



Boletín Nacional Monitoreo de la Calidad de Agua de Lluvia

Octubre - Diciembre 2024



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 cuarto trimestre del 2024; 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 cuarto trimestre^{1,2,3}, se realizó análisis de focos de calor⁴ y análisis de las salidas del modelo híbrido de trayectoria integrada langrangiana 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 – Octubre 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-116.pdf>

² Informe de Vigilancia Sinóptica de Sudamérica – Noviembre 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-117.pdf>

³ Informe de Vigilancia Sinóptica de Sudamérica – Diciembre 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-118.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. Por lo tanto a continuación se detalla las condiciones sinópticas ocurridas durante el trimestre octubre – diciembre.

OCTUBRE

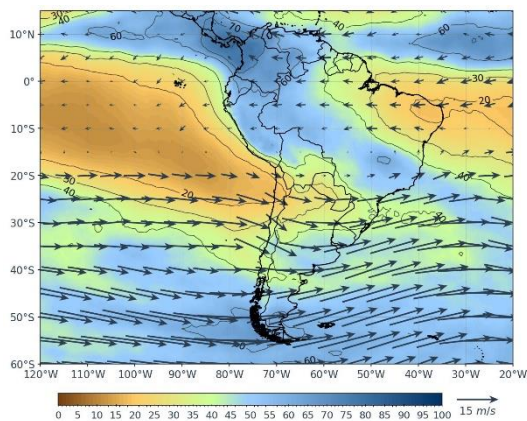


Figura 1: Flujos a niveles medios - Octubre.

20-40% de humedad, principalmente al este de Brasil, Chile, Argentina, Bolivia, Paraguay y Uruguay.

En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante, desde los 20°S hacia latitudes mayores asociado a una onda débilmente configurada. También, dominaron flujos anticiclónicos débiles sobre Brasil (que se extendieron desde el Atlántico) y sobre el Pacífico alrededor de los 12°S. Estos sistemas favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad (entre el 30-70%) hacia el Perú, Bolivia, Brasil y otros países del norte de Sudamérica; por otro lado, sobre gran parte del resto del continente prevaleció el ingreso de aire seco con valores entre el

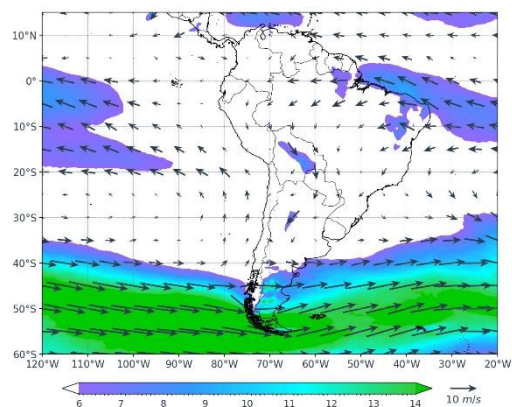


Figura 2: Flujos a niveles bajos –Octubre.

En 850hPa predominaron flujos de origen este sobre el noreste de Sudamérica aportando humedad proveniente del Atlántico sobre países del norte y centro de Sudamérica, también se presentó el Jet de Bajos Niveles (LLJ) con vientos con valores cercanos a los 11 m/s sobre Bolivia y Paraguay, transportando condiciones de inestabilidad hacia esos sectores. En superficie, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) predominó con configuración cuasi zonal y dos núcleos (el más intenso sobre los 32°S - 112°W), desplazado ligeramente hacia

al este respecto a su posición climática y con valores sobre los 1022 hPa, presentando valores dentro de su promedio; asimismo, el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS), se presentó ligeramente al suroeste de su posición climática y con una intensidad dentro de su climatología. Por otro lado, se refleja el paso de altas migratorias (AM) con el incremento de presión sobre el sur del continente Sudamericano.

