



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 2024



PRESENTACIÓN

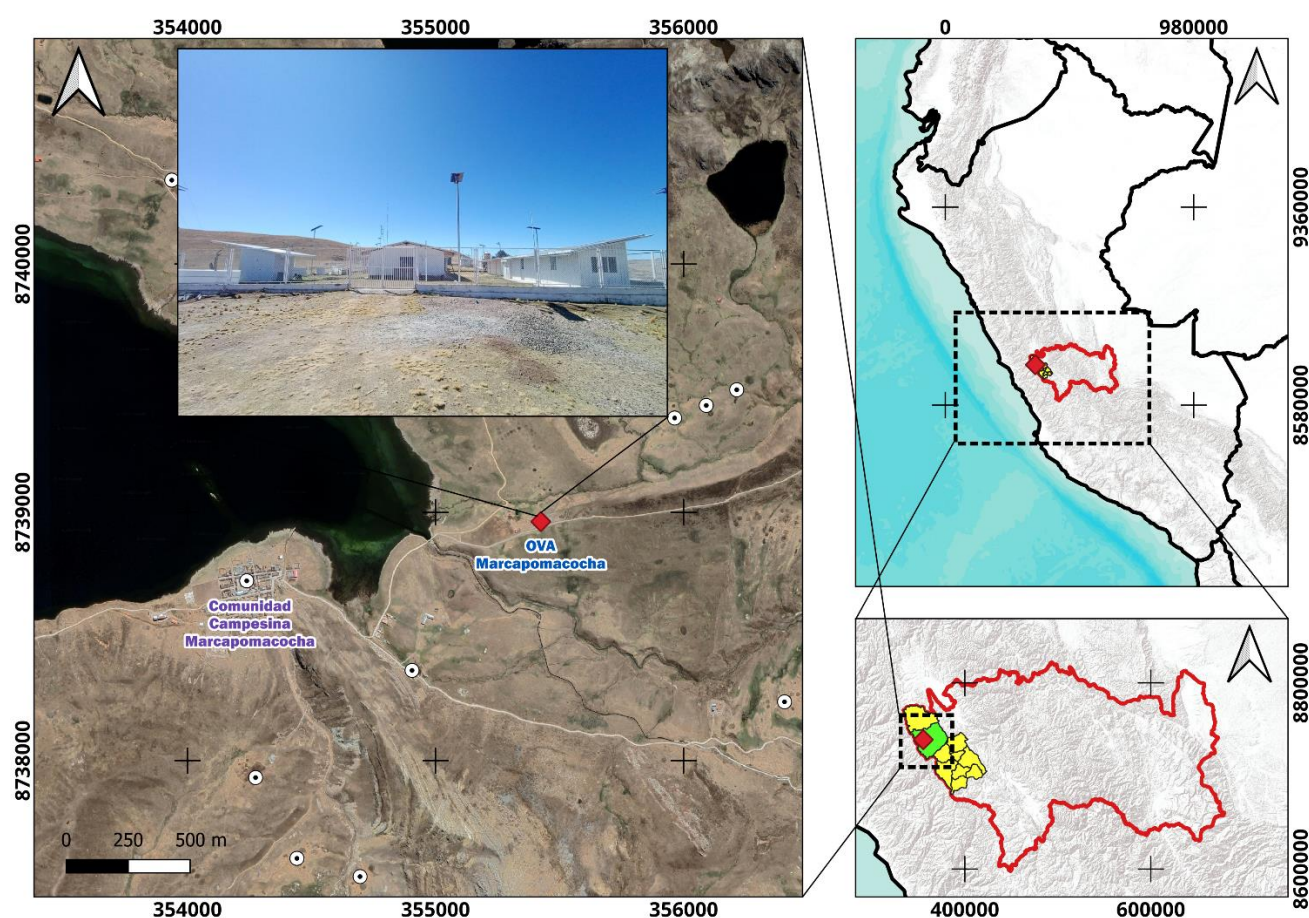
El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) a través de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico (SEA) de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica (DMA) publica el boletín trimestral de Monitoreo de la Atmósfera en el Observatorio de Vigilancia 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 2024.

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 11.404433°S, 76.325083°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 precipitación, humedad relativa, radiación solar global, temperatura 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 cinco (05) de las seis (06) áreas focales que estudia el programa VAG, las cuales son: Ozono, Gases Reactivos, 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>)

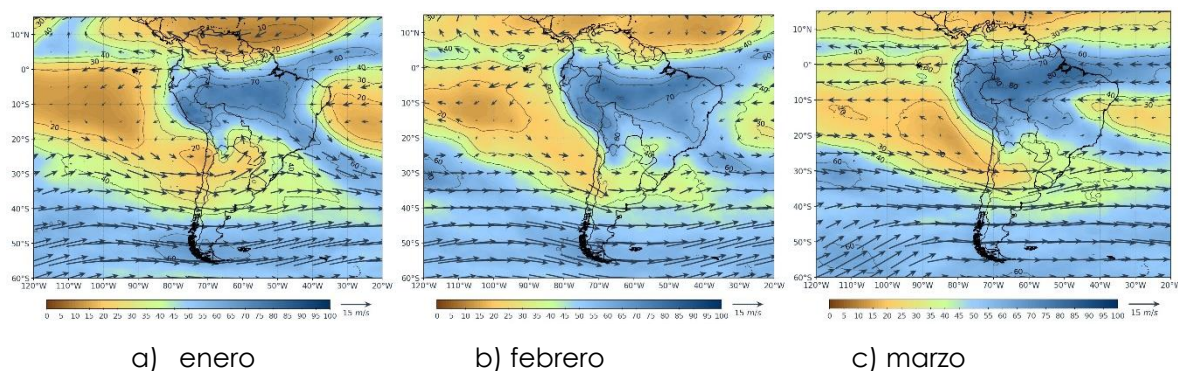
I. ANÁLISIS SINÓPTICO

En enero², el comportamiento de las masas de aire sobre la Sierra Central del Perú fue notable por la interacción de varias corrientes atmosféricas. En niveles altos, la presencia de la Alta de Bolivia (AB) y el Vórtice Ciclónico de Altos Niveles generaron inestabilidad en gran parte del centro de Sudamérica afectando a Perú, Ecuador, Bolivia y gran parte de Brasil, influenciando en la formación de tormentas y sistemas convectivos. Los vientos predominantes del oeste en niveles medios transportaron humedad desde latitudes más bajas hacia la región, facilitando la formación de vaguadas y aumentando la probabilidad de precipitaciones (Ver Figura N°2a).

En febrero³, las masas de aire sobre la Sierra Central del Perú fueron influenciadas por diversas configuraciones atmosféricas. En niveles altos, la AB y una onda asociada a una vaguada sobre el Pacífico generaron inestabilidad, propiciando condiciones para tormentas y sistemas convectivos en Perú, Ecuador y parte de Brasil. En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal desde los 25°S hacia el sur, acompañados de dos vaguadas débiles que influenciaron en la distribución de la humedad (Ver Figura N°2b).

Durante marzo⁴, en niveles altos, se presentó una AB con una configuración zonal débil en el centro de Sudamérica y la onda larga asociada a una vaguada sobre el océano Pacífico generó inestabilidad atmosférica, promoviendo condiciones propicias para la formación de tormentas en Perú, Ecuador, Colombia y el norte de Brasil. En niveles medios, predominaron flujos del este entre los 10°S y 10°N, con presencia de flujos anticiclónicos débiles alrededor de los 10°S y 20°S, favoreciendo el transporte de humedad hacia el territorio peruano y países vecinos, mientras que áreas como el norte-centro de Chile y norte de Argentina experimentaron ingresos de aire seco (Ver Figura 2c).

Figura N° 2 Mapas de campos de viento y humedad relativa en niveles medios de la atmósfera (500hPa)



II. ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS

Para un análisis a detalle del comportamiento y predominancia de las masas de aire sobre el OVA Marcapomacocha, se usó retrotrayectorias decadiarias, 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. Estas retrotrayectorias se generaron con el modelo Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) implementado en el lenguaje de programación R con datos de reanálisis.

Para enero (ver Figuras N° 3a, N° 3b y N° 3c), para las tres decadiarias, se observó que predominaron masas de aire que provinieron de la dirección noreste (NE). En febrero (ver

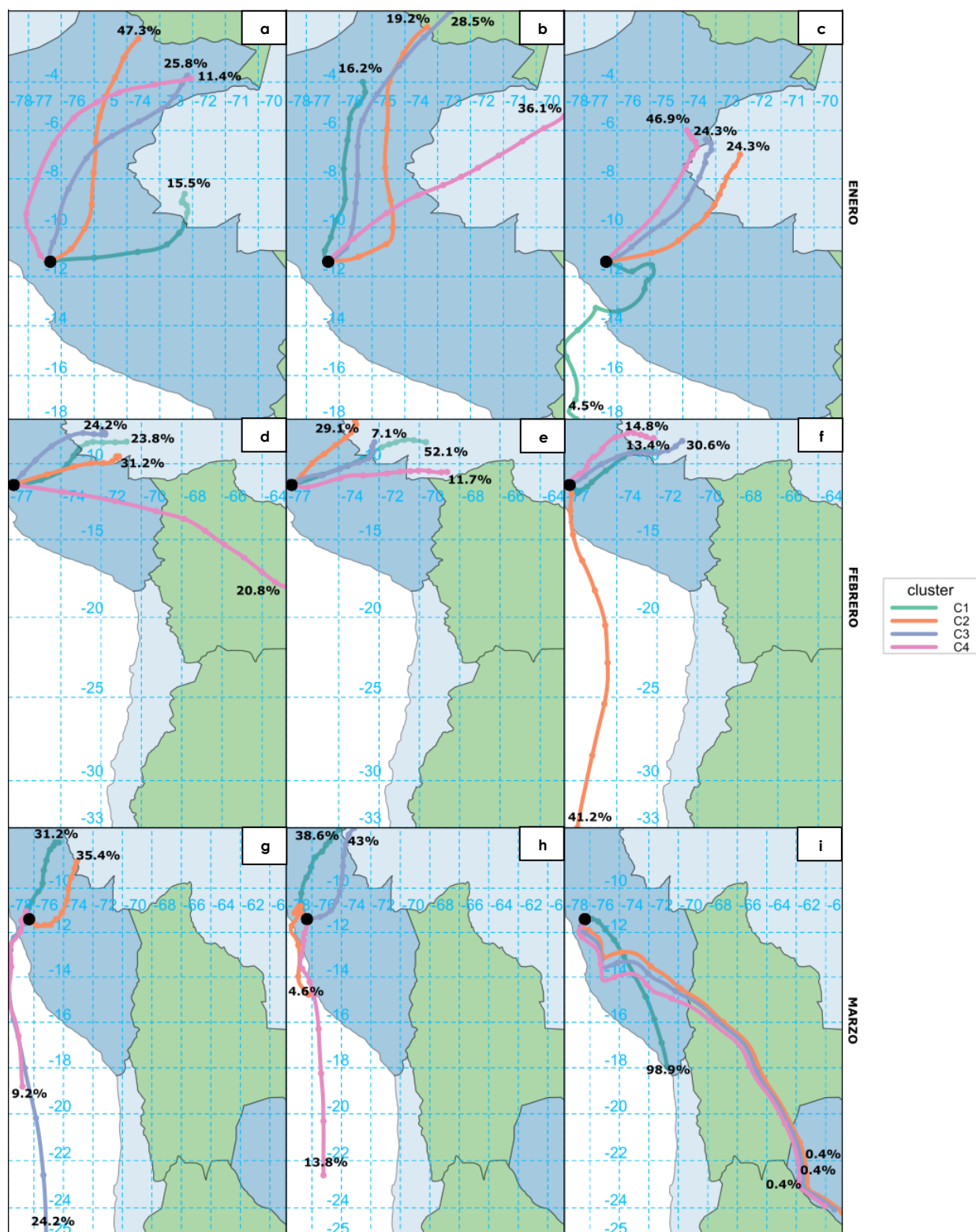
² VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, ENERO: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-107.pdf>

³ VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, FEBRERO: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-108.pdf>

⁴ VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, MARZO: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-109.pdf>

Figuras N° 3d, N° 3e y N° 3f), también se tuvo predominancia de masas de aire provenientes de la dirección noreste (NE), sin embargo, la última decadiaria mostró masas de aire provenientes del sur (S). Finalmente, en marzo (ver Figuras N° 3g, N° 3h y N° 3i), se pudo apreciar la disminución progresiva de las masas de vientos provenientes del noreste (NE), empezando a predominar las provenientes del sur (S).

