



Boletín Nacional Monitoreo de la Calidad de Agua de Lluvia

Enero - Marzo 2025



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



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) presenta el boletín nacional trimestral Monitoreo de la Calidad de Agua de Lluvia con la finalidad de informar a las autoridades, agricultores, profesionales y población en general sobre la composición química de la lluvia (grado de acidez y alcalinidad de la lluvia) en diferentes lugares del Perú durante el primer trimestre del 2025; la vigilancia de la calidad de agua de lluvia depende de la presencia de precipitaciones, por lo tanto el análisis de muestras estará determinado por la presencia de éstas en los puntos de monitoreo.

Para un mejor entendimiento de las variables espaciales se utilizó información meteorológica de superficie (datos de las estaciones meteorológicas automáticas del SENAMHI); asimismo, se realizó un análisis sinóptico a partir de la documentación técnica del SENAMHI para el primer trimestre^{1,2,3}, se realizó análisis de focos de calor⁴ y análisis de las salidas del modelo híbrido de trayectoria integrada lagrangiana de una sola partícula⁵. Con respecto a la información del pH se usó información de la Red de Monitoreo de la Calidad de Agua de Lluvia (REMCAL) del SENAMHI la cual cuenta con tres puntos de monitoreo a nivel nacional situados en los departamentos de Loreto, Junín y Lima.

¹ Informe de Vigilancia Sinóptica de Sudamérica – Enero 2025. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-119.pdf>

² Informe de Vigilancia Sinóptica de Sudamérica – Febrero 2025. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-120.pdf>

³ Informe de Vigilancia Sinóptica de Sudamérica – Marzo 2025. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-12.pdf>

⁴ Sistema de información sobre incendios para la gestión de recursos (FIRMS, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA).

⁵ Hysplit (por sus siglas en inglés, Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA)

I. ANÁLISIS SINÓPTICO

Para un mejor entendimiento de las condiciones sinópticas de los puntos de monitoreo se han analizado los patrones atmosféricos ligados a éstos, por lo tanto, a continuación, se brindarán detalles de los flujos a niveles medios (patrones ligados a la sierra centro oriental), flujos en niveles bajos presentados en el centro de Sudamérica y superficiales desarrollados en el pacífico oriental. En ese sentido, a continuación, se detalla las condiciones sinópticas ocurridas durante el trimestre enero – marzo.

ENERO

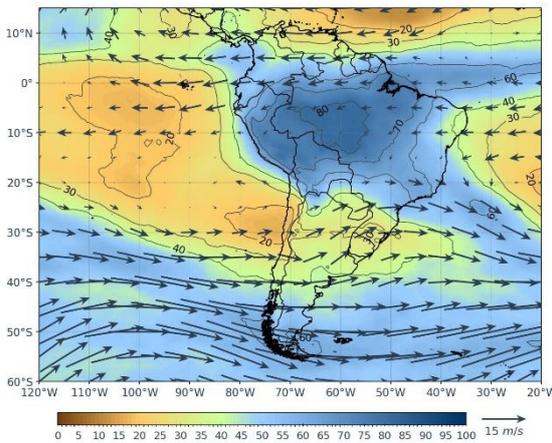


Figura 1: Flujos a niveles medios - Enero.

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; por otro

lado, sobre gran parte del resto del continente propiciaron el ingreso de aire seco con valores por debajo del 50% de humedad, principalmente al este de Brasil, centro y norte de Chile y Argentina, Paraguay, Uruguay y países del norte de Sudamérica.

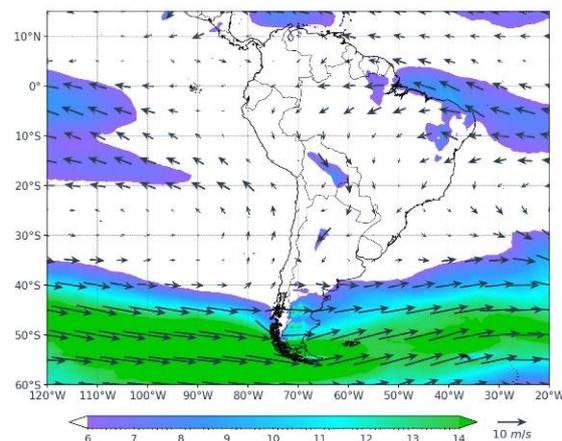


Figura 2: Flujos a niveles bajos – Enero.

En niveles bajos, a 850 hPa, predominaron flujos de componente este sobre el norte de Sudamérica aportando humedad proveniente del Atlántico sobre países del norte y centro del continente. En superficie, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) predominó con configuración zonal y núcleo en los 31°S y 92°W, desplazado ligeramente hacia el noreste de su posición climática, con una intensidad de alrededor de los 1020 hPa (similar respecto a su promedio); asimismo, el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS), se presentó ligeramente

desplazado al este de su posición climática y con una intensidad dentro de su climatología. Por otro lado, no se reflejó el paso de altas migratorias (AM) durante el mes.