NOVIEMBRE

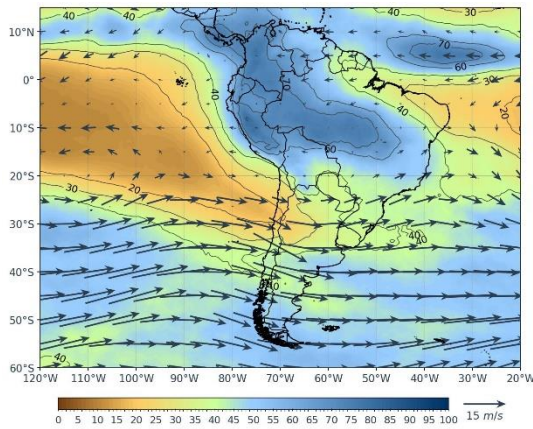


Figura 3: Flujos a niveles medios – Noviembre.

En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante, asociados a una onda débilmente configurada, desde los 25°S hacia latitudes mayores. También dominaron dos flujos anticiclónicos, uno configurado sobre el océano Pacífico (con núcleo no definido) y otro sobre el este de Brasil (que se extendió desde el océano Atlántico). Estos sistemas favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad mayor a 60% hacia el Perú, norte de Bolivia, Brasil y otros países del norte de Sudamérica; por otro lado, sobre gran parte del resto del continente propiciaron el ingreso de aire seco con valores por debajo

del 40% de humedad, principalmente al noreste de Brasil, centro y norte de Chile, norte de Argentina, Paraguay y Uruguay.

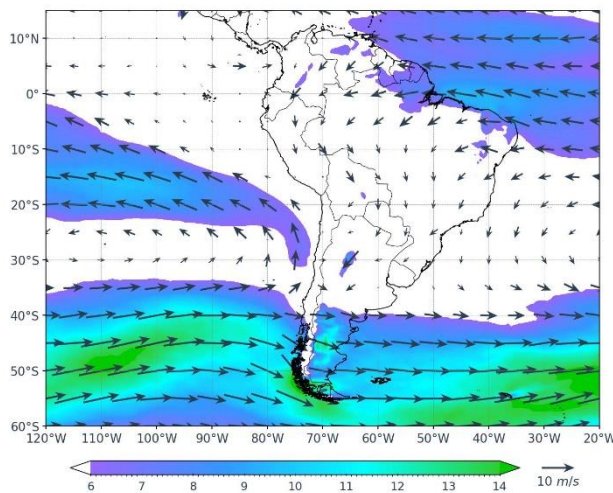


Figura 4: Flujos a niveles bajos – Noviembre

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 32°S y 108°W, desplazado ligeramente hacia el oeste, con una intensidad de alrededor de los 1025 hPa (superior respecto a su promedio). Por otro lado, no se refleja el paso de altas migratorias (AM) intensas durante el mes.

DICIEMBRE

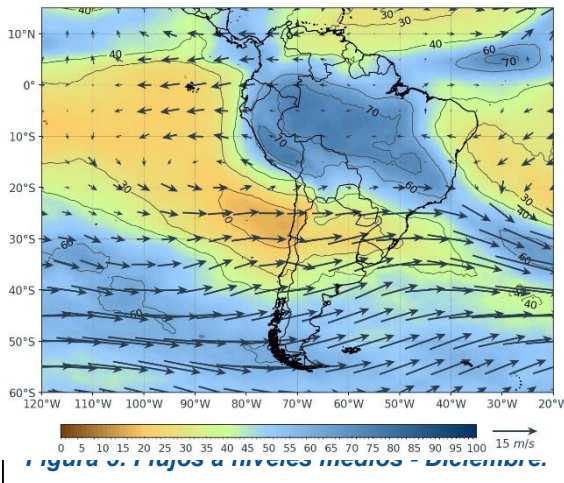


Figura 5: Flujos a niveles medios - Diciembre.

En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante desde los 25°S hacia latitudes mayores, asociados a una onda poco configurada, que se reflejó desde niveles altos. También dominaron dos flujos anticiclónicos, uno configurado sobre el océano Pacífico (con núcleo entre los 18°S y 88°W, aproximadamente) 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 Colombia; por otro lado, sobre gran parte del resto del continente propiciaron el ingreso de aire seco con valores por debajo del 40% de humedad, principalmente al este de Brasil, centro y norte de Chile, norte de Argentina, Paraguay y Uruguay.