Figura N° 3 Cluster de retrotrayectorias decadiarias mensuales



III. MONITOREO METEOROLÓGICO LOCAL

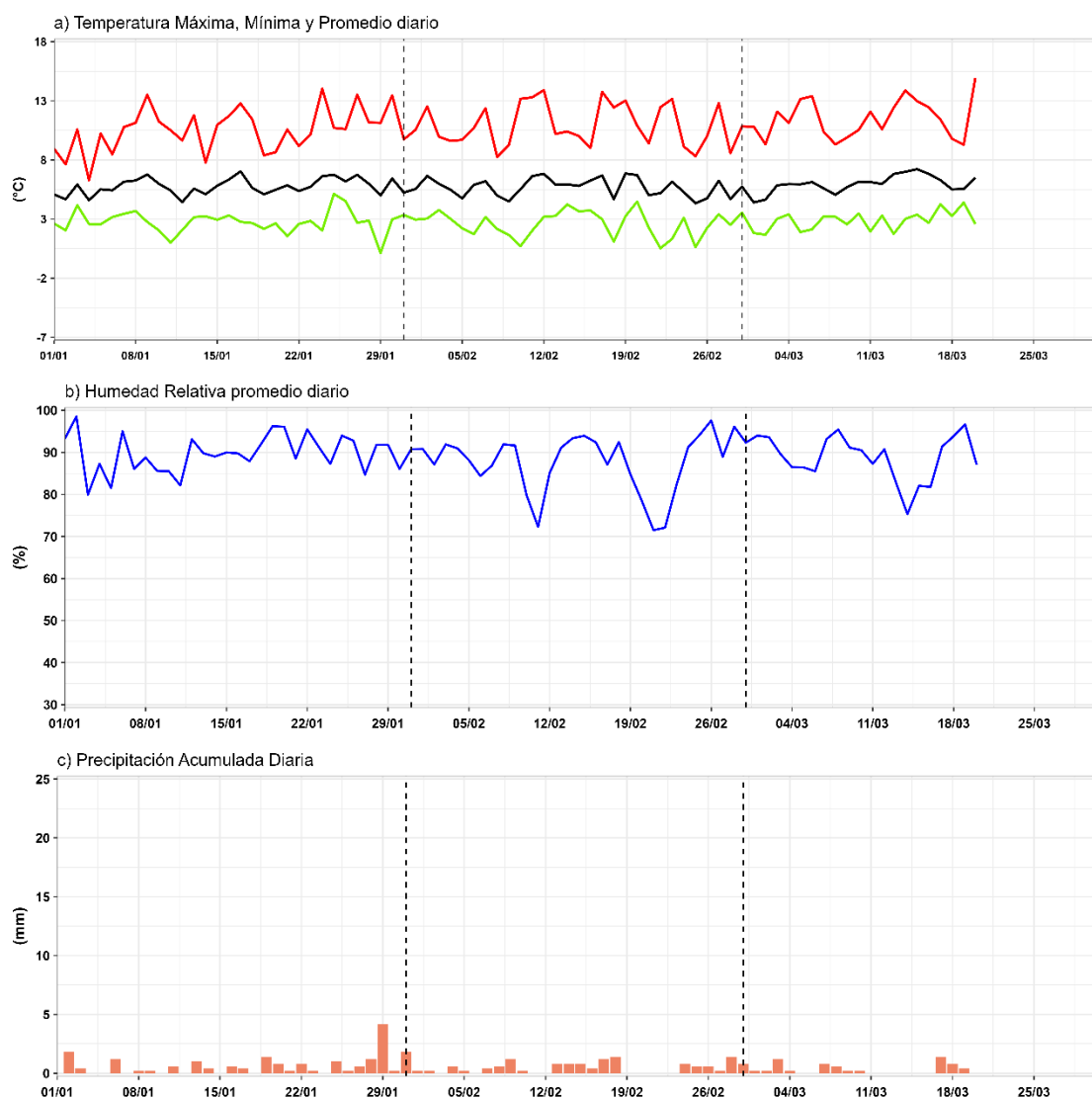
En el primer trimestre del año, con los datos de la Estación Meteorológica Automática del OVA Marcapomacocha se llevó a cabo un análisis de la intensidad de los vientos (m/s), temperatura del aire (°C), humedad relativa (%) y precipitación (mm).

En enero, la temperatura máxima promedio del aire fue 10.5°C y la mínima promedio de 2.7 °C. En febrero, se registró una máxima promedio de 10.9°C y una mínima promedio de 2.6°C. En marzo, la temperatura máxima promedio fue de 11.5°C y la mínima promedio de 2.8°C (Figura N°4a).

En cuanto a la humedad relativa promedio diario, en enero se alcanzó una máxima de 98.5%, una mínima de 79.9% y un promedio de 89.7%. En febrero, se registró una máxima de 97.5%, una mínima de 71.5% y un promedio de 87.6%. En marzo, se registró una máxima de 96.6%, una mínima de 75.3% y un promedio de 88.7% (Figura N°4b).

En relación con la precipitación acumulada diaria, en enero se alcanzó una máxima de 4.2 mm y un promedio de 0.6mm. En febrero, se obtuvo una máxima de 1.4 mm y un promedio de 0.4 mm. En marzo, se obtuvo un máximo de 1.4 mm y un promedio de 0.3 mm (Figura N°4c).

Figura N° 4 Series temporales de las variables meteorológicas

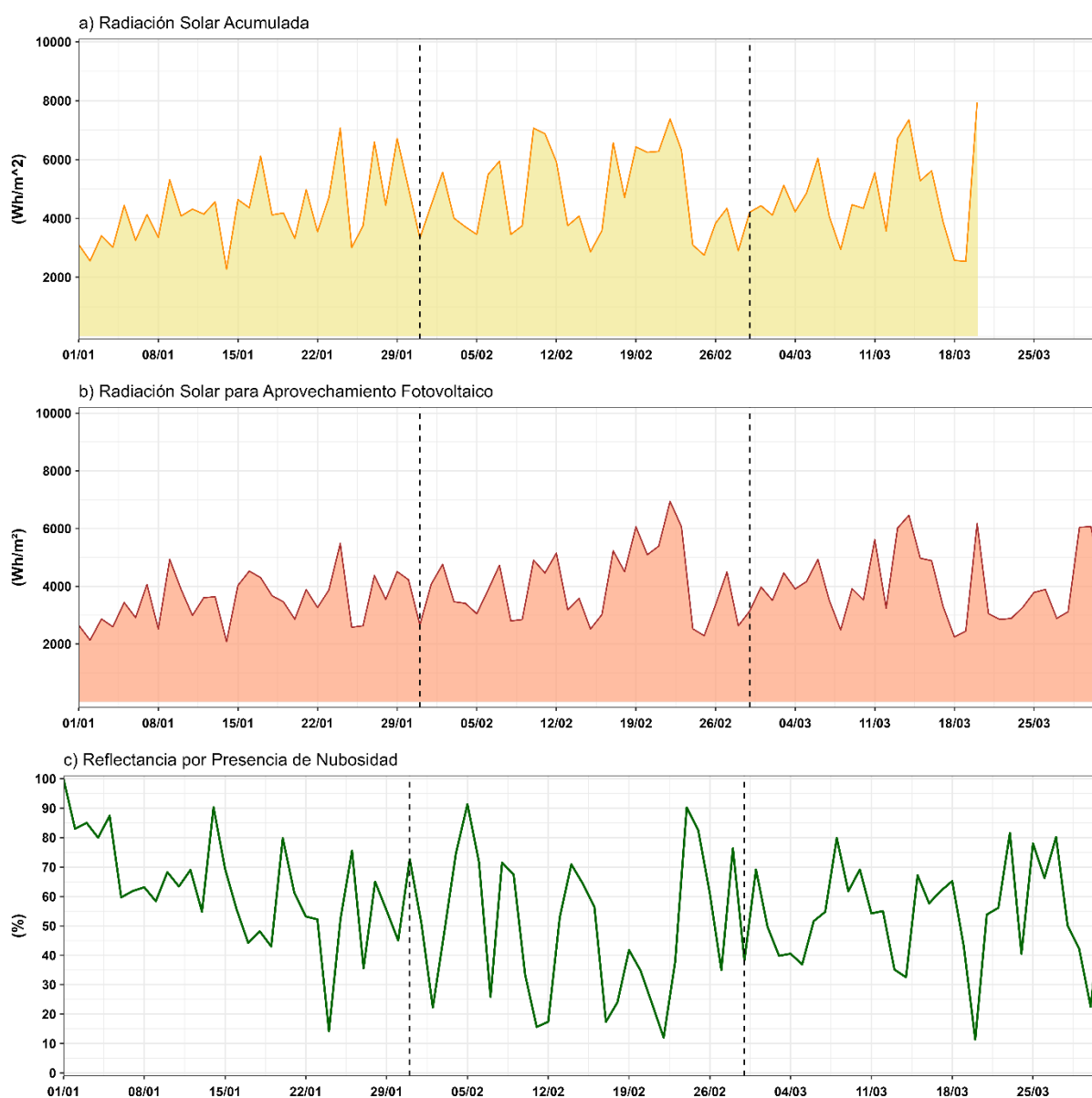


Respecto a la radiación solar global acumulada, para enero se obtuvo una máxima de 7070 W/m² el 24, mientras que el valor mínimo fue de 2270 W/m² alcanzado el 14. Para el mes de febrero, se alcanzó una máxima de 7378 W/m² el 22, mientras que el valor mínimo fue de 2751 W/m² alcanzado el 25. En marzo se alcanzó una máxima de 7941 W/m² el 20, mientras que el valor mínimo fue de 2539 W/m² alcanzado el día (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 5500 W/m² para el 24 de enero, en cambio para febrero se encontró un valor máximo de 6900 W/m² y finalmente para el mes de marzo se encontró un valor máximo de 6400 W/m² (ver Figura N°5b).

Con respecto a la reflectancia por nubosidad se encontró que durante enero se alcanzó un valor máximo de 100% el 01 de enero. En cambio, el mes de febrero se alcanzó un valor máximo de 91.3% para el 5 y para marzo se encontró un valor máximo de 81.5% el 23 (ver Figura N°5c).

