



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



BOLETÍN CIENTÍFICO EL NIÑO

Vol. 12 n.º 10 octubre 2025

PROGRAMA PRESUPUESTAL n.º 068

"Reducción de la vulnerabilidad y
atención de emergencias por desastres"

En este boletín

- Variabilidad espacio-temporal del carbono negro en alta-montaña: un enfoque observacional y modelado en la cordillera Huaytapallana | **Pág. 4**
- El intercambio de energía y carbono en los Andes Centrales de Perú: avances del proyecto LAMAR | **Pág. 14**
- Resumen del informe técnico de El Niño | **Pág. 19**
- Resumen de comunicado ENFEN | **Pág. 20**



Créditos

Miguel Angel Espichán Mariñas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera Huarache
Jefe institucional

James Apaéstegui Campos
Director de Ciencias de la Atmósfera, Hidrósfera y Cambio Climático

Lina Godoy Encarnación
Coordinadora de la Unidad Funcional de Comunicaciones

Fey Yamina Silva Vidal de Millones
Ken Takahashi Guevara
Joel Anicama Díaz
Editores

Fernanda Quispe Nakashima
Diseño y diagramación

Carátula: Fotografía del nevado Huaytapallana
Fuente: Perú 21

El boletín científico "El Niño" es generado en el marco del Programa Presupuestal n.º 068 "Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres"

Producto 1: Estudios para la estimación del riesgo de desastres
Actividad 5: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño
Instituto Geofísico del Perú

Calle Badajoz 169 Mayorazgo, Ate, 15012

Teléfono: +51-1-3172300

Lima, diciembre de 2025

Puedes acceder a la colección completa de los boletines científicos El Niño escaneando el siguiente código QR.



Introducción

Los eventos El Niño y La Niña corresponden, a grandes rasgos, a situaciones en las que la temperatura de la superficie del mar está por encima o por debajo del promedio en el océano Pacífico ecuatorial. Estas fluctuaciones están fuertemente influenciadas por El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), el cual es uno de los modos de variabilidad climática más importantes en el océano Pacífico y ejerce una gran influencia sobre el clima a nivel global y regional. La fase cálida de ENOS se puede denominar El Niño “global”.

En el Perú, los impactos de El Niño y La Niña son particularmente complejos, debido a que recibimos influencias tanto costeras, asociadas a las fluctuaciones en el mar peruano en el Pacífico oriental, como influencias remotas a través de teleconexiones atmosféricas desde el Pacífico central. En particular, El Niño en el Pacífico oriental o Costero puede producir lluvias y altas temperaturas en la costa y alterar el ecosistema marino-costero, mientras que El Niño en el Pacífico central, o global, puede reducir las precipitaciones e incrementar la temperatura en los Andes y en la Amazonía. Por el contrario, La Niña tendría efectos aproximadamente opuestos. Así, El Niño en el Pacífico oriental es el que causa mayores impactos para el Perú, ya que tiene el potencial de provocar grandes daños a infraestructuras, actividades económicas y, más importante aún, la seguridad y bienestar de las personas, además de sus medios de vida.

El Perú, como parte de la estrategia de gestión pública para enfrentar los peligros naturales, especialmente respecto a El Niño, establece el Programa Presupuestal por Resultados (PPR) 068 «Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres». A partir de 2014, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), al igual que otras instituciones que conforman la Comisión Multisectorial encargada del «Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), participa en este PPR con el producto denominado Estudios para la estimación del riesgo de desastres». Este consiste en la entrega oportuna de información científica sobre el monitoreo y pronóstico de este evento natural oceánico-atmosférico, mediante informes técnicos mensuales, que permitan la toma de decisiones de las autoridades a nivel nacional y regional.

A este producto, el IGP contribuye con la actividad «Generación de información y monitoreo del Fenómeno El

Niño», la cual incluye la síntesis y evaluación de los modelos de pronóstico de El Niño generados internacionalmente, como es el caso de los modelos climáticos globales, así como de aquellos obtenidos a partir de modelos propios como el de predicción de ondas oceánicas ecuatoriales, el modelo de inteligencia artificial y el recientemente desarrollado modelo de Sistema Tierra regional de pronóstico para el territorio peruano y el océano Pacífico. Asimismo, incluye el desarrollo de investigaciones y estudios científicos que permiten entender la variabilidad climática y los procesos asociados al cambio climático, a fin de fortalecer, de forma continua, las capacidades para el pronóstico de El Niño.

