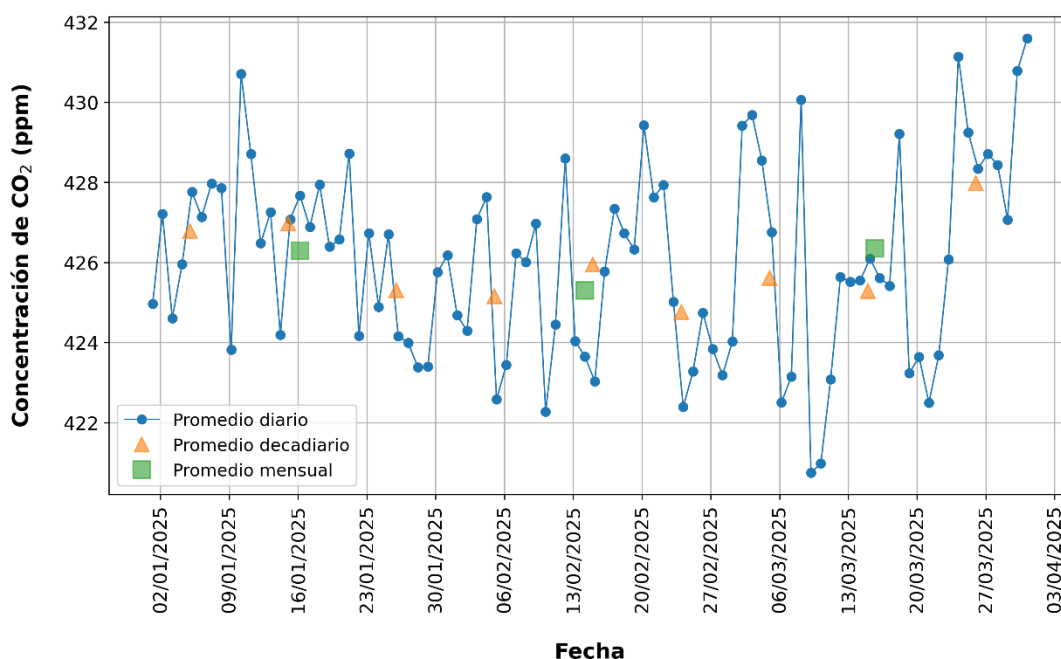
³³ Datos referenciales que se encuentran en proceso de adecuación a las *Directrices de medición para las observaciones de CO₂, CH₄ y N₂O en las estaciones de vigilancia de la atmósfera global* de la Organización Meteorológica Mundial.

79% del aumento del forzamiento radiativo durante la última década y alrededor del 77% del aumento en los últimos cinco años.³⁴

Este gas, que tiene valores más elevados en primavera y más bajos en otoño, proviene de la extracción y quema de combustibles fósiles (como carbón, petróleo y gas natural), de incendios forestales y de procesos naturales como erupciones volcánicas.³⁵ Si bien las emisiones de CO₂ provienen de diversas fuentes naturales, las emisiones relacionadas con las actividades del ser humano son las responsables del aumento que se ha registrado en la atmósfera desde la revolución industrial. Estas actividades añaden más CO₂ a la atmósfera e influyen en la capacidad de los disipadores naturales (como los bosques) para eliminarlo de la atmósfera a través del almacenamiento de carbono en el suelo.³⁶

La Figura N° 36 muestra la evolución del promedio diario de CO₂ durante el primer trimestre, donde se destaca que los valores más altos se encontraron en la tercera decadiaria de marzo (día 31 - 431.6 ppm y día 24 - 431.2 ppm). Por otro lado, los valores más bajos se encontraron en la primera decadiaria de marzo (día 9 - 420.8 ppm y día 10 - 421 ppm). Asimismo, el promedio decadiario más alto corresponde a la tercera decadiaria de marzo con 427.9 ppm; mientras que, el valor más bajo corresponde a la tercera decadiaria de febrero con 424.7 ppm. En general, febrero presentó el promedio más bajo (425.3 ppm) en comparación a los meses de enero y marzo.