Figura N° 5 Series temporales de radiación solar y reflectancia

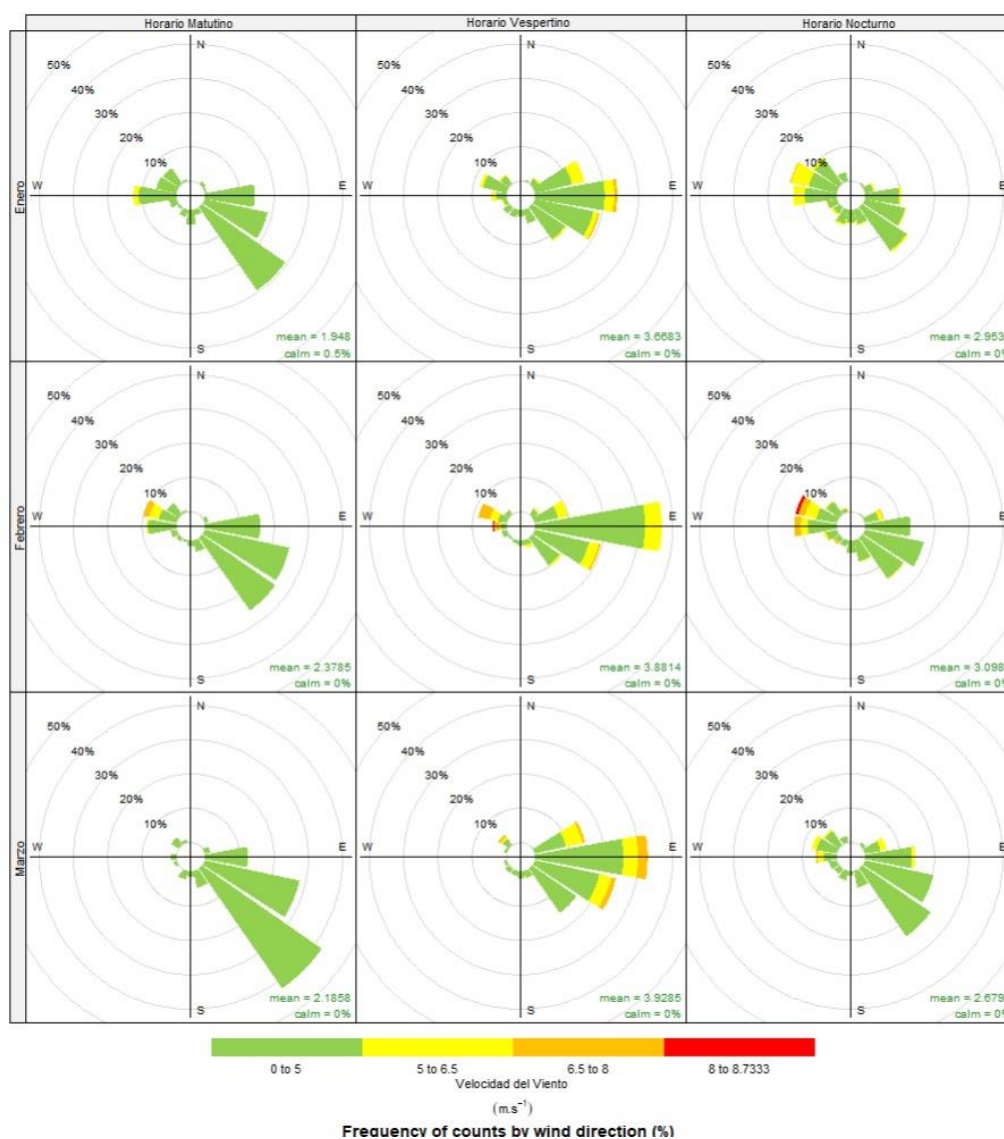


En la Figura N° 6, se observan las rosas de vientos para los periodos matutino (07:00 a 11:59 horas), vespertino (12:00 a 18:59 horas) y nocturno (19:00 a 06:59 horas) de los meses evaluados, en donde las categorías de la intensidad del viento corresponden a: débiles (0 – 5 m/s), moderados (5 – 6.5 m/s), fuertes (6.5 – 8 m/s) y extremos (>8m/s).

Para el horario matutino la dirección del viento predominante en enero, febrero y marzo fue del sureste (SE) con una magnitud de débil; por otra parte, para el horario vespertino se presentó una dirección predominante del este (E) para enero, febrero y marzo con una magnitud de fuerte, moderada y fuerte respectivamente, finalmente para el horario nocturno la dirección predominante para los meses de enero y marzo fue del sureste (SE) con una magnitud de moderada y débil, respectivamente; mientras que, para febrero la dirección predominante fue del este sureste (ESE) con una magnitud de débil.

Las mayores intensidades del viento se alcanzaron en el horario vespertino durante el mes de marzo, con una categoría de extremo.

Figura N° 6 Rosa de vientos



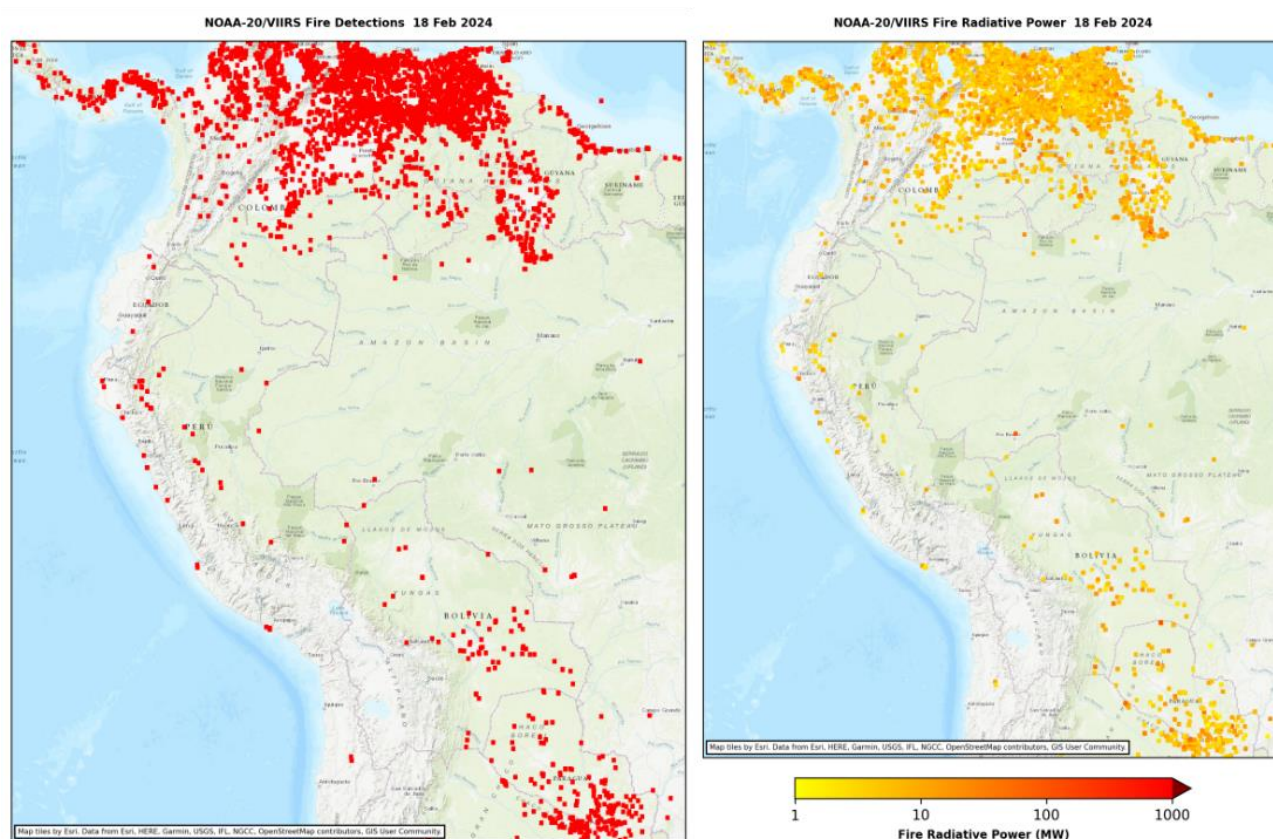
IV. MONITOREO DE FOCOS DE CALOR

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 (CO_2 , CH_4 y N_2O), gases reactivos (CO , NO_2 , NO) e hidrocarburos que actúan como precursores de ozono troposférico, gases que agotan la capa de ozono como cloruro y bromuro de metilo (CH_3Cl y CH_3Br); así como de material particulado⁵.

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 presente año.

En la Figura N°7 se presentan los focos de calor y su potencia radiactiva durante el 18 de febrero de 2024. Por otro lado, en la Figura N° 8 se muestra la serie de tiempo de la cantidad de focos de calor en Perú durante el primer trimestre del año, alcanzando un máximo de 280 focos de calor en enero.

Figura N° 7 Focos de calor y potencia radiactiva



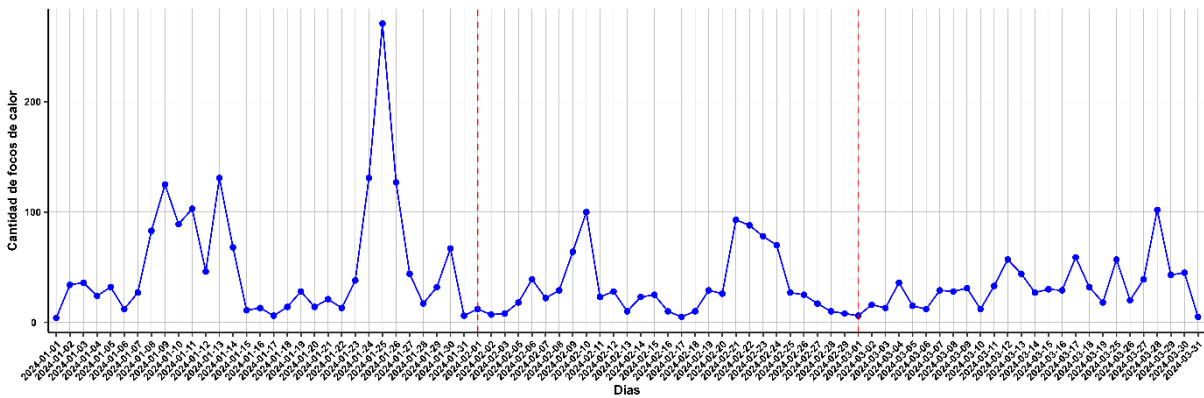
⁵ La quema de biomasa en Sudamérica vista desde el espacio. Obtenido de:

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://noaa-nesdis-n20-pds.s3.amazonaws.com/index.html>

Figura N° 8. Cantidad de focos de calor en el Perú



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

5.1 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



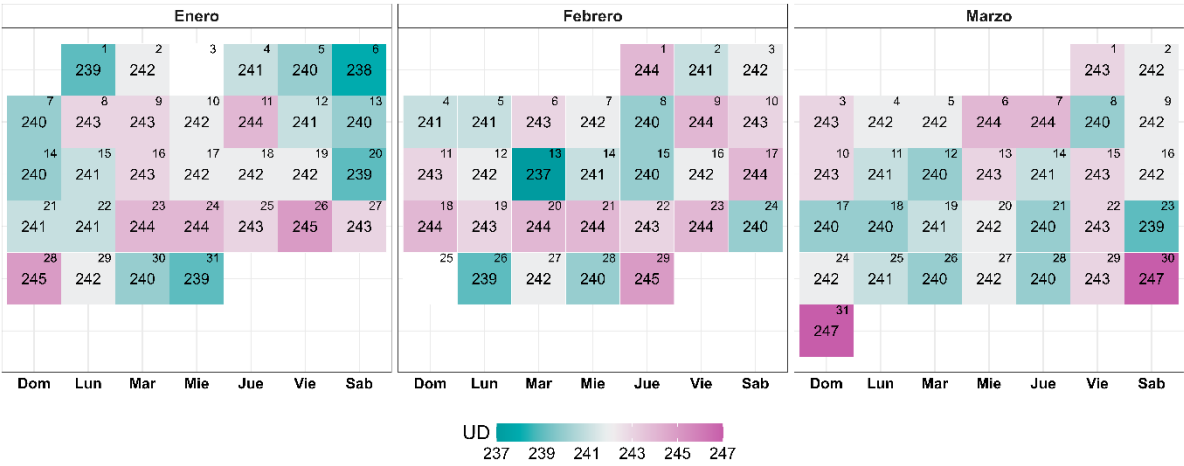
En la Figura N° 10 se presentan los promedios diarios de la CTO en Unidades Dobson (UD) detallados en un calendario correspondiente al primer trimestre del 2024. De esta manera, en enero se observa que los valores mínimos y máximos de la CTO varían entre 238 UD (día 06) y 245 UD (día 26 y 28). Para febrero, los valores oscilaron entre 237 UD (día 13) y 245 UD (día 29) y para marzo, entre 239 UD (día 23) y 247 UD (día 30 y 31). 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}.