FEBRERO

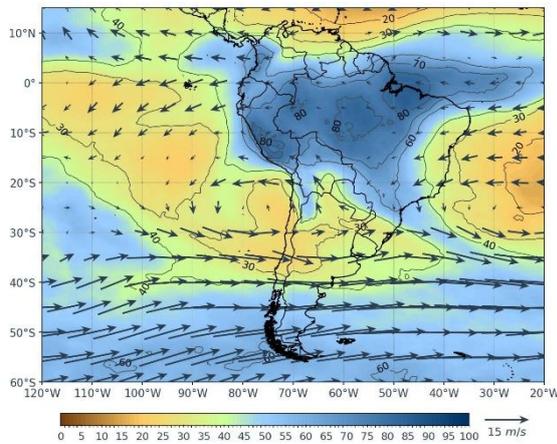


Figura 3: Flujos a niveles medios – Febrero.

por otro lado, sobre gran parte del resto del continente propiciaron el ingreso de aire seco con valores por debajo del 50% de humedad, principalmente al este de Brasil, centro y norte de Chile y Argentina, Paraguay, Uruguay y países del norte de Sudamérica.

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;

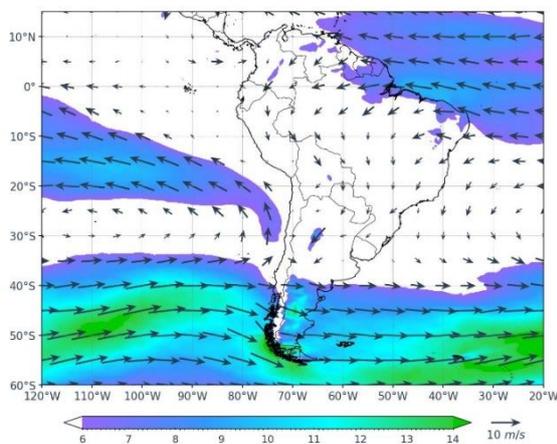


Figura 4: Flujos a niveles bajos – Febrero.

asimismo, el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS), se presentó en su posición climática y con una intensidad ligeramente superior a su promedio. Por otro lado, no se reflejó el paso de altas migratorias (AM) durante el mes.

En niveles bajos, a 850 hPa, predominaron flujos de componente este sobre el norte de Sudamérica aportando humedad proveniente del Atlántico sobre países del norte y centro de Sudamérica. En superficie, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) predominó con configuración zonal y núcleo en los 39°S y 102°W, desplazado ligeramente hacia el suroeste de su posición climática, con una intensidad de alrededor de los 1022 hPa (ligeramente más intenso respecto a su promedio);

MARZO

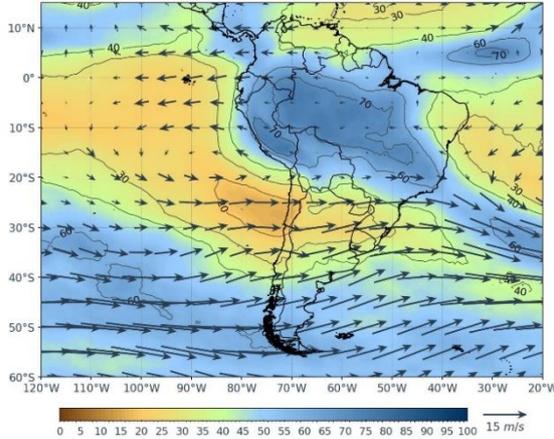


Figura 5: Flujos a niveles medios - Marzo.

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 favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad cercana al 80% hacia el Perú, Brasil, Colombia y Ecuador; por otro lado, sobre gran parte del resto del continente propiciaron el ingreso de aire seco con valores por debajo del 50% de humedad, principalmente al este de Brasil, centro-norte de Chile y Argentina, Paraguay, Uruguay y países del extremo norte de Sudamérica.

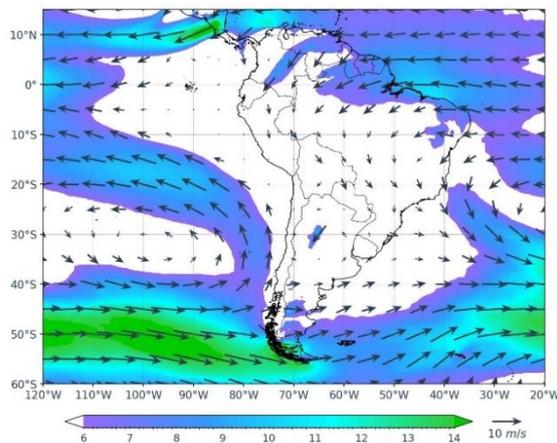


Figura 6: Flujos a niveles bajos - Marzo.