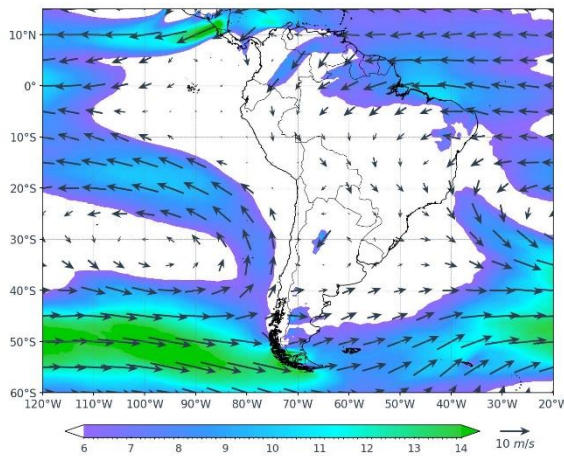


Figura 6: Flujos a niveles bajos - Diciembre.

En niveles bajos, a 850 hPa, a, 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 33°S y 94°W, desplazado ligeramente hacia el este, con una intensidad de alrededor de los 1026 hPa (superior 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 refleja el paso de altas migratorias (AM) intensas durante el mes.

En niveles bajos, a 850 hPa, a, 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 33°S y 94°W, desplazado ligeramente hacia el este, con una intensidad de alrededor de los 1026 hPa (superior 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 refleja el paso de altas migratorias (AM) intensas durante el mes.

En niveles bajos, a 850 hPa, a, 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 33°S y 94°W, desplazado ligeramente hacia el este, con una intensidad de alrededor de los 1026 hPa (superior respecto a su promedio); asimismo, el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS), se presentó ligeramente

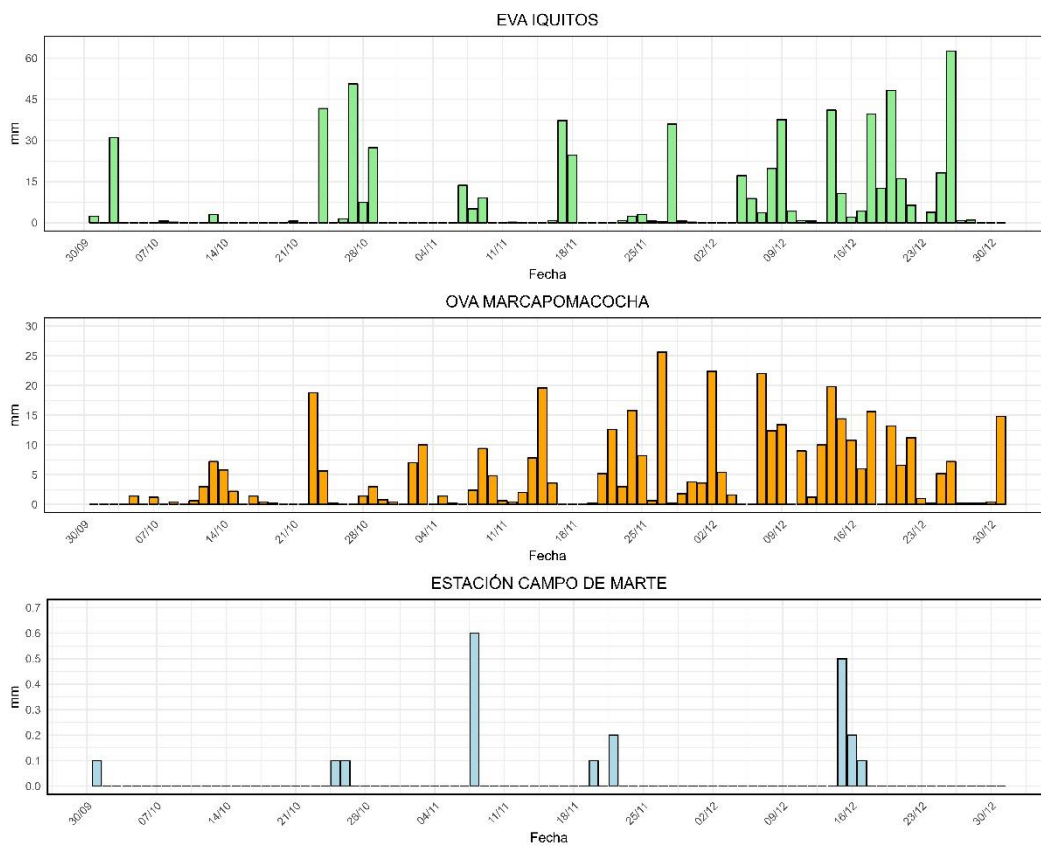
desplazado al este de su posición climática y con una intensidad dentro de su climatología. Por otro lado, no se refleja el paso de altas migratorias (AM) intensas durante el mes.