⁸ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCOA, ENERO, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-129.pdf>)

⁹ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCOA, FEBRERO, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-130.pdf>)

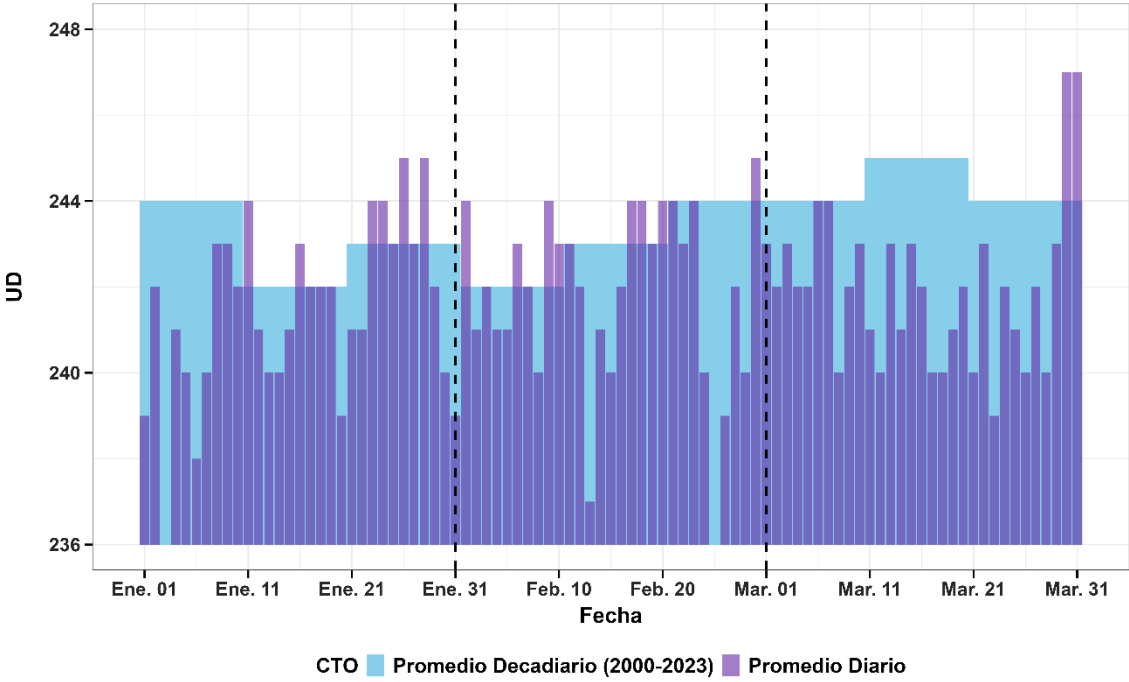
¹⁰ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCOA, MARZO, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-131.pdf>)

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- 2023 (Ver Figura N°11). En ese sentido, se evidencia que en las primeras decadiarias de enero y marzo, así como en la segunda decadiaria de marzo, los valores diarios estuvieron por debajo de su promedio decadiario. Con respecto a las excedencias, se evidencia que los mayores incrementos con respecto a la normal decadiaria, se encuentran en la tercera decadiaria de marzo (día 30 y 31).

Figura N° 11 Variación de promedios diarios de la CTO



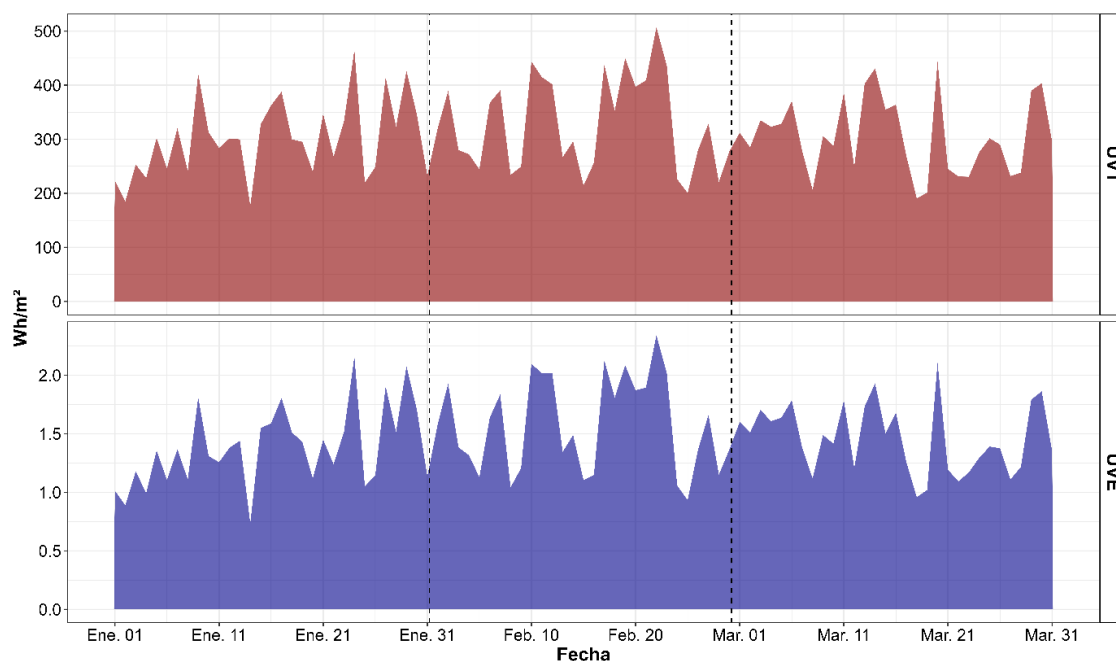
5.2 ÁREA FOCAL DE RADIACIÓN

A. RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

La radiación ultravioleta (UV) se divide en tres bandas principales según la longitud de onda: UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) y UVC (100-280 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 llegar 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.

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 2024. Durante el mes de enero, se observaron valores acumulados entre 0.7 y 2.2 Wh/m² para el UVE y entre 177.3 y 465.1 Wh/m² para el UVT. Con respecto a febrero, se encontraron entre 0.9 y 2.4 Wh/m² para el UVE y entre 200.5 y 507.4 Wh/m² para el UVT. Por su parte, marzo presentó oscilaciones del UVE entre 1 y 2.1 Wh/m²; y del UVT entre 190.7 y 444.3 Wh/m². En general, los mayores valores de la UVE y la UVT se encontraron en la tercera decadiaria de febrero (día 22) y los menores valores en la segunda decadiaria de enero (día 14).

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



Asimismo, en promedio, la UVE representó el 0.47% de la UVT. Es importante señalar que el monitoreo de ambos tipos de radiación UV son complementarios y necesarios para

¹¹ Organización Mundial de la Salud, 2003.

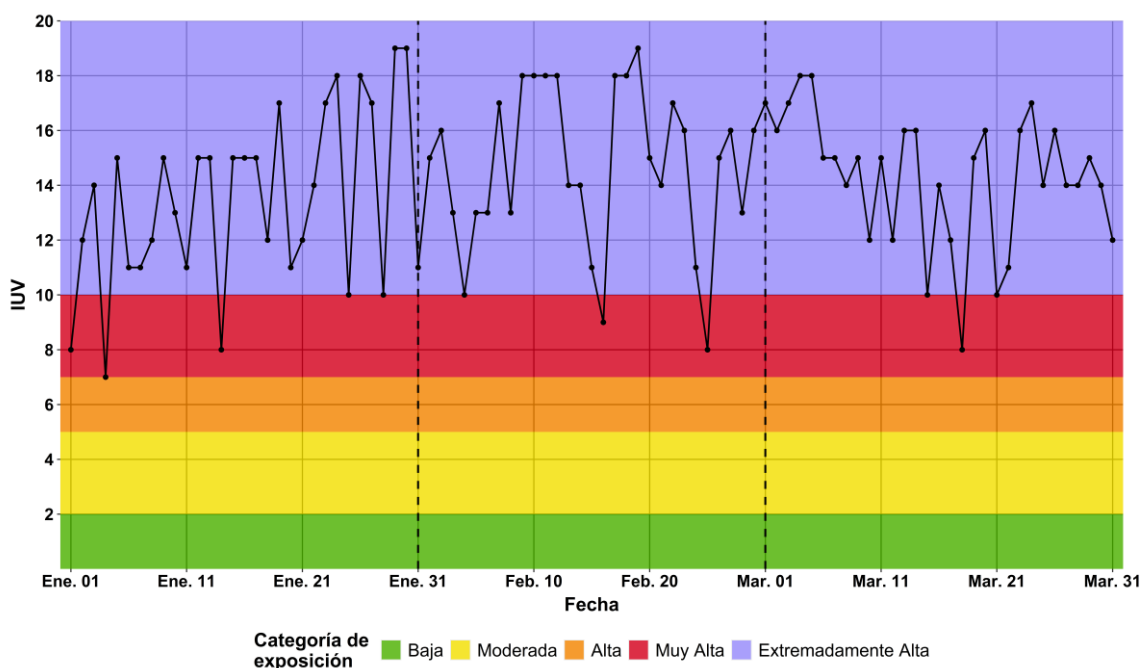
una comprensión integral de los efectos de la radiación UV y para la implementación de medidas adecuadas de protección y mitigación.

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 produzcan. 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 eritemática.

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 7 y 19; para febrero, entre 8 y 19; y para marzo, entre 8 y 18. Los valores altos del IUV se relacionan con la estación de verano y el inicio del otoño en el hemisferio sur.

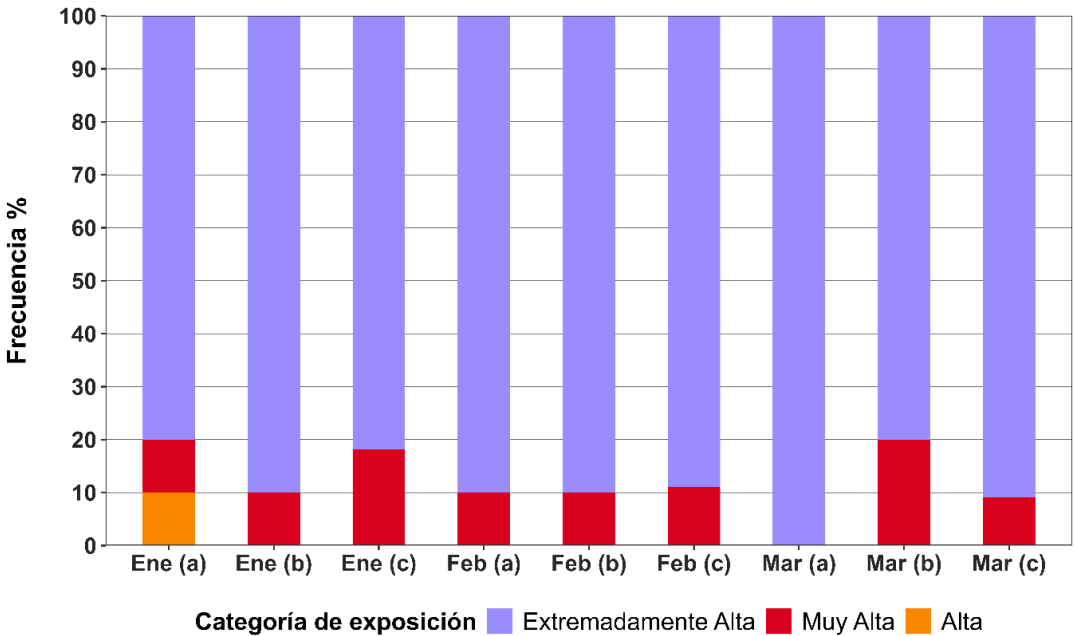
Figura N° 13 Variación de los valores máximos diarios del IUV



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 Marcapomacocha durante las decadiarias (primera (a), segunda (b) y tercera (c)) de los meses de enero, febrero y marzo. Durante cada una de las decadiarias se evidencia una predominancia en la ocurrencia de la categoría de exposición Extremadamente Alta (por lo menos un 80%), siendo la primera decadiaria de marzo, aquella que la presenta en la totalidad de sus días. Asimismo, la segunda categoría en mayor ocurrencia (Muy Alta) se observa en todas las decadiarias, teniendo mayor presencia (20%) en la tercera decadiaria de enero y segunda decadiaria de marzo. Por otro lado, solo se alcanzó la categoría Alta en la primera decadiaria de enero. 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^{12, 13, 14}.