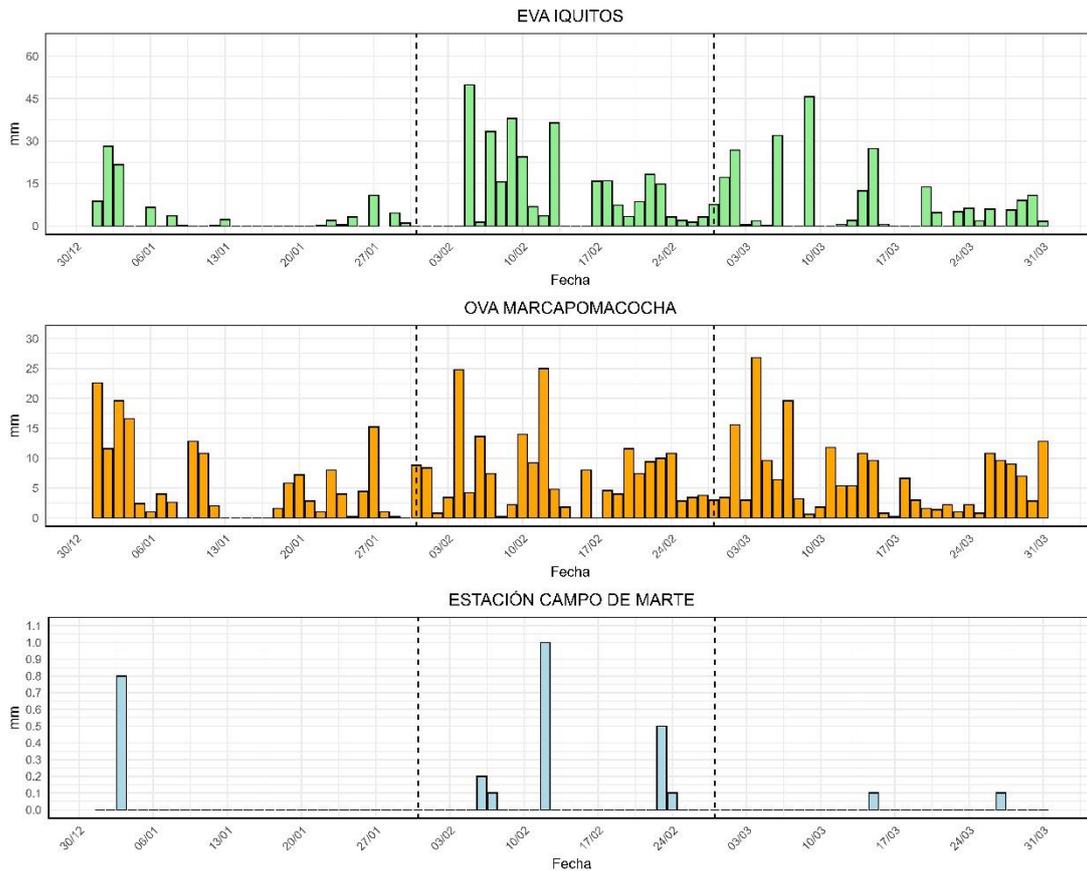
En niveles bajos, a 850 hPa, predominaron flujos de componente este sobre el norte de Sudamérica aportando humedad proveniente del Atlántico sobre países del norte y centro de Sudamérica. En superficie, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) predominó con configuración zonal y núcleo en los 35°S y 192°W, desplazado ligeramente hacia el sur de su posición climática, con una intensidad de alrededor de los 1022 hPa (ligeramente más intenso respecto a su promedio); asimismo, el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS), se presentó desplazado ligeramente al suroeste de su posición climática y con una intensidad débilmente superior a su promedio. Por otro lado, se reflejó el paso de altas migratorias (AM) durante el mes con el incremento de presión sobre Chile y Argentina.

II. CONDICIONES PLUVIOMÉTRICAS

Como el presente monitoreo trata de calidad de agua de lluvia es importante analizar las condiciones pluviométricas (precipitación) presentadas en cada punto de monitoreo los cuales se ubican en: Estación de Vigilancia Atmosférica Iquitos – EVA Iquitos (Loreto), Observatorio de Vigilancia Atmosférica Marcapomacocha – OVA Marcapomacocha (Junín) y Estación de Calidad del Aire Campo de Marte (Lima), entendiéndose que cada lugar tiene condiciones climatológicas distintas, por ende patrones de precipitación distintos para un mismo periodo de tiempo.

Como se representa en la Figura 7, la cantidad de la precipitación en los puntos de monitoreo son distintas. Estas estuvieron altamente influenciadas por el comportamiento de los patrones atmosféricos en cada lugar (descritos previamente en el ítem I).

Figura 7: Precipitación acumulada en los puntos de monitoreo



Asimismo, el Cuadro 1 es un resumen de la cantidad mensual de precipitación, en la cual se observa que, para el mes de enero, la EVA Iquitos registró un acumulado mensual inferior a su normal climática, presentando una amplia diferencia. Respecto al mes de febrero, se encontró que en las tres estaciones se superó la normal climática, presentándose la diferencia más amplia en Iquitos. Por otro lado, respecto al mes de marzo, solo el OVA Marcapomacocha superó su normal climática.