Figura N° 36 Evolución del promedio diario, decadiario y mensual de CO₂ durante el primer trimestre



Respecto al ciclo horario de las concentraciones de CO₂ por mes (ver Figura N° 37), se observa que, en promedio los mayores valores se presentaron durante el horario nocturno, alcanzando los mayores valores entre las 00:00 horas a 06:00 horas;

³⁴ WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20. Obtenido de: <https://library.wmo.int/records/item/69057-no-20-28-october-2024>

³⁵ Dióxido de carbono. Obtenido de: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/dioxido-de-carbono/>

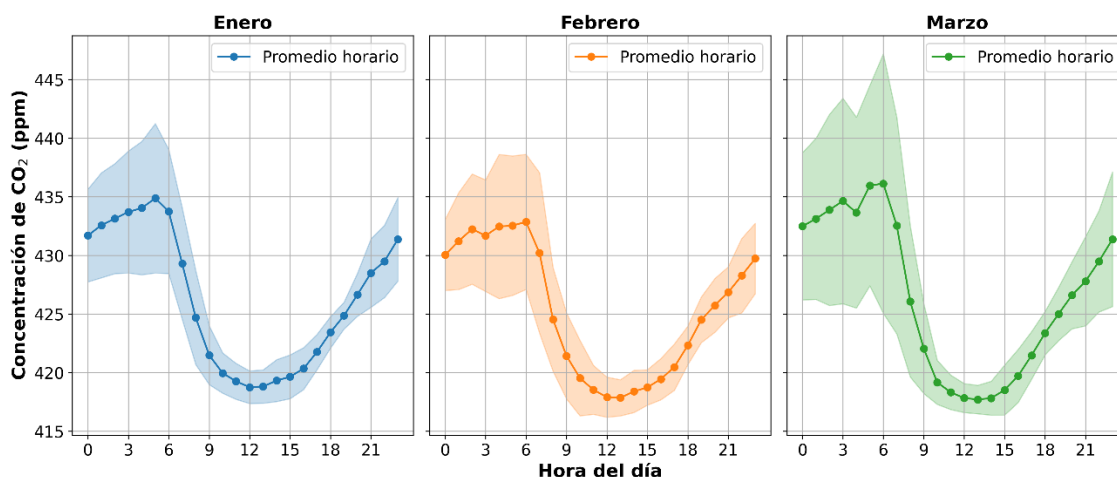
³⁶ Emisiones de dióxido de carbono. Obtenido de: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>

mientras que entre las 10:00 a 16:00 horas se alcanzan los menores valores. Esto, puede deberse a la estabilidad atmosférica de horas de la noche, lo que provoca que el CO₂ no se mezcle en la atmósfera, a diferencia del horario matutino y vespertino. Los valores bajos de CO₂ durante el horario matutino y vespertino, puede deberse también al proceso de fotosíntesis de las plantas, por ello la menor concentración durante las horas de mayor radiación solar.

Durante enero, el promedio horario de CO₂ osciló entre 418.8 ppm (12:00 horas) y 434.9 ppm (05:00 horas), con desviaciones estándar de 1.39 ppm a 6.37 ppm. En febrero, el rango de los promedios horarios estuvo entre 417.9 ppm (13:00 horas) y 432.9 ppm (06:00 horas), con desviaciones estándar entre 1.51 ppm y 6.85 ppm. En marzo, los promedios horarios se presentaron de 417.7 ppm (13:00 horas) a 436.1 ppm (06:00 horas), con desviaciones estándar de 1.21 ppm a 11.07 ppm.

En general, se puede apreciar que, para el trimestre, los promedios horarios más altos se encontraron en el mes de marzo; mientras que, los promedios más bajos se presentaron tanto en el mes de febrero como de marzo.

Figura N° 37 Ciclo horario promedio del CO₂ por cada mes del trimestre



B. METANO (CH₄)

El CH₄ es un gas de efecto invernadero que contribuye con aproximadamente el 16% del forzamiento radiativo producido por estos gases de larga vida. Asimismo, alrededor del 40% del metano se emite a la atmósfera proviene de fuentes naturales (por ejemplo, humedales y descomposición por termitas), y alrededor del 60% proviene de fuentes antropogénicas (por ejemplo, rumiantes, agricultura del arroz, explotación de combustibles fósiles, vertederos, aguas residuales y quema de biomasa).³⁷