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), entendiendo 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 octubre, las tres estaciones registraron un acumulado mensual inferior a su normal climática, presentándose en el EVA Iquitos y en el OVA Marcapomacocha las diferencias más amplias. Respecto al mes de noviembre, se encontró que solo la EVA Iquitos no se superó la normal climática. Por otro lado, respecto al mes de diciembre, las 3 estaciones superaron ampliamente sus normales climáticas.

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 |
| OCTUBRE | 166 | 224.3 | 54 | 71.3 | 0.3 | 0.5 |
| NOVIEMBRE | 134 | 257.3 | 146 | 81.3 | 0.9 | 0.5 |
| DICIEMBRE | 360 | 227.9 | 228 | 114 | 0.8 | 0.3 |

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 un incremento considerable en los focos de calor presentes a nivel nacional y también incrementos 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 significativamente en la composición química del aire.



Figura 8: Focos de Calor - Octubre.



Figura 9: Focos de Calor - Noviembre.

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



Figura 10: Focos de Calor - Diciembre.

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

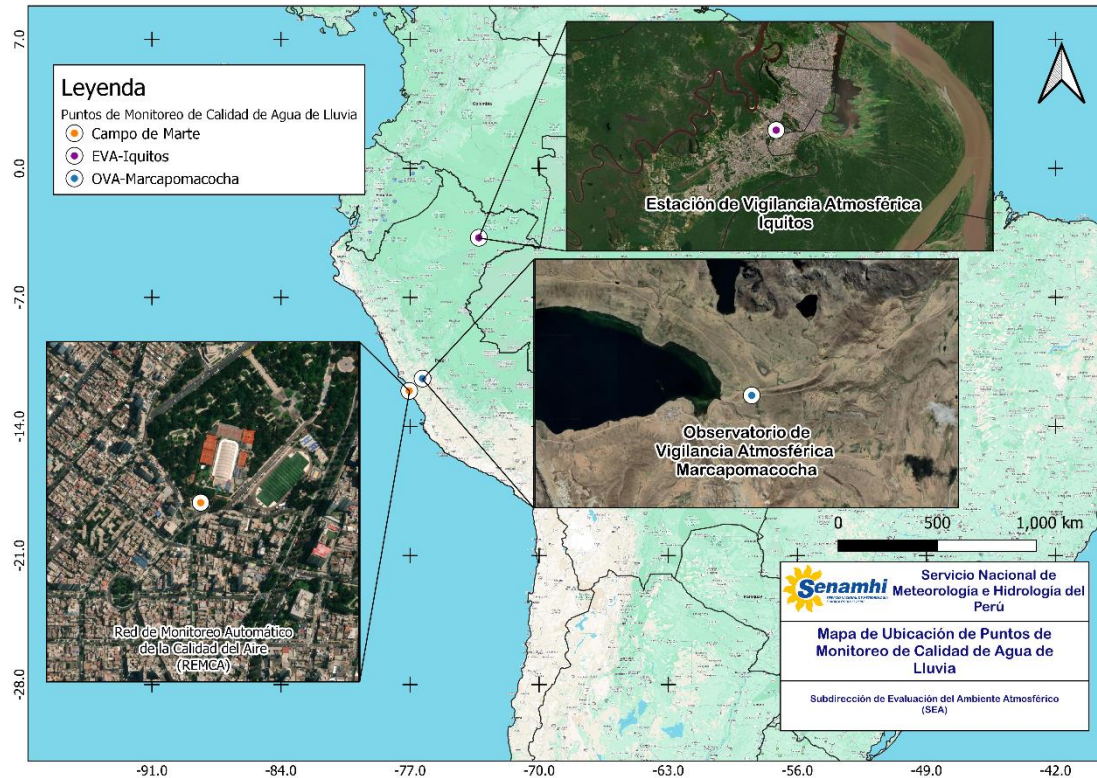
El SENAMHI, a través de la Subdirección de evaluación del Ambiente Atmosférico de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica, realiza la vigilancia a nivel nacional de la calidad de agua de lluvia a través de una Red de Monitoreo de la Calidad de Agua de Lluvia (REMCAL), dicha red 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 8: 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:

2.1. Observatorio de Vigilancia Atmosférica Marcapomacocha (OVA Marcapomacocha).- La temperatura máxima media varía entre los 11.5°C y los 10.8°C, la temperatura mínima media varía entre los -2 °C y los -3.8°C.

2.2. Estación de Monitoreo de Calidad del Aire Campo de Marte.- La temperatura máxima media varía entre los 18.1°C y los 17.5 °C, la temperatura mínima media varía entre los 15.4 °C y los 14.6°C.

2.3. Estación de Vigilancia Atmosférica Iquitos (EVA Iquitos).- La temperatura máxima media varía entre los 33.1°C y los 31.2 °C, la temperatura mínima media varía entre los 22.5 °C y los 22°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).

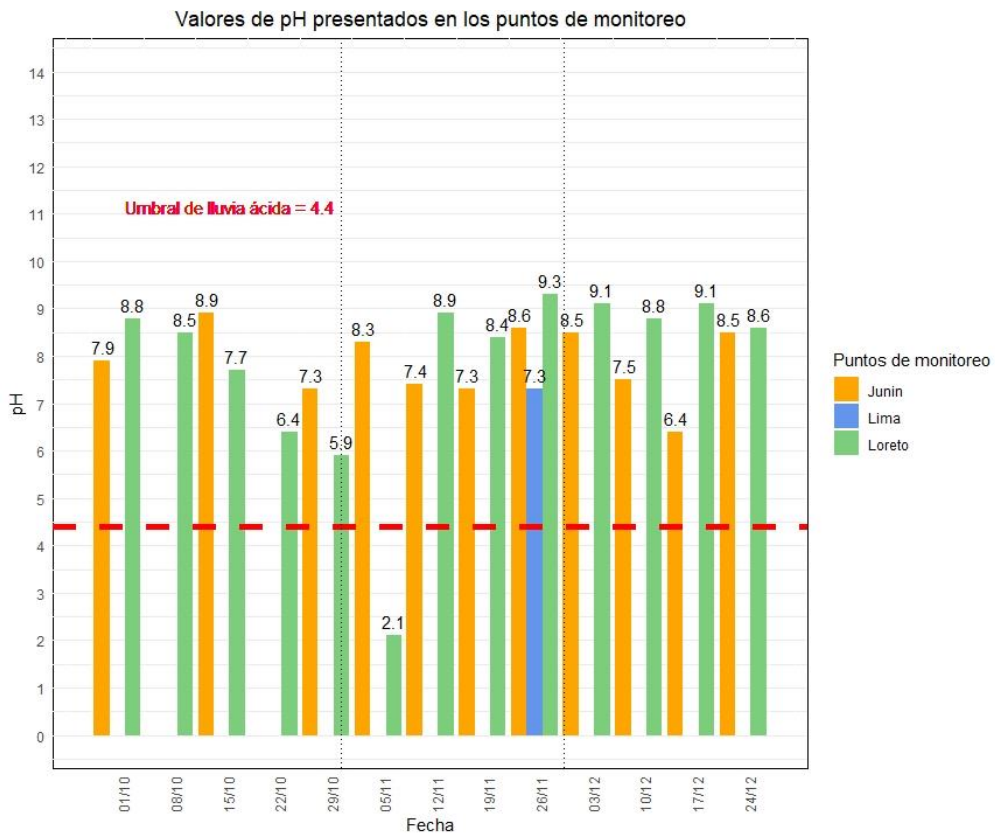
La frecuencia de monitoreo de la calidad de agua de lluvia que se realiza en la REMCAL es semanal, la cual es una frecuencia recomendada por la OMM.