Cuadro 1: Acumulados de precipitación (mm/mes)

MESES	EVA IQUITOS		OVA MARCAPOMACOCHA		ESTACIÓN CAMPO DE MARTE	
	ACUMULADO MENSUAL	NORMAL CLIMÁTICA	ACUMULADO MENSUAL	NORMAL CLIMÁTICA	ACUMULADO MENSUAL	NORMAL CLIMÁTICA
ENERO	162.4	224.4	166.2	140	0.8	0.6
FEBRERO	311.0	201.6	198.6	150.9	1.9	0.5
MARZO	231.6	241.1	204.8	171.6	0.2	0.4

III. MONITOREO DE FOCOS DE CALOR

La quema de biomasa implica la ignición de vegetación viva o muerta por medio de incendios, incluyendo pastizales, bosques y residuos agrícolas constituye una fuente significativa de emisiones gaseosas y partículas a la atmósfera; entre las emisiones gaseosas se encuentran: 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)⁶.

Por ello, es crucial realizar un seguimiento permanente de los focos de calor, no solo a nivel nacional, sino en toda Sudamérica, ya que los sistemas atmosféricos pueden transportar estos contaminantes desde países vecinos. Es así que, mediante el Sistema de Información sobre Incendios para la Gestión de Recursos (FIRMS, el cual utiliza el VIIRS y MODIS para proporcionar datos de incendios y focos de calor) se realizó el seguimiento de los focos de calor durante el trimestre en evaluación.

En las Figuras 8, 9 y 10 se puede observar que con el transcurrir de los meses existe una ligera disminución en la cantidad de focos de calor presentes a nivel nacional y también disminución en los focos de calor hacia los sectores norte, este y sureste de Sudamérica (Ecuador, Colombia, Venezuela, Brasil, Bolivia y Paraguay) los cuales pueden contribuir en la composición química del aire.



Figura 8: Focos de Calor - Enero.



Figura 9: Focos de Calor - Febrero.

⁶ Mielnicki et al. 2005. La quema de biomasa en Sudamérica vista desde el Espacio. (<http://bit.ly/3Pwu7yd>)



IV. RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE LLUVIA (REMCAL)

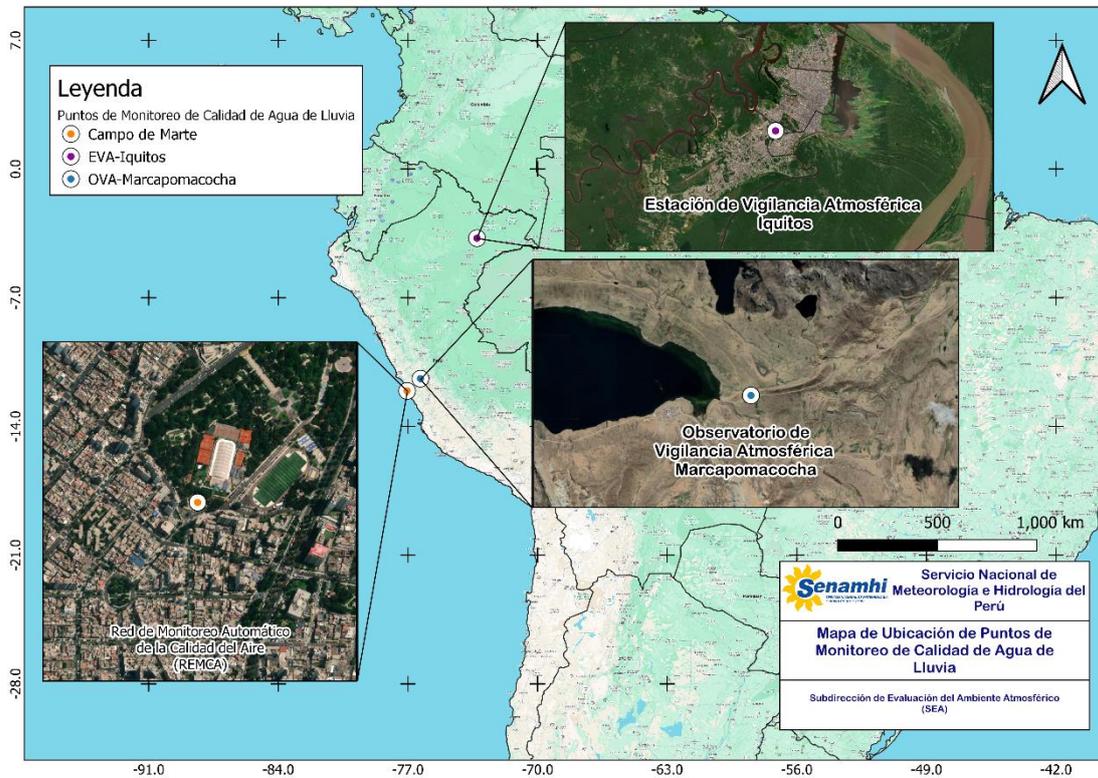
El SENAMHI, a través de la Subdirección de evaluación del Ambiente Atmosférico de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica, realiza la vigilancia a nivel nacional de la calidad de agua de lluvia a través de una Red de Monitoreo de la Calidad de Agua de Lluvia (REMCAL), dicha red en la actualidad cuenta con tres puntos de monitoreo las cuales se observan en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Puntos de monitoreo de Calidad de Agua de Lluvia y la ubicación de los mismos.