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), dado que se reduce la capacidad para filtrar la radiación ultravioleta, y viceversa, cuando hay valores altos de la CTO tienden a reducirse los valores del IUV. Esto se evidencia en mayor medida en marzo (días 04, 06, 10, 15, 26 y 30).

Por otro lado, altos valores del IUV también podrían estar asociados a condiciones meteorológicas. En ese sentido, podrían estar asociados a una menor presencia de cobertura nubosa, lo cual se traduce en menores valores de reflectancia de la banda 2 del satélite GOES16 (Figura N°5) y viceversa, cuanto hay mayor nubosidad, se presentan menores valores del IUV. Dicha asociación se presenta en la mayoría de días del trimestre evaluado, por ejemplo, en las fechas que se alcanzaron los menores y mayores valores del IUV en enero (04 y 29), febrero (19 y 25) y marzo (04 y 18).

¹² BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAIS, ENERO, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-98.pdf>)
¹³ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAIS, FEBRERO, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-99.pdf>)
¹⁴ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAIS, MARZO, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-100.pdf>)

5.3 ÁREA FOCAL DE GASES REACTIVOS

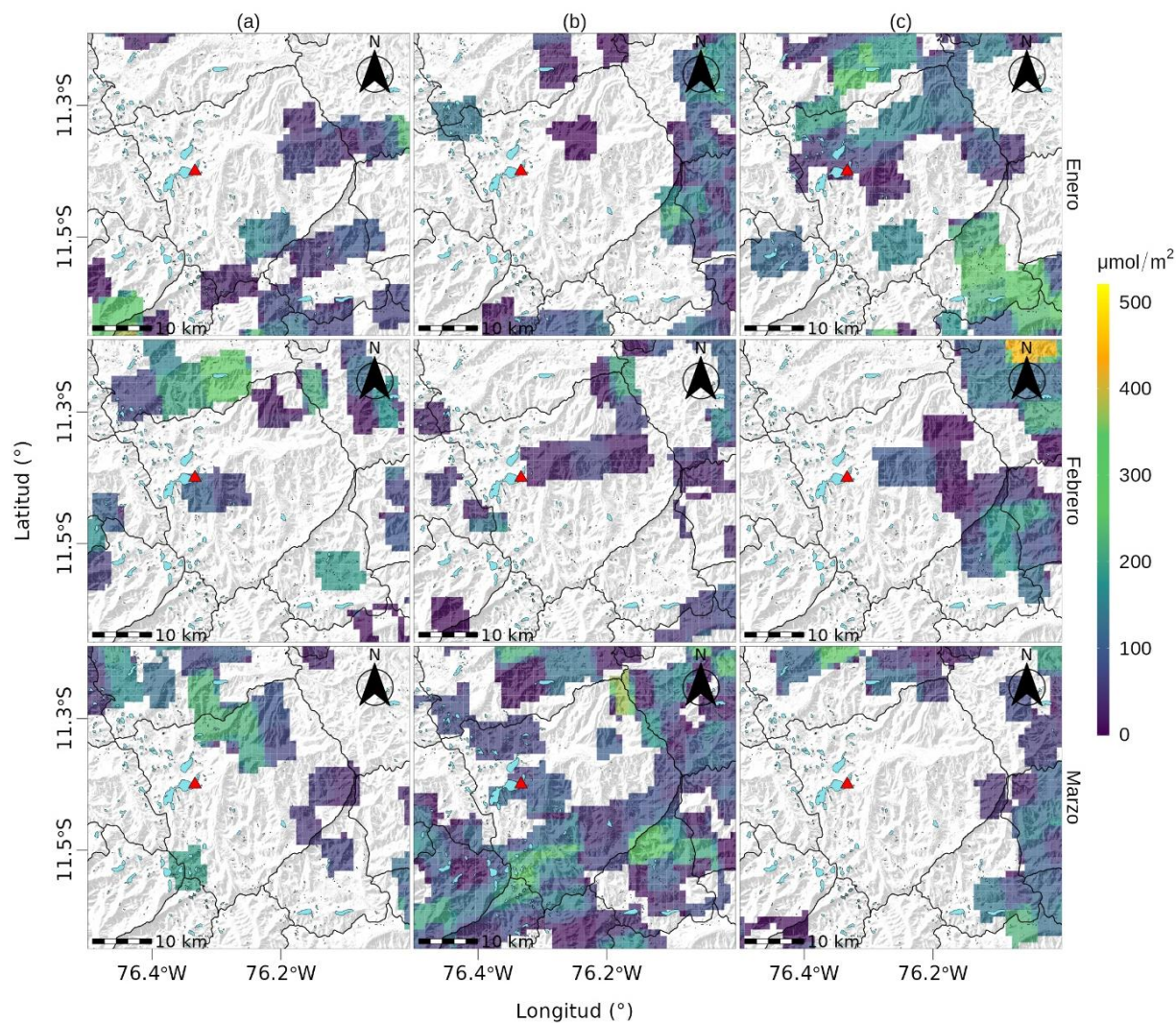
Durante el primer trimestre del año, se ha realizado la vigilancia ambiental atmosférica de los gases reactivos Ozono Troposférico (O_3), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y Dióxido de Azufre (SO_2) mediante equipos del OVA Marcapomacocha y el Instrumento de Monitoreo Troposférico Precursor Copernicus Sentinel-5 (S5p/TROPOMI).

El análisis decadiario de los mencionados gases se desarrolla a continuación:

A. FORMALDEHIDO (HCHO)

En casi todas las decadiarias de los meses de enero, febrero y marzo (ver Figura N°15), se registraron densidades menores a $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ que afectaron al OVA Marcapomacocha. Además, no se detectaron densidades de HCHO que afectaran al OVA Marcapomacocha durante la primera y segunda decadiaria de enero, la tercera decadiaria de febrero, la primera y tercera decadiaria de marzo.

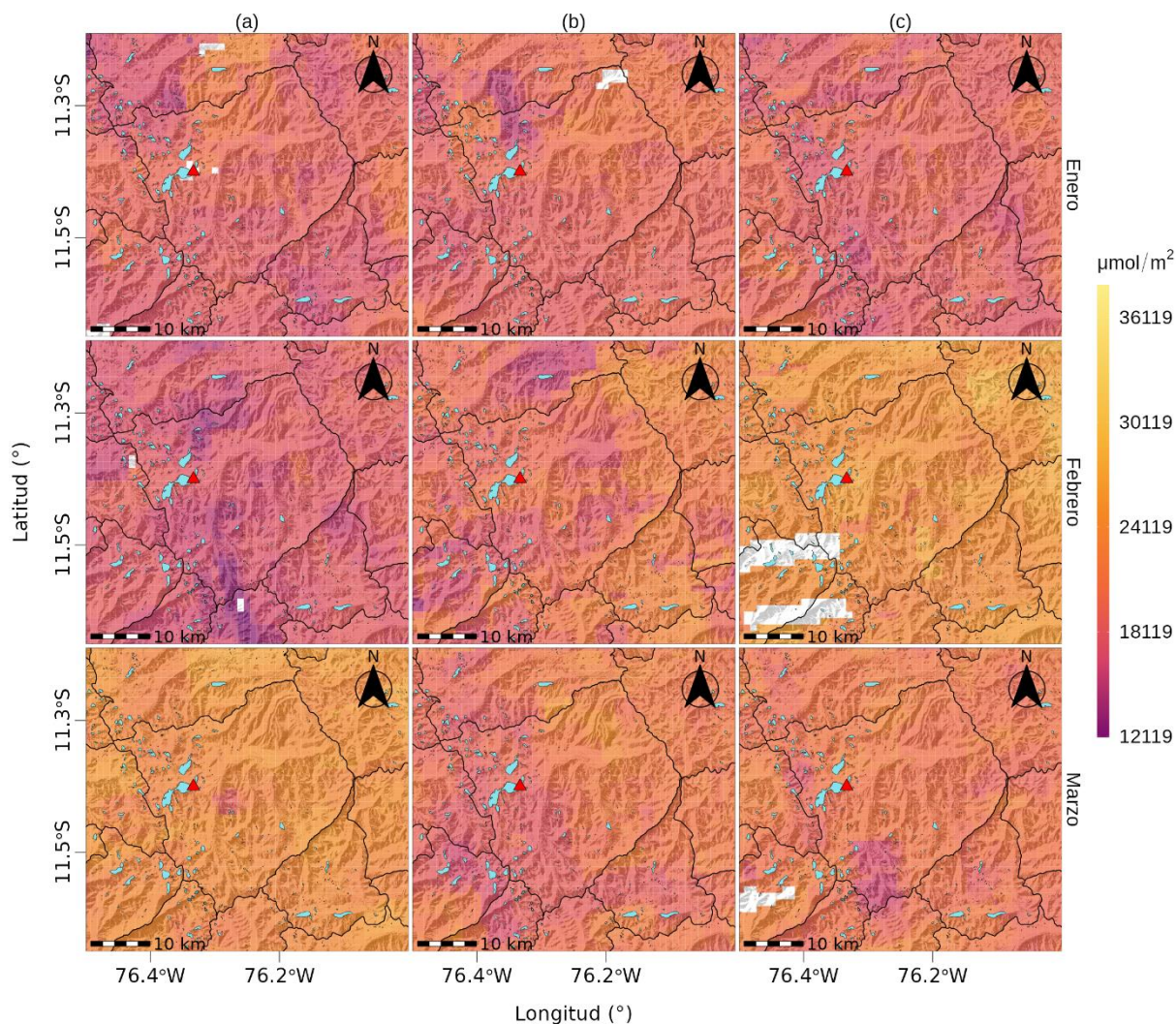
Figura N° 15 Variación espacial decadiaria mensual del HCHO



B. MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El comportamiento de la densidad del CO, en todas las decadiarias de los meses del primer trimestre (ver Figura N° 16), presentaron un valor mínimo de 12119 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. En el mes de marzo se alcanzó el valor de 36119 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, el cual fue el máximo alcanzado durante todo el primer trimestre.