2.4. 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 9, muestra los registros de pH para la calidad de agua de lluvia en la REMCAL, donde los valores mínimo y máximo fueron 2.1 y 9.3, ambos registrados en la EVA Iquitos; asimismo, cabe precisar el mínimo valor estuvo por debajo del umbral de lluvia ácida⁹.

Figura 9: Registros de pH de la deposición atmosférica húmeda en la REMCAL.



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>

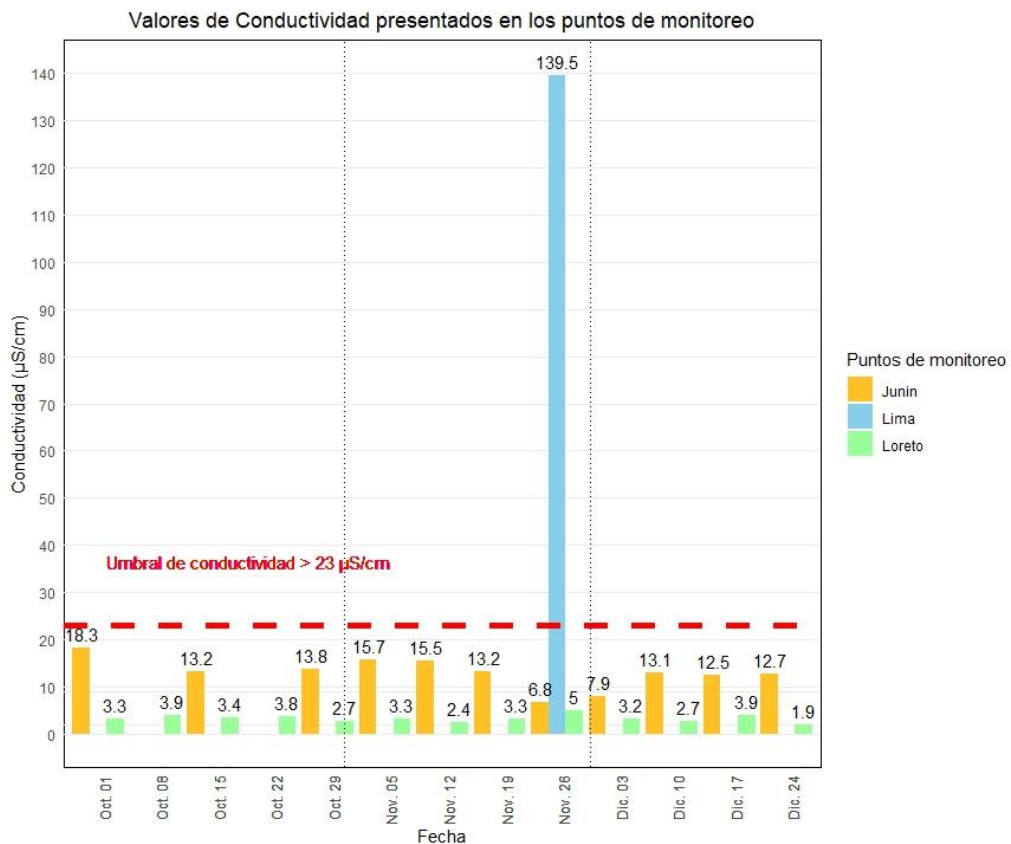
2.5. Conductividad Eléctrica

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 10, 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 1.9 $\mu\text{S/cm}$ (EVA Iquitos) y 139.5 $\mu\text{S/cm}$ (Estación de Calidad del Aire Campo de Marte). Cabe precisar que durante el trimestre analizado solo en la Estación de Calidad del Aire Campo de Marte se registró un valor por encima del umbral de lluvia ácida ¹¹.