N°	NOMBRE DEL PUNTO DE MONITOREO	UBICACIÓN			COORDENADAS		ALTITUD (m s.n.m.)
		REGIÓN	PROVINCIA	DISTRITO	LATITUD	LONGITUD	
1	Observatorio de Vigilancia Atmosférica Marcapomacocha (OVA Marcapomacocha)	Junín	Yauli	Marcapomacocha	11°24'15.96"S	76°19'30.30"O	4447
2	Estación de Monitoreo de Calidad del Aire Campo de Marte	Lima	Lima	Jesús María	12°4'14.03" S	77°2'35.3" O	123
3	Estación de Vigilancia Atmosférica Iquitos (EVA Iquitos)	Loreto	Maynas	San Juan Bautista	3°45'51.02"S	73°16'12.60"O	113

Estos puntos de monitoreo, estratégicamente ubicados, brindan información referencial de la costa, sierra y selva del país, además, cada sitio se caracteriza por tener diferentes tipos de vegetación, uso de suelo, microclima y otras características propias.

Figura 11: Ubicación de los Puntos de Monitoreo de la REMCAL a nivel nacional.



Para contextualizar y comprender un poco más acerca de cada punto de monitoreo a continuación brindaremos un poco de información respecto a las normales climatológicas⁷ presentadas en el trimestre para cada lugar:

4.1. Observatorio de Vigilancia Atmosférica Marcapomacocha (OVA Marcapomacocha).- La temperatura máxima media varía entre los 10.8°C y los 10.5°C, la temperatura mínima media varía entre los 0.8 °C y los 0.5°C.

4.2. Estación de Monitoreo de Calidad del Aire Campo de Marte.- La temperatura máxima media varía entre los 27.1°C y los 25.6 °C, la temperatura mínima media varía entre los 21.1°C y los 20.4°C.

4.3. Estación de Vigilancia Atmosférica Iquitos (EVA Iquitos).- La temperatura máxima media varía entre los 32.3°C y los 31.9 °C, la temperatura mínima media varía entre los 23.1°C y los 22.8 °C.

⁷ Normales Climatológicas Estándares y Medias 1991-2020: <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=normales-estaciones>

V. MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DE LLUVIA

Las variables más importantes para el monitoreo de la calidad de agua de lluvia son el pH y la Conductividad Eléctrica, es así que para la determinación de estos parámetros en la REMCAL se emplean equipos especializados siguiendo lineamientos establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

La frecuencia de monitoreo de la calidad de agua de lluvia que se realiza en la REMCAL es semanal, la cual es una frecuencia recomendada por la OMM.

5.1. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

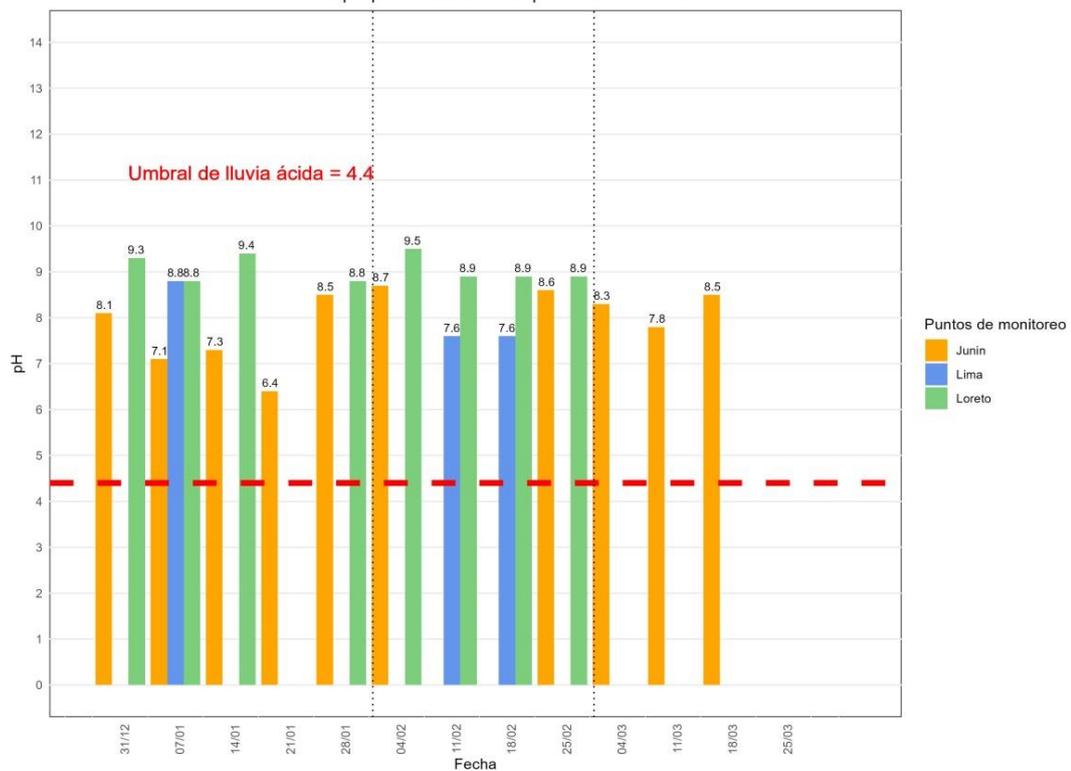
El pH es una expresión de la concentración de iones de hidrógeno en el agua. El término se utiliza para indicar la basicidad o acidez de una solución en una escala de 0 a 14, siendo el pH 7 neutro. A medida que aumenta la concentración de iones H⁺ en la solución, aumenta la acidez y el pH disminuye, por debajo de 7 y cuando el pH es superior a 7, la solución es básica.