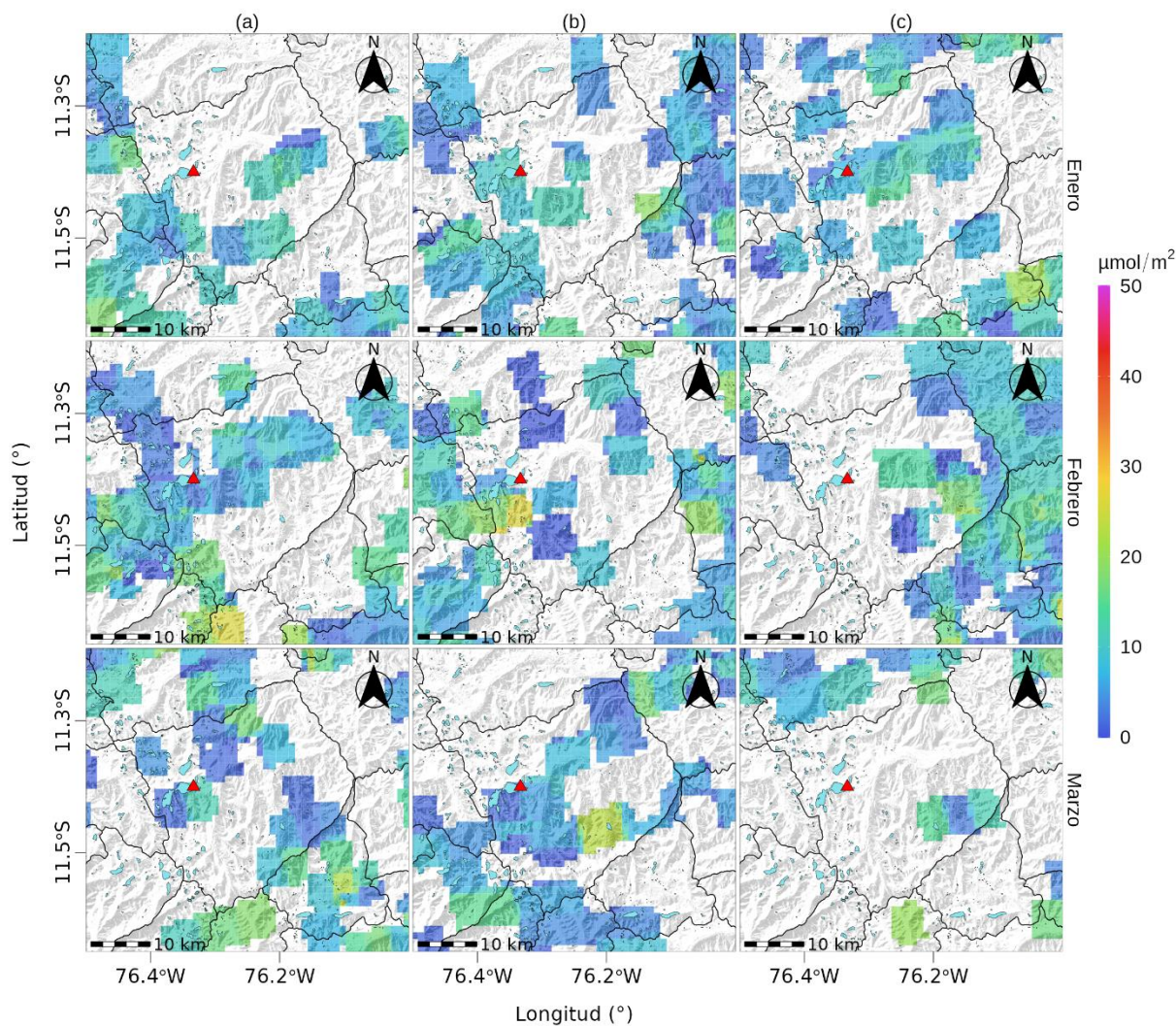
Figura N° 16 Variación espacial decadiaria mensual del CO



C. DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂)

El comportamiento de la densidad del NO₂ que afectaron al OVA Marcapomacocha, en casi todas las decadiarias de los meses de enero, febrero y marzo (ver Figura N°17), fueron menores a 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. Asimismo, no se registraron densidades de NO₂ que impactaran al OVA Marcapomacocha en la primera decadiaria de enero, la tercera decadiaria de febrero y la tercera decadiaria de marzo.

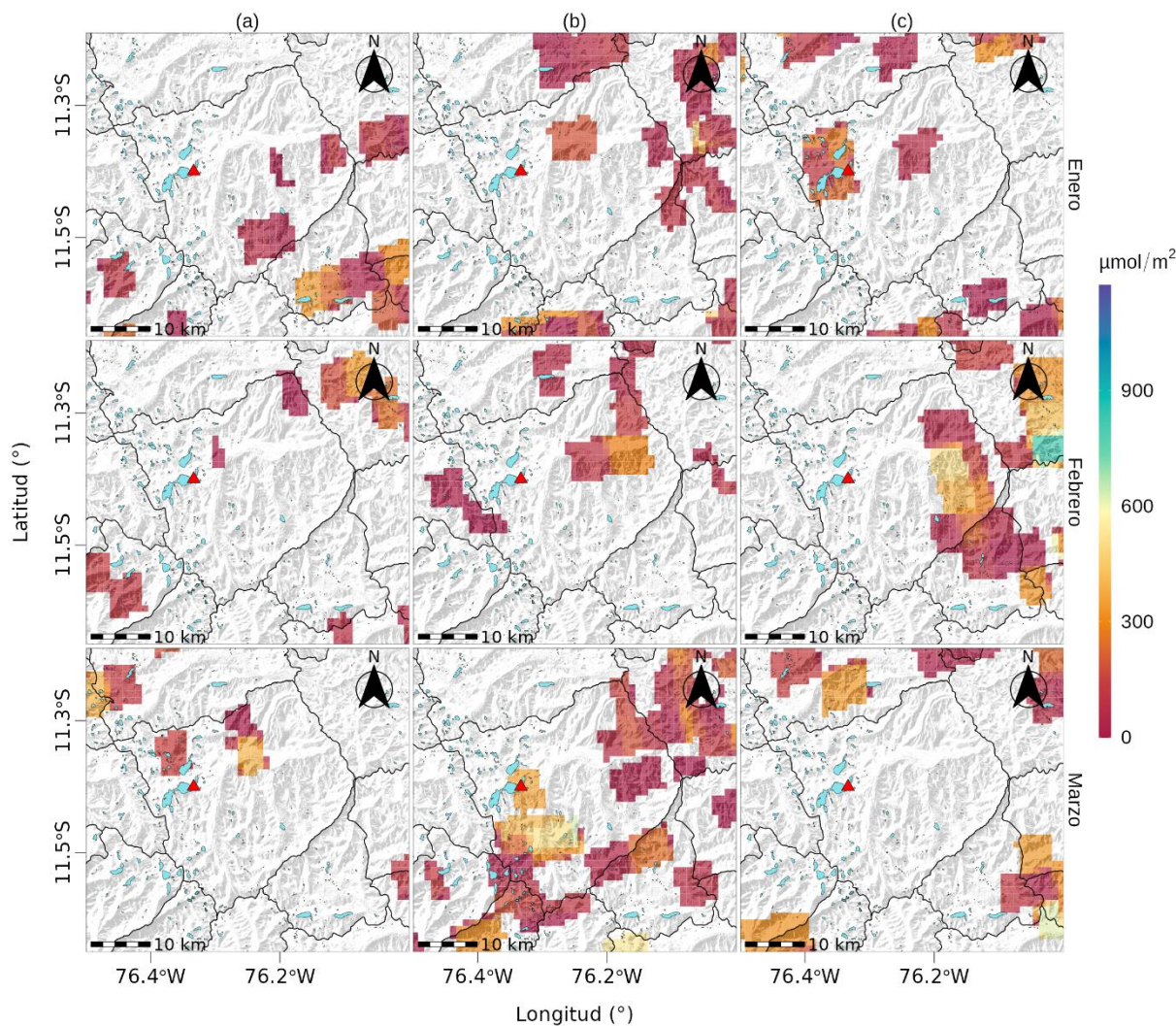
Figura N° 17 Variación espacial decadiaria mensual del NO₂



D. DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

El comportamiento de la densidad del SO₂ que afectaron al OVA Marcapomacocha, en casi todas las decadiarias de los meses de enero y marzo (ver Figura N°18), fue menor a 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. Además, no se registraron densidades de SO₂ que impactaran al OVA Marcapomacocha en la primera y segunda decadiaria de enero, en todas las decadiarias de febrero, y en la primera y tercera decadiaria de marzo.

Figura N° 18 Variación espacial decadiaria mensual del SO₂



5.4 DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA TOTAL

Durante el primer trimestre del año 2024, se ha realizado la vigilancia ambiental atmosférica de la Deposición Atmosférica Húmeda, a través de un muestreador semiautomático (ver Figura N°19) y posterior análisis de las muestras en laboratorio considerando lo estipulado en el Manual Técnico: MT-DMA-001¹⁵.

Figura N° 19 Muestreador de deposición atmosférica



En el Cuadro N°1 y en la Figura N°20a, 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 8.4 respectivamente. Se puede observar que todos los valores de pH registrados se encontraron por encima del umbral (<4.4)¹⁶ de lluvia ácida.

Cuadro N°1 Resultados del muestreo de deposición atmosférica húmeda

Número de muestra	Periodo de muestreo		Variables	
	Inicio	Fin	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad (μS/cm)
1	26/12/2023	02/01/2024	6.7	16.8
2	02/01/2024	09/01/2024	6.4	8.3
3	09/01/2024	16/01/2024	7.4	8.5
4	16/01/2024	23/01/2024	7.2	4.1
5	23/01/2024	30/01/2024	8.3	4.5
6	30/01/2024	06/02/2024	8.4	7.3
7	06/02/2024	13/02/2024	7.6	9.2
8	13/02/2024	20/02/2024	7.5	8.6
9	20/02/2024	27/02/2024	7.5	3
10	27/02/2024	05/03/2024	7.8	2.9
11	05/03/2024	12/03/2024	8.4	4.7
12	12/03/2024	19/03/2024	7.5	4.1
13	19/03/2024	26/03/2024	8.2	4.3
Valor mínimo			6.4	2.9
Valor máximo			8.4	16.8

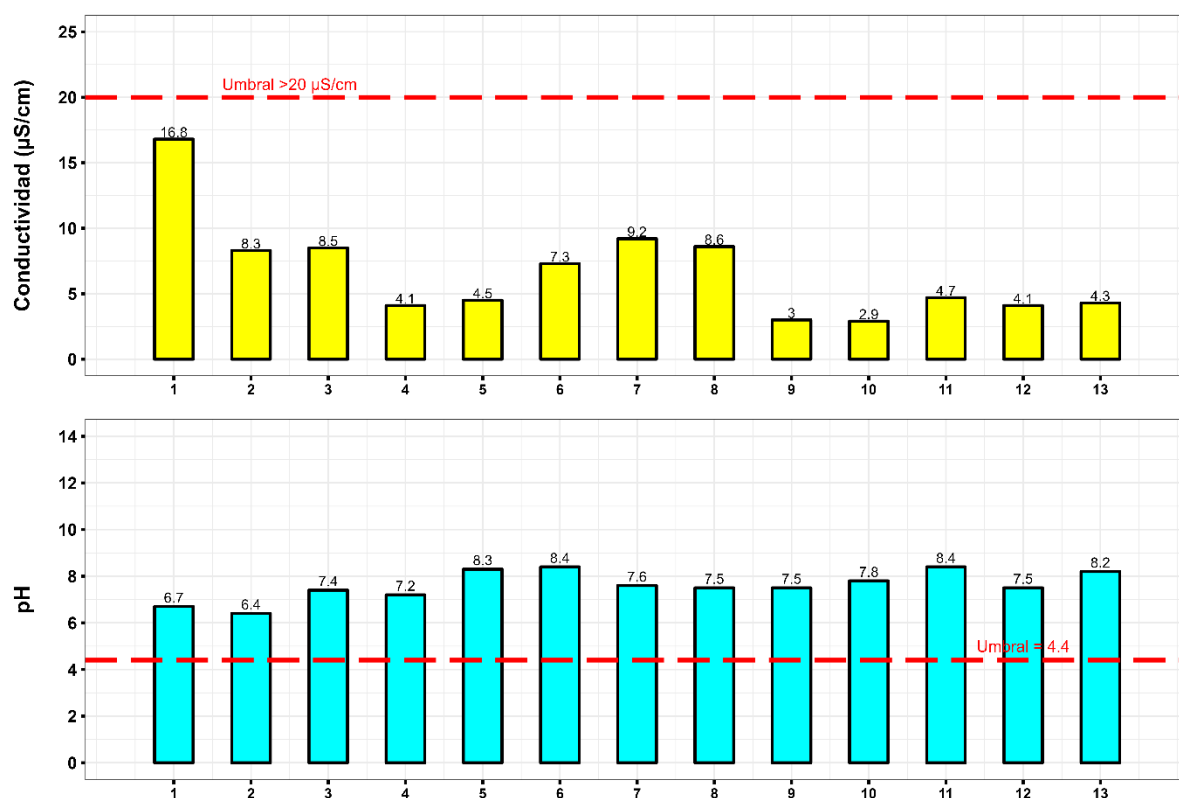
¹⁵ MONITOREO DE LA DEPOSICIÓN HÚMEDA Manual Técnico: MT-DMA-001 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/00711SENA-93.pdf>)

¹⁶ Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (<https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>)

Valor promedio	7.6	6.6
----------------	-----	-----

Respecto a la Conductividad eléctrica de la deposición atmosférica húmeda, en el Cuadro N°1 y la Figura N°20b, se muestran los registros, donde los valores mínimo y máximo fueron 2.9 y 16.8 respectivamente, asimismo, se puede observar que no se registraron valores por encima del umbral de lluvia ácida.¹⁷ Asimismo, la primera muestra registró una conductividad elevada, lo cual podría ser a consecuencia de partículas presentes en el aire probablemente generadas por el uso de pirotecnia durante las fiestas de fin de año.