En esta línea, el IGP ha estructurado y desarrollado el Boletín científico El Niño, un producto que contiene, en gran medida, los aportes científicos en el estudio y vigilancia del ENOS, con énfasis en El Niño. El boletín, que se publica mensualmente desde 2014, cuenta con aportes nacionales e internacionales en diversos temas asociados a El Niño, sus impactos, procesos vinculados, temas asociados y otros igualmente relevantes, que se presentan en las secciones de «Divulgación Científica» y «Avances Científicos». De igual forma, se comparte en el boletín una versión resumida del informe técnico que el IGP elabora mensualmente para cumplir con los compromisos asumidos en el marco del PPR 068 (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5356>). Dicho informe contiene información actualizada operativa actualizada que el IGP proporciona como insumo para que el ENFEN genere, de forma colegiada, la evaluación final que será entregada a los usuarios. Finalmente, el boletín presenta los comunicados del ENFEN publicados durante el periodo correspondiente.

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DEL CARBONO NEGRO EN ALTA-MONTAÑA: UN ENFOQUE OBSERVACIONAL Y MODELADO EN LA CORDILLERA HUAYTAPALLANA

Andrea Miranda-Corzo¹, Elver Villalobos-Puma¹,
Ricardo Zubieta² y Yamina Silva²

¹ Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), Huaraz, Perú

² Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú



Andrea Miranda es ingeniera meteoróloga por la Universidad Nacional Agraria La Molina. Ha colaborado en investigación en el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). Sus líneas de investigación abarcan la calidad del aire, la dispersión de contaminantes mediante modelamiento atmosférico-químico, y observaciones in situ y satelitales, así como los impactos del cambio climático en glaciares y ecosistemas de montaña.

Palabras clave: carbono negro, albedo glaciar, transición Andes-Amazonía, Huaytapallana

Citar como Miranda-Corzo, A, Villalobos-Puma, E., Zubieta, R., y Silva Y. (2025) Variabilidad espacio-temporal del carbono negro en alta-montaña: un enfoque observacional y modelado en la cordillera Huaytapallana. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.º 10, págs. 4-13.

¿Cuál es la contribución de esta investigación para los tomadores de decisiones?

El carbono negro es contaminante del aire que acelera la pérdida de las reservas de agua glaciar. Los resultados de este estudio muestran que reducir sus emisiones, en particular las asociadas con incendios forestales y actividades humanas locales, es fundamental para disminuir sus impactos. Los hallazgos subrayan la importancia de implementar medidas de mitigación que protejan la salud de las personas y los recursos hídricos en los ecosistemas de alta montaña.

Resumen

Los glaciares actúan como receptores de contaminantes atmosféricos que alteran sus propiedades ópticas y pueden afectar su derretimiento. Entre estos contaminantes, el carbono negro (BC) oscurece la superficie de nieve y hielo, reduciendo su albedo y acelerando su fusión. Además, el BC impacta en la calidad del aire y en la salud de las personas. Sin embargo, actualmente existe un conocimiento limitado sobre las fuentes, el transporte y la variabilidad temporal del BC en los entornos de valle y montaña del Perú.

Para abordar este problema, este estudio combinó observaciones de BC recopiladas entre 2022 y 2023 con simulaciones del modelo WRF-Chem, y retrotrayectorias de HYSPLIT para analizar su transporte e identificar zonas de mayor influencia de fuentes emisoras de BC. Los resultados muestran que altas concentraciones de BC están asociadas a la estacionalidad, al sistema de vientos valle-montaña presente en ambos flancos de la Cordillera Huaytapallana y a las circulaciones de escala sinóptica. Asimismo, se observa que las quebradas de transición Andes-Amazonía, que conectan con los valles interandinos, funcionan como corredores de transporte de BC. Durante los meses secos y de

transición, la quebrada del norte constituye la principal vía, aportando aproximadamente el 80 % del BC que llega al Huaytapallana. Los flujos turbulentos de calor y humedad en la superficie terrestre son fundamentales en el intercambio de energía y masa entre la superficie, la atmósfera y la biosfera. Estos procesos regulan la termodinámica de la capa límite atmosférica e influyen directamente en la temperatura, la humedad y la convección. En regiones montañosas como los Andes, donde la topografía interactúa con procesos sinópticos y de mesoescala, los flujos de energía superficial parecen desempeñar un papel decisivo en la formación de eventos convectivos intensos (Flores-Rojas et al., 2019, Callañaupa et al., 2021).