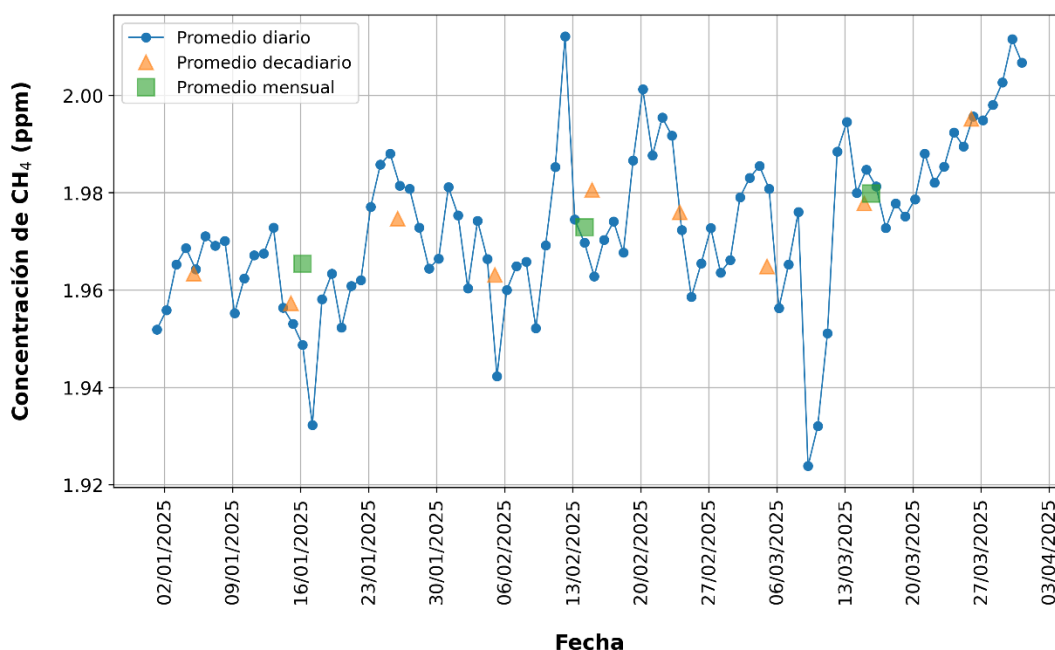
Este potente gas de efecto invernadero es el segundo contribuyente más grande al calentamiento climático después del dióxido de carbono (CO₂). Una molécula de metano atrapa más calor que una molécula de CO₂; no obstante, el metano tiene una vida relativamente corta de 7 a 12 años en la atmósfera, mientras que el CO₂ puede persistir durante cientos de años o más.³⁸

³⁷ WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20. Obtenido de: <https://library.wmo.int/records/item/69057-no-20-28-october-2024>

³⁸ Metano. Obtenido de: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/metano/>

La Figura N° 38 muestra la evolución del promedio diario de CH₄ durante el primer trimestre, donde se destaca que los valores más altos se encontraron en la segunda decadiaria de febrero (día 12 – 2.012 ppm). Por otro lado, los valores más bajos se encontraron en la primera decadiaria de marzo (día 9 – 1.924 ppm). Asimismo, el promedio decadiario más alto corresponde a la tercera decadiaria de marzo con 1.995 ppm; mientras que, el valor más bajo corresponde a la segunda decadiaria de enero con 1.957 ppm. En general, enero presentó el promedio más bajo (1.965 ppm) y en contraparte, marzo presentó el promedio más alto (1.979 ppm).

Figura N° 38 Evolución del promedio diario, decadiario y mensual de CH₄ durante el primer trimestre