Figura 10: 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.

2.6. Análisis de retrotrayectorias

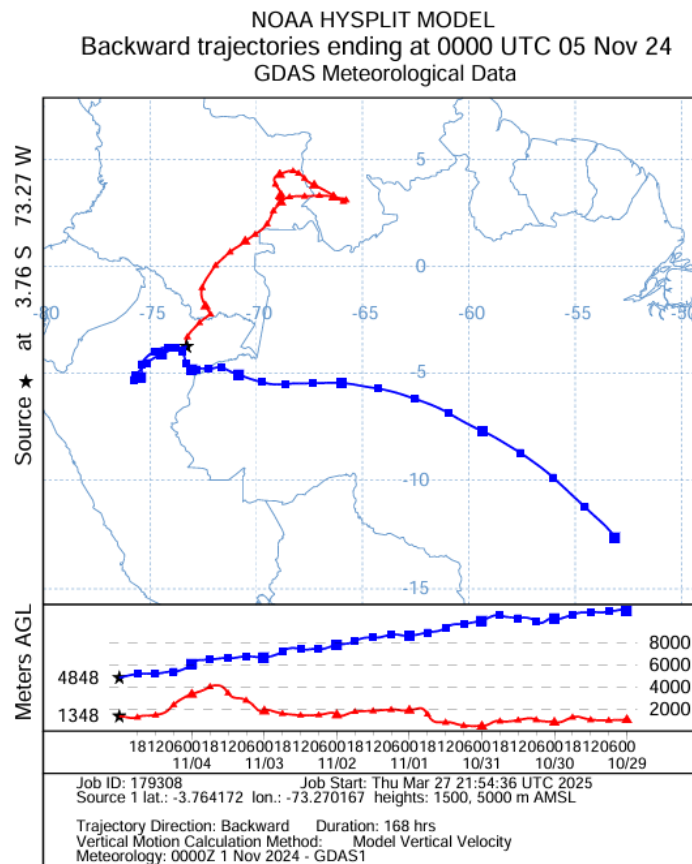
El modelo híbrido de trayectoria integrada lagrangiana de una sola partícula o Hysplit (por sus siglas en inglés, Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) es un sistema completo para calcular trayectorias simples de paquetes de aire, así como simulaciones complejas de transporte, 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 11 nos muestra las trayectorias de masas de aire a dos alturas distintas: 1500 y 5000 ms. n. m. (metros sobre nivel del mar).

La trayectoria roja (1500 ms. n. m.) muestra que las masas de aire provienen del noreste, muy cerca de la superficie, originándose esta sobre los países de Colombia y Venezuela hasta llegar a la EVA Iquitos; asimismo, la trayectoria azul (5000 ms. n. m.) presenta un recorrido más largo, originándose en niveles altos desde el sureste, sobre Brasil.

La simulación cubre 7 días hacia atrás desde el punto de término (05 de noviembre), 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 EVA Iquitos debido a que en dicho periodo se presentó menor pH durante el trimestre, es así que se puede deducir que durante ese periodo la calidad del agua de lluvia (con tendencia ácida) puede estar relacionada a la influencia del incremento de material particulado proveniente de incendios forestales.

Figura 11: Retrotrayectorias para la EVA Iquitos.