Es importante el análisis del pH ya que este afecta la mayoría de los procesos químicos y biológicos en el agua⁸.

La Figura 12, muestra los registros de pH para la calidad de agua de lluvia en la REMCAL, donde los valores mínimo y máximo fueron 6.4 y 9.5, registrados en el OVA Marcapomacocha y EVA Iquitos, respectivamente. Asimismo, cabe precisar que el mínimo valor estuvo por encima del umbral de lluvia ácida⁹.

Figura 12: Registros de pH de la deposición atmosférica húmeda en la REMCAL.

Valores de pH presentados en los puntos de monitoreo



⁸ Potencial de Hidrogeno <https://www.epa.gov/caddis/ph>

⁹ Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos <https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>

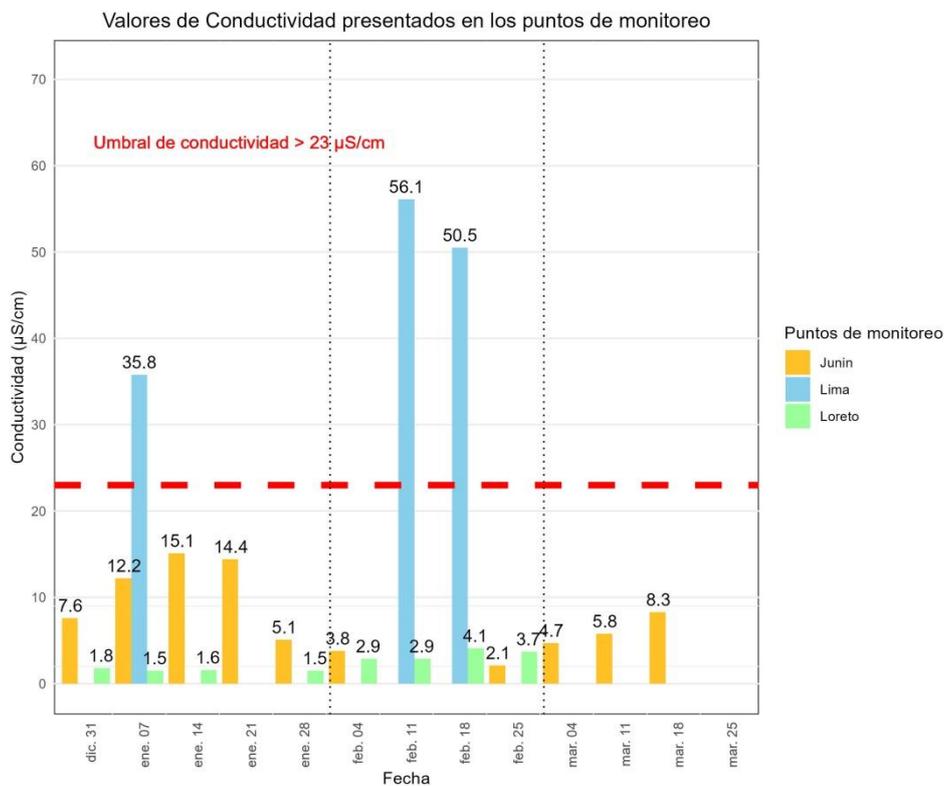
5.2. Conductividad Eléctrica

La conductividad es una medida de la capacidad del agua para pasar una corriente eléctrica. Debido a que las sales disueltas y otras sustancias químicas inorgánicas conducen la corriente eléctrica, la conductividad aumenta a medida que aumenta la salinidad.

La importancia de realizar mediciones de conductividad radica en que esta es útil como medida general de la calidad del agua. Cada cuerpo de agua tiende a tener un rango de conductividad relativamente constante que, una vez establecido, puede usarse como base para comparar con mediciones de conductividad regulares. Los cambios significativos en la conductividad podrían entonces ser un indicador de que una descarga o alguna otra fuente de contaminación ha ingresado al agua¹⁰.

La Figura 13, muestra los registros de Conductividad Eléctrica para la calidad de agua de lluvia en la REMCAL; asimismo, se observa que los valores mínimo y máximo fueron 1.5 $\mu\text{S/cm}$ y 56.1 $\mu\text{S/cm}$, registrados en la EVA Iquitos y Estación de Calidad del Aire Campo de Marte, respectivamente. Cabe precisar que durante el trimestre analizado, únicamente en la Estación de Calidad del Aire Campo de Marte se registraron tres valores por encima del umbral de lluvia ácida¹¹.