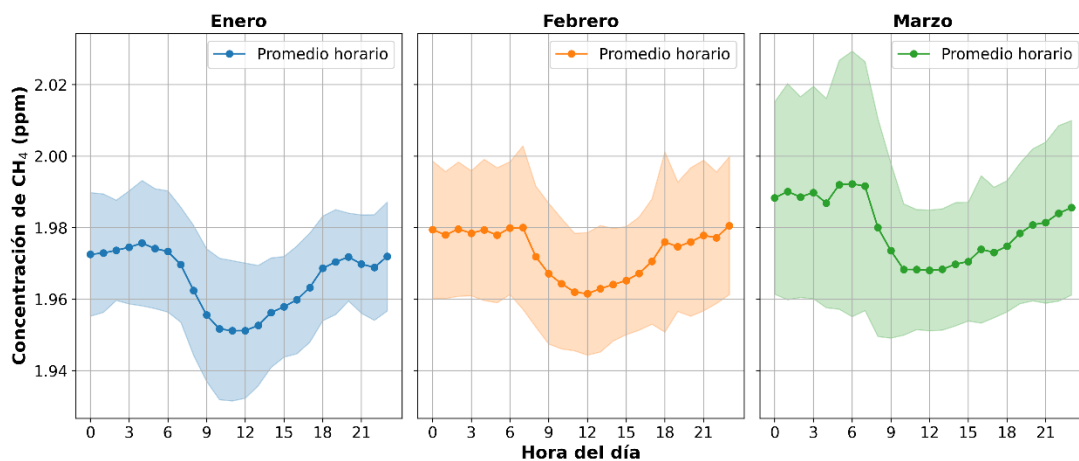


Respecto al ciclo horario de las concentraciones de CH₄ (ver Figura N° 39), se observa para cada mes del trimestre que, en promedio los mayores valores se dan entre las 19:00 horas a 07:00 horas; mientras que entre las 10:00 a 13:00 horas se alcanzan los menores valores. Esto, puede deberse a la estabilidad atmosférica de horas de la noche, lo que provoca que el CH₄ no se mezcle en la atmósfera, a diferencia del horario matutino y vespertino.

Durante enero, el promedio horario de CH₄ osciló entre 1.951 ppm (12:00 horas) y 1.976 ppm (04:00 horas), con desviaciones estándar de 0.012 ppm a 0.020 ppm. En febrero, el rango de los promedios horarios estuvo entre 1.962 ppm (12:00 horas) y 1.98 ppm (07:00 horas), con desviaciones estándar entre 0.015 ppm y 0.025 ppm. En marzo, los promedios horarios se presentaron de 1.968 ppm (10:00 horas) a 1.992 ppm (06:00 horas), con desviaciones estándar de 0.017 ppm a 0.037 ppm.

En general, se puede apreciar que, para el trimestre, los promedios horarios más altos se encontraron en el mes de marzo; mientras que, los promedios más bajos se presentaron en el mes de enero.

Figura N° 39 Ciclo horario promedio del CH₄ por cada mes del trimestre



VI. CONCLUSIONES

- Durante el primer trimestre del año, las masas de aire que llegaron al OVA Marcapomacocha para 500 hPa tuvieron principalmente una procedencia del Oeste (O) y Noroeste (NO).
- En cuanto a las condiciones meteorológicas locales, los vientos alcanzaron intensidades extremas en el horario vespertino e intensidades fuertes para el horario matutino. Por su parte, la precipitación presentó una tendencia a incrementarse hacia el mes de marzo, al igual que la humedad relativa. Respecto a la temperatura, se presentaron máximos diarios más bajos hacia el mes de febrero, al igual que los acumulados diarios más bajos de radiación solar.
- Durante el mes de enero se tuvo la mayor ocurrencia y potencia radiativa de focos de calor del primer trimestre de 2025 con una tendencia a la disminución hacia el mes de marzo, lo cual estaría asociado al incremento de la ocurrencia de precipitaciones propias de la temporada de verano.
- Respecto a la Columna Total de Ozono, los mayores valores del trimestre se encontraron en la tercera decadiaria de enero (día 23) y de marzo (día 28), los cuales estuvieron por encima de su normal climática; mientras que, el valor más bajo se encontró en la primera decadiaria de enero (día 7), el cual estuvo por debajo de su normal climática. En general, los valores diarios se mantuvieron por encima de 220 UD, indicando la ausencia de agujeros de ozono.
- La radiación UVE y UVT alcanzaron sus mayores valores en la segunda decadiaria de enero (día 16); mientras que, los menores valores en la segunda decadiaria de febrero (día 11). Asimismo, en promedio durante el trimestre, la radiación UVE representó el 0.45% de la radiación UVT.
- Durante la segunda decadiaria de enero y tercera decadiaria de febrero, predominó el IUV máximo diario de categoría Extremadamente Alta; mientras que los menores valores del IUV máximo diario se encontraron en la primera y segunda decadiaria de febrero, así como en la primera decadiaria de marzo con una categoría Alta.
- En relación al O_3 troposférico, los promedios móviles de 8 horas registraron el mayor valor del trimestre en la segunda decadiaria de enero ($64.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y un mínimo en la segunda decadiaria de febrero ($17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En general, los niveles se mantuvieron por debajo del Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA-aire, $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) durante todo el periodo evaluado. La dispersión de las concentraciones fue mayor en enero en comparación con febrero, especialmente en la segunda decadiaria de ambos meses. Los ciclos horarios mostraron valores mínimos en las primeras horas de la mañana y máximos durante la tarde, reflejando la influencia de la radiación solar. Por otro lado, tanto enero y febrero presentaron días con estado de calidad del aire "Bueno".