Figura N° 20. Registros de pH y conductividad eléctrica de la deposición atmosférica húmeda

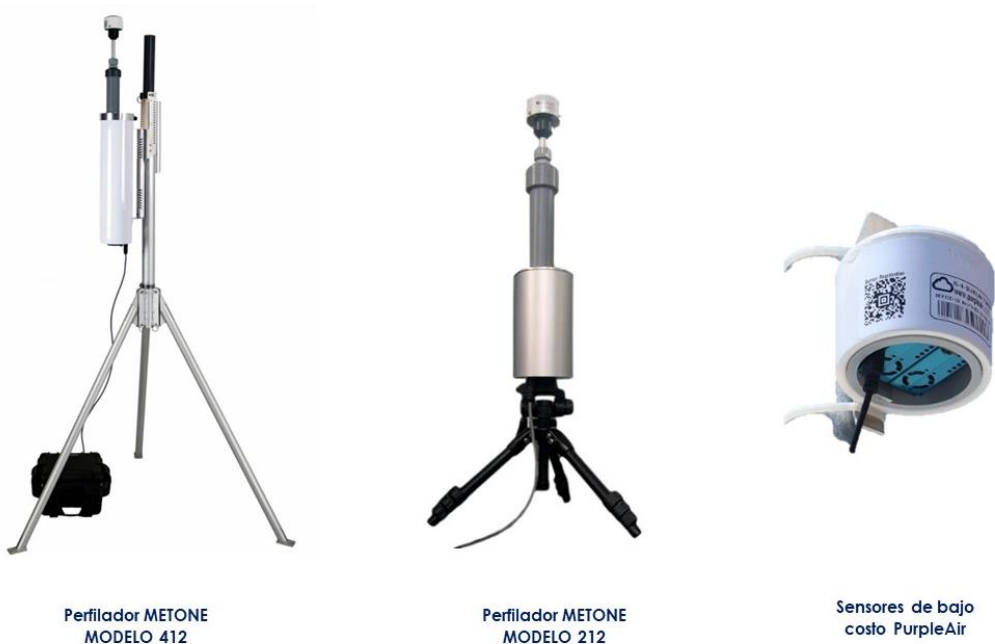


¹⁷ Antolinez, A. y Díaz, C. (2003) Lluvia Ácida en la zona norte de Bogotá.

5.5 ÁREA FOCAL DE AEROSOLES

En el OVA Marcapomacocha, se realiza el monitoreo de aerosoles mediante equipos automáticos (ver Figura N°21) para determinar la concentración en masa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, ver Figura N° 21a y Figura N° 21c) y en número de aerosoles (número de aerosoles/ m^3 , ver Figura N° 21b). Además, se complementa el seguimiento espacial de los aerosoles utilizando el índice de UV Aerosol del instrumento Copernicus Sentinel-5 (S5p/TROPOMI).

Figura N° 21 Equipamiento de aerosoles OVA Marcapomacocha



A. CONCENTRACIONES EN MASA

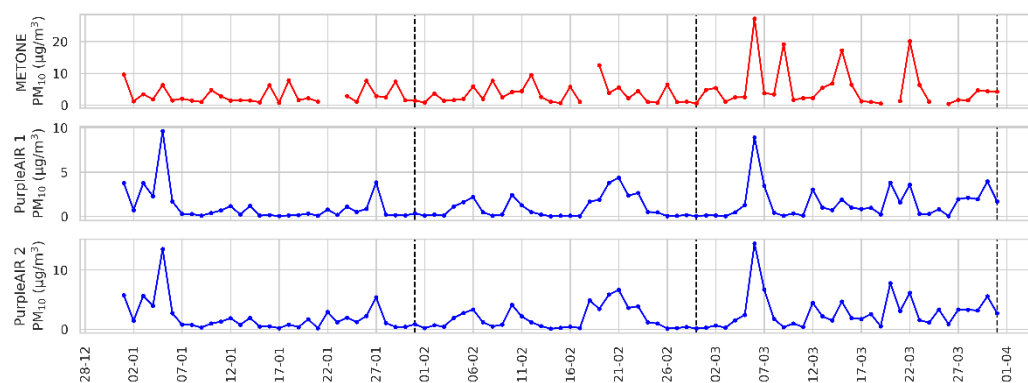
Con los datos del equipo METONE - 412 y dos sensores PurpleAir, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones de PM_{10} (Material Particulado con diámetro menor a 10 micras) y $\text{PM}_{2.5}$ (Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras) registradas en el OVA Marcapomacocha.

Para la ubicación del OVA Marcapomacocha, las partículas finas (diámetro menor a 2,5 micras) están asociadas a la ocurrencia de incendios, 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.

A.1. CONCENTRACIÓN EN MASA PARA EL PM₁₀

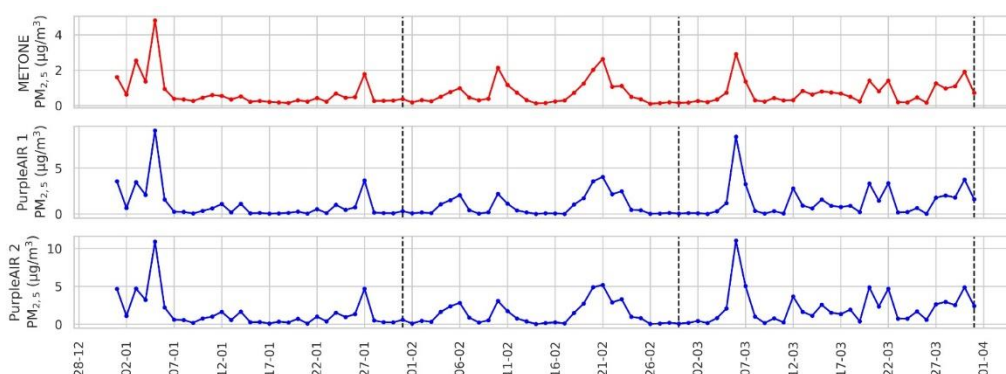
En la Figura N° 22 se observa que durante los meses de enero, febrero y marzo no se registraron concentraciones diarias de PM₁₀ superiores al ECA – aire de 100 µg/m³ (como promedio diario). Se pudo destacar que durante el primer trimestre las concentraciones del PM₁₀, alcanzaron valores máximos diarios de hasta 27.2 µg/m³ (miércoles 6 de marzo) según el perfilador de partículas METONE – 412, mientras que según los registros de los sensores PurpleAir se alcanzaron valores máximos de 9.6 y 14.5 µg/m³ (viernes 5 de enero y miércoles 6 de marzo, respectivamente). Asimismo, se observa que, de manera general, ambos sensores (METONE – 412 y PurpleAir) coinciden que hubo incrementos más destacables durante el mes de marzo.

Figura N° 22 Variación diaria de PM₁₀



A.2. CONCENTRACIÓN EN MASA PARA EL PM_{2.5}

Respecto al PM_{2.5}, en la Figura N° 23 se observa que durante los meses de enero, febrero y marzo no se registraron concentraciones diarias de PM_{2.5} superiores al ECA – aire de 50 µg/m³ (como promedio diario). Se pudo destacar que durante el primer trimestre las concentraciones del PM_{2.5}, alcanzaron valores máximos diarios de hasta 4.8 µg/m³ (viernes 5 de enero) según el perfilador de partículas METONE – 412, mientras que según los registros de los sensores PurpleAir se alcanzaron valores máximos de 9.1 y 11.1 µg/m³ (viernes 5 de enero y miércoles 6 de marzo, respectivamente). Asimismo, se observa que de manera general hubo un mayor incremento de las concentraciones durante la primera decadiaria de enero, seguido de la tercera y primera decadiaria de marzo.

Figura N° 23 Variación diaria de PM_{2,5}

En la mayoría de los casos, se registran bajas concentraciones de PM_{2,5} y PM₁₀ para esta zona, debido a las características propias del entorno del observatorio y a la escasa actividad antropogénica cercana. Las concentraciones más altas de PM₁₀ estarían relacionadas en su mayoría al desarrollo de actividades tales como quema de pastos, tránsito de grandes cantidades de animales alrededor del observatorio o al paso de vehículos por el camino de trocha, lo cual podría producir la resuspensión de polvo existente en la zona, mientras que en el caso de PM_{2,5} estarían relacionadas a ocurrencia de incendios.

B. CONCENTRACIÓN EN NÚMERO DE AEROSOL

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 masa^{18 19}. 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)²⁰: 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 ($10,0 \mu\text{m} \leq d < 20,0 \mu\text{m}$)²¹. En este contexto, la concentración en número de partículas se expresa como el total de partículas por unidad de volumen de aire.

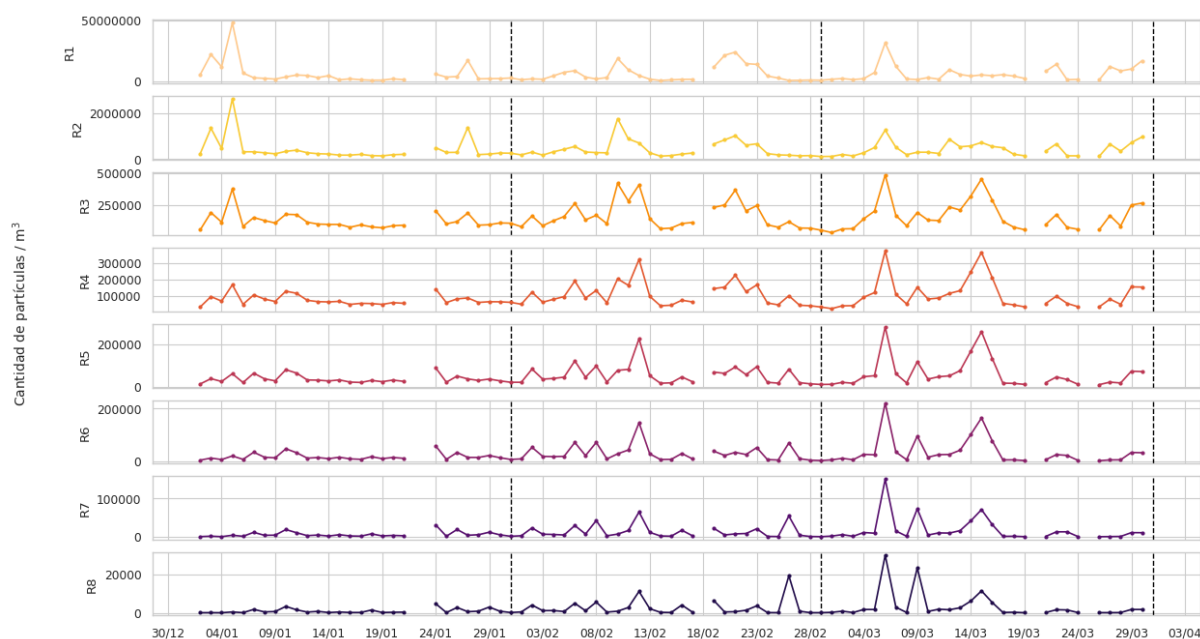
¹⁸ "[...] Dado que la concentración de masa de las partículas ultrafinas es insignificante en comparación con la de las partículas de mayor tamaño, parece más adecuado correlacionar su concentración numérica con los efectos sobre la salud en lugar de su concentración de masa [...]". Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231097002604>

¹⁹ UK AIR Air Information Resource (2022). Particle Numbers and Concentrations Network. Revisado el 1 de octubre del 2022 desde: <https://bit.ly/3D80Ap4>

²⁰ El diámetro aerodinámico es un indicador del tamaño de la partícula (World Health Organization Europe, 2005).