Figura 13: Registros de conductividad eléctrica de la deposición atmosférica húmeda en la REMCAL.



¹⁰ Conductividad del agua <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-conductivity>

¹¹ Antolinez, A. y Díaz, C. (2003) Lluvia Ácida en la zona norte de Bogotá.

5.3. Análisis de retrotrayectorias

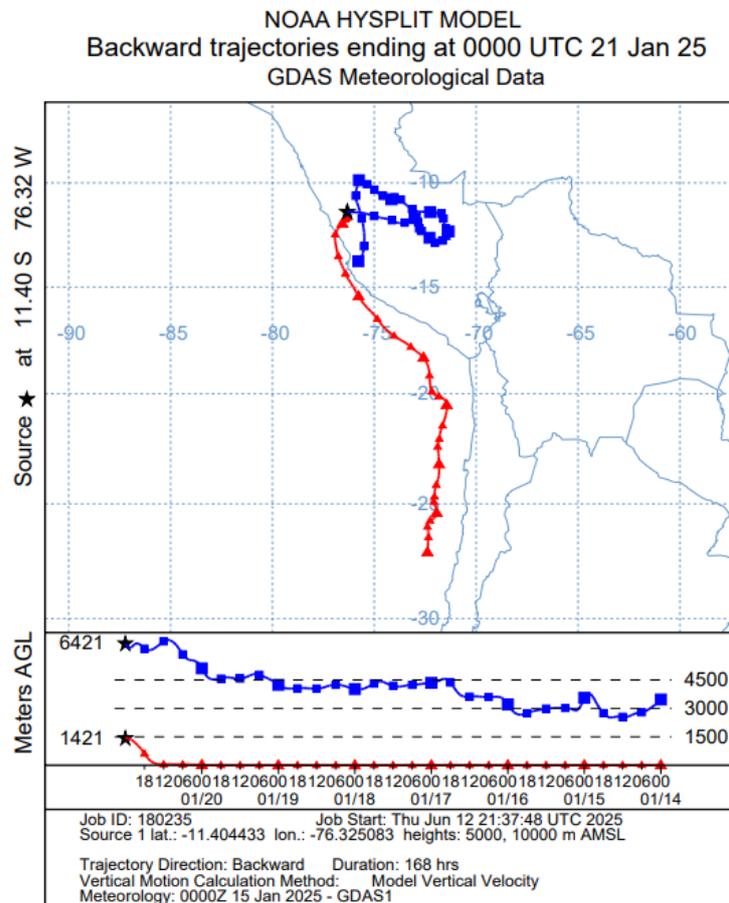
El modelo híbrido de trayectoria integrada lagrangiana de una sola partícula o Hysplit (por sus siglas en inglés, Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) es un sistema completo para calcular trayectorias simples de paquetes de aire, así como simulaciones complejas de transporte, dispersión, transformación química y deposición; este sigue siendo uno de los modelos de dispersión y transporte atmosférico más utilizado en la comunidad de las ciencias atmosféricas. Una aplicación común de este modelo es el análisis de trayectoria inversa (o retrotrayectorias) para la determinación del origen de masas de aire y así establecer relaciones fuente-receptor⁵.

La Figura 14 nos muestra las trayectorias de masas de aire a dos alturas distintas: 5000 y 10000 m.s.n.m. (metros sobre nivel del mar).

La trayectoria roja (5000 m.s.n.m.) muestra que las masas de aire provienen del sur, cerca de superficie, originándose esta sobre el océano Pacífico, frente al centro de Chile, hasta llegar al OVA Marcapomacocha. Asimismo, la trayectoria azul (10 000 m.s.n.m.) presentó un recorrido espacial más corto centrado en región continental, originándose en niveles medios desde el sur, sobre Ica.

La simulación cubre 7 días hacia atrás desde el punto de término (21 de enero), lo cual comprende el tiempo que estuvo expuesto el muestreador de calidad de agua de lluvia. Cabe precisar que, se escogió este periodo para el análisis de Hysplit para el OVA Marcapomacocha, debido a que en dicho periodo se presentó el menor pH durante el trimestre, es así que se puede deducir que durante ese periodo la calidad del agua de lluvia (con tendencia ácida) pudo estar relacionada al ingreso de masas de aire con aerosoles marinos, la influencia de emisiones locales (actividades antrópicas) y posibles incendios forestales, considerando la presencia de focos de calor detectados en la zona.

Figura 14: Retrotrayectorias para el OVA Marcapomacocha.