- En cuanto a la vigilancia satelital de gases reactivos para el distrito de Marcapomacocha, la densidad de columna troposférica de CO presentó valores promedios decadiarios con una tendencia al aumento hacia la segunda decadiaria de febrero y primera decadiaria de marzo. En cuanto al HCHO, NO₂ y SO₂, el satélite Sentinel 5P presentó limitaciones en la captura de la información; sin embargo, se observa una disminución hacia la tercera decadiaria de enero continuando hacia las decadiarias de febrero y marzo.
- Sobre la vigilancia de la deposición húmeda, los valores de pH y Conductividad Eléctrica no evidenciaron presencia de lluvia ácida; lo cual podría haber sido a consecuencia del cese de la ocurrencia de los incendios forestales en la amazonía.
- En relación a la vigilancia de aerosoles, las mayores concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} se registraron en la primera y segunda decadiaria del mes de enero. Respecto al estado de la calidad del aire, durante todo el trimestre se presentaron días con calidad del aire "Buena" tanto para PM_{2.5} como para PM₁₀. Estos valores bajos estarían vinculados al incremento progresivo de precipitaciones conforme a la temporada de verano.
- Por su parte la vigilancia satelital de aerosoles mostró que el UVAI alcanzó su máximo promedio areal para el distrito de Marcapomacocha en la primera decadiaria de febrero (1.02) y en cuanto a la ubicación del OVA se alcanzó un valor de 0.76 en la tercera decadiaria del mes de marzo. Respecto al AOD, se obtuvieron máximos valores en la primera decadiaria de febrero (0.324). En general, no se observó una tendencia definida, lo cual estaría asociado al incremento de la ocurrencia de precipitaciones propia de la temporada de verano.
- Por otro lado, en cuanto a los gases de efecto invernadero, se evidenciaron incrementos de CO₂ durante la segunda decadiaria de febrero, los cuales estarían asociados al menor ingreso de radiación solar que disminuye la actividad fotosintética de las plantas y, por ende, de la demanda de CO₂. De manera similar, en el caso del CH₄, se presentaron valores altos en la segunda decadiaria de febrero dado que suelos más húmedos a consecuencia de menor radiación solar, pueden favorecer la producción microbiana de este gas.

.....

Para más información sobre el presente boletín, contactar con:

Elvis Anthony Medina Dionicio (eamedina@senamhi.gob.pe)
Subdirector de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico

Elaboración

José Hitoshi Inoue Velarde (iinoue@senamhi.gob.pe)
Maria Lourdes Isabel Urteaga Tirado
Hanns Kevin Gómez Muñoz
Brian Daygolo Chávez Lino
Steven Gilber Arce Quispe
Sháneri Sheyla Sánchez Calderón
Dayana Lucero Acuña Valverde

Apoyo

Juan Tacza Ordoñez
Julia Amelia Astudillo Capcha
Rosalinda Cedy Aguirre Almeyda

.....

Suscríbete al **BOLETÍN TRIMESTRAL DE MONITOREO DE LA ATMÓSFERA EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCHA** en el siguiente enlace:

https://docs.google.com/forms/d/1ep1Gdkz_s1W7L-xUbrJkjJs4LovFal85AbGaR7sjskA/viewform?chromeless=1&edit_requested=true

Próxima actualización: Julio del 2025

Servicio Nacional de Meteorología e
Hidrología del Perú - SENAMHI
Jr. Cahuide 785, Jesús María Lima 11
- Perú