²¹ 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° 24 Concentración en número de aerosol



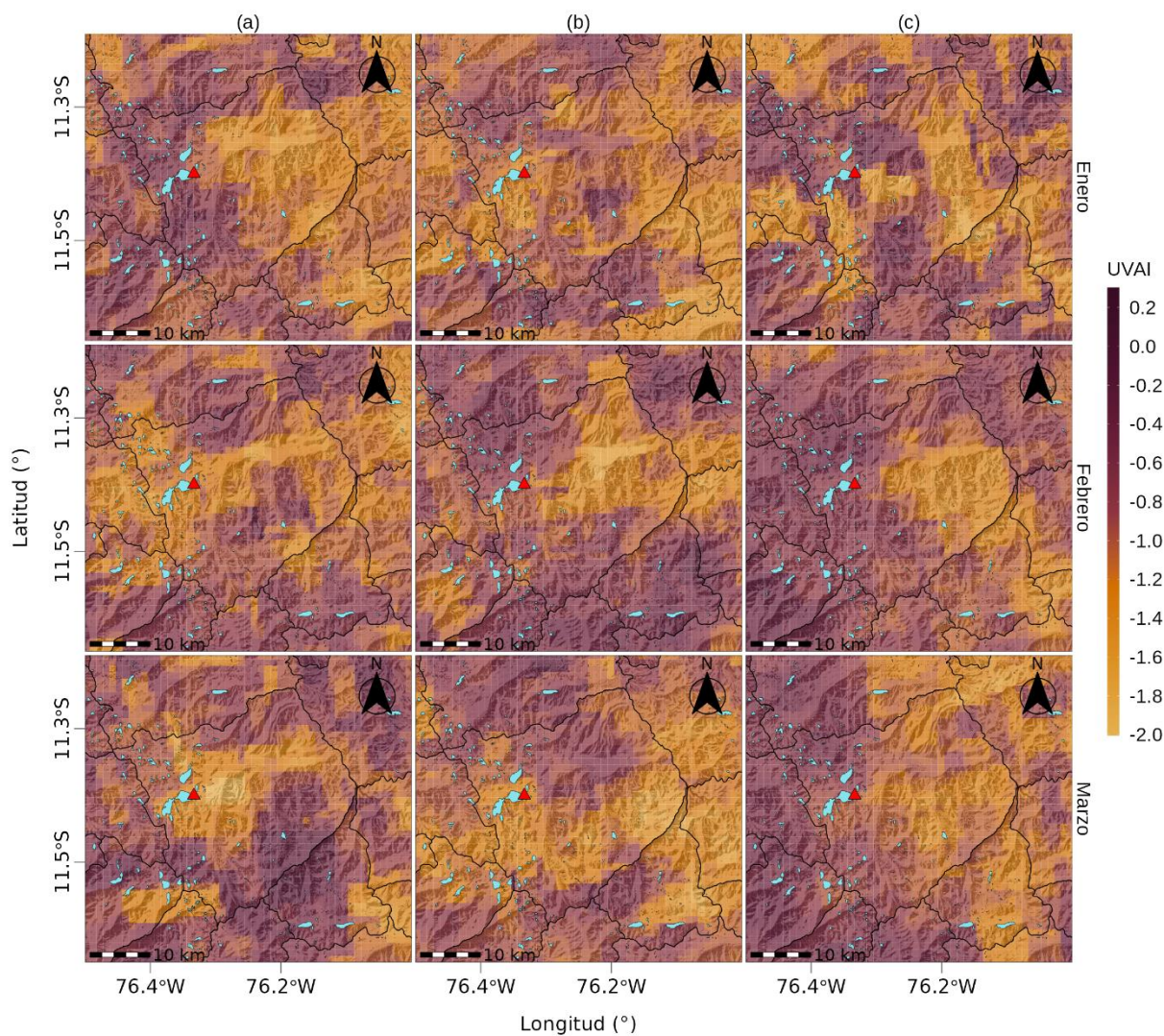
Durante el primer trimestre (ver Figura N°25), las mayores concentraciones promedio del día en número de partículas registradas fueron las del rango R 1, siendo el valor máximo registrado, 47 841 690 partículas/m³ durante el 5 de enero. Así mismo, para el rango R2 se registró un máximo de 2 627 640 partículas/m³ también el 5 de enero. Por otro lado, para los rangos R 3, R 4, R 5, R 6, R 7 y R 8, las cantidades máximas se registraron durante el 6 de marzo, siendo 484 595 partículas/m³, 373 769 partículas/m³, 279 568 partículas/m³, 220 727 partículas/m³, 150 344 partículas/m³ y 30 032 partículas/m³, respectivamente.

Para la ubicación del OVA Marcapomacocha, las partículas finas (diámetro menor a 2,5 micras) están asociadas a la ocurrencia de incendios, incluyendo los incendios forestales ocurridos en otras latitudes. 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.

C. INDICE UV DE AEROSOLES

Por otro lado, mediante el índice UV Aerosol (UVAI, ver Figura N°26), se puede observar la predominancia de aerosoles no absorbentes²² en todas las decadiarias de los meses del primer trimestre, alcanzando valores máximos de hasta -2.0.

Figura N° 25 Índice de Aerosoles (UVAI)



²² Aerosoles No Absorbentes: Los aerosoles no absorbentes son partículas microscópicas suspendidas en la atmósfera que no tienen la capacidad de absorber la radiación solar. En lugar de absorber la luz, estos aerosoles dispersan la radiación en diferentes direcciones. Esta dispersión puede afectar la cantidad de luz solar que llega a la superficie terrestre y, en consecuencia, influir en el balance energético de la atmósfera.

D. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL AMLC

El índice de calidad del aire (ICA), está basado en valores establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA por sus siglas en inglés). Los ICAs son valores que permiten informar el estado de la calidad del aire, permitiendo a la población conocer que tan limpio o saludable está el aire y los efectos que podría causar en la salud ²³ ²⁴. Para la presentación del índice de calidad del aire se consideró los promedios diarios de los valores de concentración en masa registrados por el METONE – 412.

ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM₁₀

La Figura N°27 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM₁₀ asociados a su respectivo estado de la calidad del aire, en la cual se observa que durante el mes de enero se presentó 29 días una calidad del aire “Buena”, durante el mes de febrero se presentó 28 días una calidad del aire “Buena” y finalmente en el mes de marzo se presentó 29 días una calidad del aire “Buena”.

Figura N° 26 Estados de calidad del aire para PM₁₀



Concentración PM ₁₀ (µg/m³)		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
355	424	Muy Insalubre	201	300

²³ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/aqi_brochure_02_14_0.pdf

²⁴ 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>

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

La Figura N° 28 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM_{2.5} asociados a su respectivo estado de la calidad del aire, en la cual se observa que durante el mes de enero se presentó 31 días una calidad del aire “Buena”, durante el mes de febrero se presentó 29 días una calidad del aire “Buena” y finalmente en el mes de marzo se presentó 31 días una calidad del aire “Buena”.

Figura N° 27 Estados de calidad del aire para PM_{2.5}



Concentración PM _{2.5} (µg/m³)		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
125.5	225.4	Muy Insalubre	201	300

VI. CONCLUSIONES

- Durante el primer trimestre del año, las masas de aire mostraron una tendencia de origen variable: en enero y la primera decadiaria de febrero, predominaron del noreste (NE), mientras que a partir de la segunda decadiaria de febrero se asentaron las direcciones provenientes del este (E) y en marzo, las direcciones se diversificaron, con influencias notables del sur (S).
- En el OVA Marcapomacocha, se observó una variabilidad en las condiciones meteorológicas locales: los vientos mostraron intensidades más altas en febrero, especialmente durante el horario Vespertino y Nocturno; la temperatura del aire se mantuvo estable con ligeras variaciones, alcanzando un máximo en marzo; la humedad relativa presentó valores altos en general (>80%), con leves disminuciones en febrero y marzo; y la precipitación fue escasa en enero, febrero y marzo.
- El mes de enero se alcanzó el valor máximo de focos de calor del primer trimestre 2024.
- El análisis de la CTO en el OVA Marcapomacocha durante el primer trimestre de 2024 muestra que los valores promedio diarios se mantuvieron por encima de 220 UD, indicando la ausencia de agujeros de ozono. En ese sentido, los mayores valores del trimestre se encontraron en la tercera decadiaria de marzo (día 30 y 31) por encima de su normal climática; mientras que los valores más bajos se encontraron en la primera decadiaria de enero (día 06) y la segunda decadiaria de febrero (día 13), ambos por debajo de su normal climática.
- La radiación UVE y UVT alcanzaron sus mayores valores en la tercera decadiaria de febrero (día 22) y los menores valores en la segunda decadiaria de enero (día 14). Asimismo, en promedio durante el trimestre, la radiación UVE representó el 0.47% de la radiación UVT.
- Durante el primer trimestre del 2024, el IUV máximo diario se mantuvo predominantemente en la categoría Extremadamente Alta, siendo la primera decadiaria de marzo, aquel periodo que la presentó en su totalidad.
- Durante el primer trimestre del año, las densidades de HCHO, CO, NO₂ y SO₂ presentaron variaciones significativas en diferentes decadiarias, con algunas alcanzando valores máximos notables. Sin embargo, se observaron períodos sin presencia de estos contaminantes, especialmente en ciertas decadiarias, lo que sugiere que existen fluctuaciones en la calidad del aire que afectan al OVA Marcapomacocha.
- Durante el primer trimestre del 2024, los valores de pH y Conductividad Eléctrica obtenidos para deposición atmosférica húmeda no evidenciaron presencia de lluvia ácida.
- Durante el primer trimestre, se registró las mayores concentraciones de PM₁₀ durante el mes de marzo, mientras que para PM_{2.5} las mayores concentraciones se registraron durante la primera decadiaria de enero y primera decadiaria de marzo. En todo el primer trimestre del año, el OVA Marcapomacocha permaneció con una calidad del

aire “Buena” tanto para PM_{10} como para $PM_{2.5}$. De acuerdo con el contexto regional de este trimestre, los valores más altos de concentración estarían asociados a los incendios forestales ocurridos en los países de Colombia y Venezuela o debido a la resuspensión de polvo por paso de vehículos o acción de los vientos.

.....

Para más información sobre el presente boletín, contactar con:

Jhojan Pool Rojas Quincho (jprojas@senamhi.gob.pe)

Subdirector de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico

Elaboración

Elvis Anthony Medina Dionicio (eamedina@senamhi.gob.pe)

José Hitoshi Inoue Velarde

Hanns Kevin Gómez Muñoz

Maria Urteaga Tirado

Sháneri Sheyla Sánchez Calderón

Dayana 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 MARCAPOMACOCCHA** en el siguiente enlace:

https://docs.google.com/forms/d/1ep1Gdkz_s1W7L-xUbRJkJs4LovFal85AbGaR7sjskA/viewform?chromeless=1&edit_requested=true

Próxima actualización: Julio del 2024

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