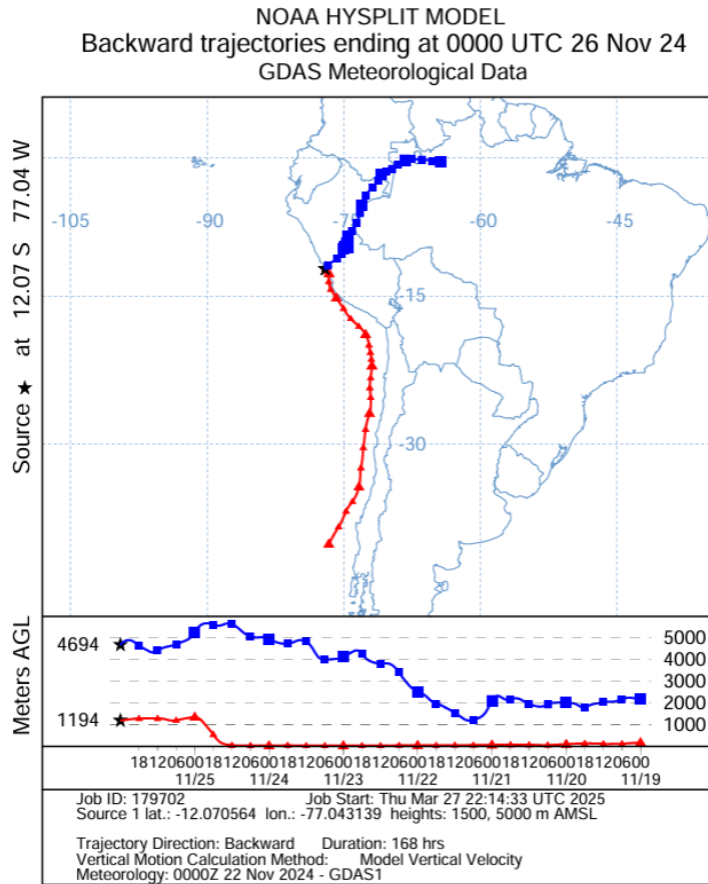


La Figura 12 nos muestra las trayectorias de masas de aire a dos alturas distintas: 1500 y 5000 ms. n. m.

La trayectoria roja (1500 ms. n. m.) muestra que las masas de aire se encuentran muy 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 ms. n. m.) provienen de capas más altas de la atmósfera (niveles medios) con un recorrido más corto, viajando desde el noreste (zona fronteriza entre Brasil y Colombia).

La simulación cubre 7 días hacia atrás desde el punto de término (26 de noviembre), 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 lo cual puede estar relacionado a la presencia de aerosoles marinos.

Figura 12: Retrotrayectorias para la Estación Capo de Marte.



VI. CONCLUSIONES

- Durante el cuarto trimestre en niveles medios se presentaron sistemas que favorecieron el ingreso en niveles bajos de flujos del este, ingresando sobre países del norte de Sudamérica y hacia la zona de selva norte del país; mientras que en para la zona costera, predominaron los flujos de origen sur aportando humedad proveniente del pacífico.
- Respecto a las condiciones pluviométricas, en el mes de octubre y noviembre los puntos de monitoreo ubicados en la sierra y selva (EVA Iquitos y OVA Marcapomacocha respectivamente) estuvieron por debajo de su normal climática, mientras que para el punto de monitoreo ubicado en la costa (Estación Campo de Marte) se mantuvo dentro de su rango habitual. Durante el mes de diciembre se observan importantes acumulados mensuales los cuales se encuentran por encima de su normal climática.
- Según las muestras analizadas para el cuarto trimestre del presente año, se puede observar que en dos de los puntos de monitoreo de la REMCAL se presentaron valores fuera de los umbrales de lluvia ácida, para la EVA Iquitos presentó un valor de pH por debajo del umbral de lluvia ácida y la Estación de Calidad el Aire Campo de Marte registró un valor de conductividad elevado, por encima del umbral de lluvia ácida.
- Los bajos valores de pH presentados en el mes de noviembre para la EVA Iquitos pueden estar influenciados incremento de material particulado posiblemente a causa los incendios forestales que afectaron el territorio nacional y Sudamérica.
- Se puede inferir que los valores elevados de Conductividad Eléctrica presentados durante el mes de noviembre en la Estación Campo de Marte pueden haberse originado por el transporte de masas de aire del océano Pacífico conteniendo 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>