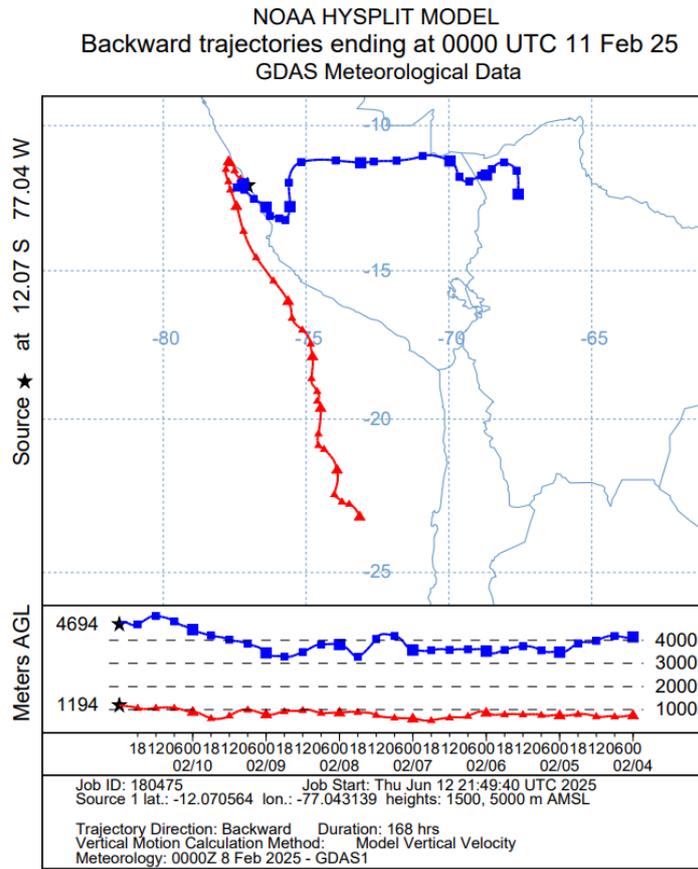


La Figura 15 nos muestra las trayectorias de masas de aire a dos alturas distintas: 1500 y 5000 m.s.n.m.

La trayectoria roja (1500 m.s.n.m.) muestra que las masas de aire se encuentran cercanas a la superficie, provienen del sur atravesando el océano Pacífico, pudiendo transportar material particulado y aerosoles marinos. Por otro lado, las trayectorias azules (5000 m.s.n.m.) provienen de capas más altas de la atmósfera (niveles medios) con un recorrido ligeramente más corto, viajando desde el noroeste de Bolivia.

La simulación cubre 7 días hacia atrás desde el punto de término (11 de febrero), lo cual comprende el tiempo que estuvo expuesto el muestreador de calidad de agua de lluvia. Cabe precisar que, se escogió este periodo para el análisis de Hysplit para la Estación Campo de Marte, debido a que en dicho periodo se presentó mayor conductividad durante el trimestre, es así que se puede deducir que durante ese periodo hubo mayor cantidad de iones, los cuales incrementaron los niveles de conductividad en la estación, pudiendo estar relacionado a la presencia de aerosoles marinos.

Figura 15: Retro trayectorias para la Estación Capo de Marte.



VI. CONCLUSIONES

- Durante el primer trimestre, en niveles medios se presentaron sistemas que favorecieron el ingreso de flujos del este, incursionando sobre países del norte de Sudamérica y hacia la zona de selva norte del país; mientras que para la zona costera, predominaron los flujos de origen sur aportando humedad proveniente del pacífico.
- Respecto a las condiciones pluviométricas, en el mes de enero, el punto de monitoreo ubicado en la selva (EVA Iquitos) estuvo ampliamente por debajo de su normal climática. Durante el mes de febrero, se observaron importantes acumulados mensuales en los puntos ubicados en costa, sierra y selva (Estación Campo de Marte, OVA Marcapomacocha y EVA Iquitos, respectivamente), los cuales se encontraron por encima de su normal climática. Respecto al mes de marzo, solo la estación OVA Marcapomacocha superó su normal climática.
- Según las muestras analizadas para el primer trimestre del presente año, se puede observar que en dos puntos de monitoreo de la REMCAL se presentaron valores fuera de los umbrales de lluvia ácida (pH y conductividad). El OVA Marcapomacocha presentó el mínimo valor de pH y la Estación de Calidad el Aire Campo de Marte registró tres valores de conductividad elevada, por encima del umbral de lluvia ácida.
- Los bajos valores de pH presentados en el mes de enero para el OVA Marcapomacocha pudieron estar influenciados por masas de aire provenientes del océano Pacífico con presencia de aerosoles marinos, incremento de material particulado posiblemente a causa de incendios forestales y emisiones de actividades antrópicas locales, que afectaron el territorio nacional.
- Se puede inferir que los valores elevados de Conductividad Eléctrica presentados durante el mes de febrero en la Estación Campo de Marte pueden haberse originado por el transporte de masas de aire del océano Pacífico con presencia de aerosoles marinos.

Para más información sobre el presente documento, contactar con:

Ing. Elvis Anthony Medina Dionicio

eamedina@senamhi.gob.pe

Subdirector de Evaluación del Ambiente Atmosférico

Elaboración:

Ing. Sháneri Sheyla Sánchez Calderón (ssanchez@senamhi.gob.pe)

Bach. Hanns Kevin Gómez Muñoz

Apoyo:

Juan Tacza Ordoñez

Julia Amelia Astudillo Capcha

Erder Paul Hidalgo Apagüeño

Rosalinda Cedy Aguirre Almeyda

Suscríbete al **BOLETÍN DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA DE LLUVIA** mediante el siguiente enlace:

<https://forms.office.com/r/Z4C8SD80Xq>