1. Introducción

El BC es un contaminante de corta duración que permanece en la atmósfera desde días a semanas. Una vez liberado en la atmósfera, atraviesa procesos de interacción, transformación y transporte antes de depositarse en la superficie (IPCC, 2022). Su origen está principalmente asociado a la combustión incompleta de combustibles fósiles y a la quema de biomasa (Bond & Bergström, 2006; Bond et al., 2013). En la atmósfera, diversos estudios sugieren que el BC contribuye al calentamiento de la troposfera baja debido a su alta capacidad de absorción de radiación (IPCC., 2022; Niu et al., 2020), además de estar asociado con efectos adversos en la salud humana (Gillardoni et al., 2022; Molina et al., 2015; IPCC, 2022). En particular, cuando se deposita sobre superficies glaciares, el BC puede actuar como un absorbente de luz, reduciendo el albedo de nieve y hielo (Kang et al., 2020; Liu et al., 2020), lo que potencialmente acelera el retroceso de los glaciares (Réveillet et al., 2022).

La distribución espacial del BC en zonas altoandinas responde a la interacción entre las circulaciones de escala sinóptica y efectos orográficos locales, como los vientos anabáticos diurnos que ascienden desde los valles hacia las montañas y los vientos catabáticos nocturnos que descienden por la montaña (Bourgeois et al., 2015; Lapere et al., 2023; Moya-Álvarez et al., 2023). En los Andes centrales del Perú, el BC transportado hacia las partes altas proviene principalmente desde dos regiones: del flanco occidental de los Andes, donde predomina la quema de combustibles fósiles y del flanco oriental, influenciado por la quema de biomasa en la

Amazonía, originada mayormente por actividades antropogénicas como cambios en el uso de suelo y prácticas agrícolas (Magalhães et al., 2019; Moya-Álvarez et al., 2023). Estas emisiones de quema de biomasa presentan una marcada estacionalidad y están asociadas a fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Molina et al., 2015; Zubieta et al., 2019). Asimismo, la concentración de BC en la atmósfera baja está controlada por la dinámica de la capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés), cuya altura varía dependiendo del calentamiento superficial. Así, durante el día, cuando la altura de la capa límite es mayor, hay mayor mezcla y, con ello, se incrementa la dispersión del BC y otros contaminantes; mientras que, por la noche, cuando la atmósfera es más estable, la dispersión se reduce.

Aunque los datos in situ de BC son limitados, estudios previos reportan que las concentraciones más altas se encuentran en los glaciares ubicados cerca de las ciudades (Schmitt et al., 2015; Suarez et al., 2017, Villalobos-Puma, et al., 2024). Asimismo, se ha reportado que incluso niveles bajos de BC pueden alterar el balance energético de la superficie glaciar, afectando la disponibilidad de agua regional (Flanner et al., 2007; Qian et al., 2015).

Dada la relevancia de los efectos del BC en regiones de alta montaña, en particular en áreas glaciares, este estudio tiene como objetivo caracterizar la variabilidad espacio-temporal del BC y evaluar su contribución potencial a la Cordillera Huaytapallana, en función de sus fuentes y mecanismos de transporte. El análisis pone énfasis en la región central del Perú, en relación con la zona de transición Andes-Amazonía y el valle del Mantaro. Para ello, se emplearon datos observacionales de BC atmosférico obtenidos en dos puntos de monitoreo, los cuales fueron complementados con simulaciones del modelo WRF-Chem, que permitió representar la distribución espacial del BC atmosférico, y con retrotrayectorias calculadas con el modelo HYSPLIT, para identificar los patrones de transporte asociados. Los resultados presentados en este artículo forman parte de la investigación publicada por Villalobos-Puma et al. (2024).

2. Datos y Métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló en los Andes centrales del Perú, específicamente en la Cordillera Huaytapallana. La Figura 1 muestra el valle del Mantaro, donde se ubica la ciudad de Huancayo (en colores grises). Los glaciares aparecen en color blanco y están

localizados al noreste de Huancayo. El punto E1 (11.938° S, 75.069° W, 4709 m s. n. m.) corresponde al observatorio atmosférico de BC en Huaytapallana (Hyta), que forma parte del Centro de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (CEMGEM) del INAIGEM y el E2 (12.038° S, 75.323° W, 3350 m s. n. m.) indica la ubicación de medición de BC atmosférico en el Observatorio Geofísico de Huancayo (Hyo) del IGP.

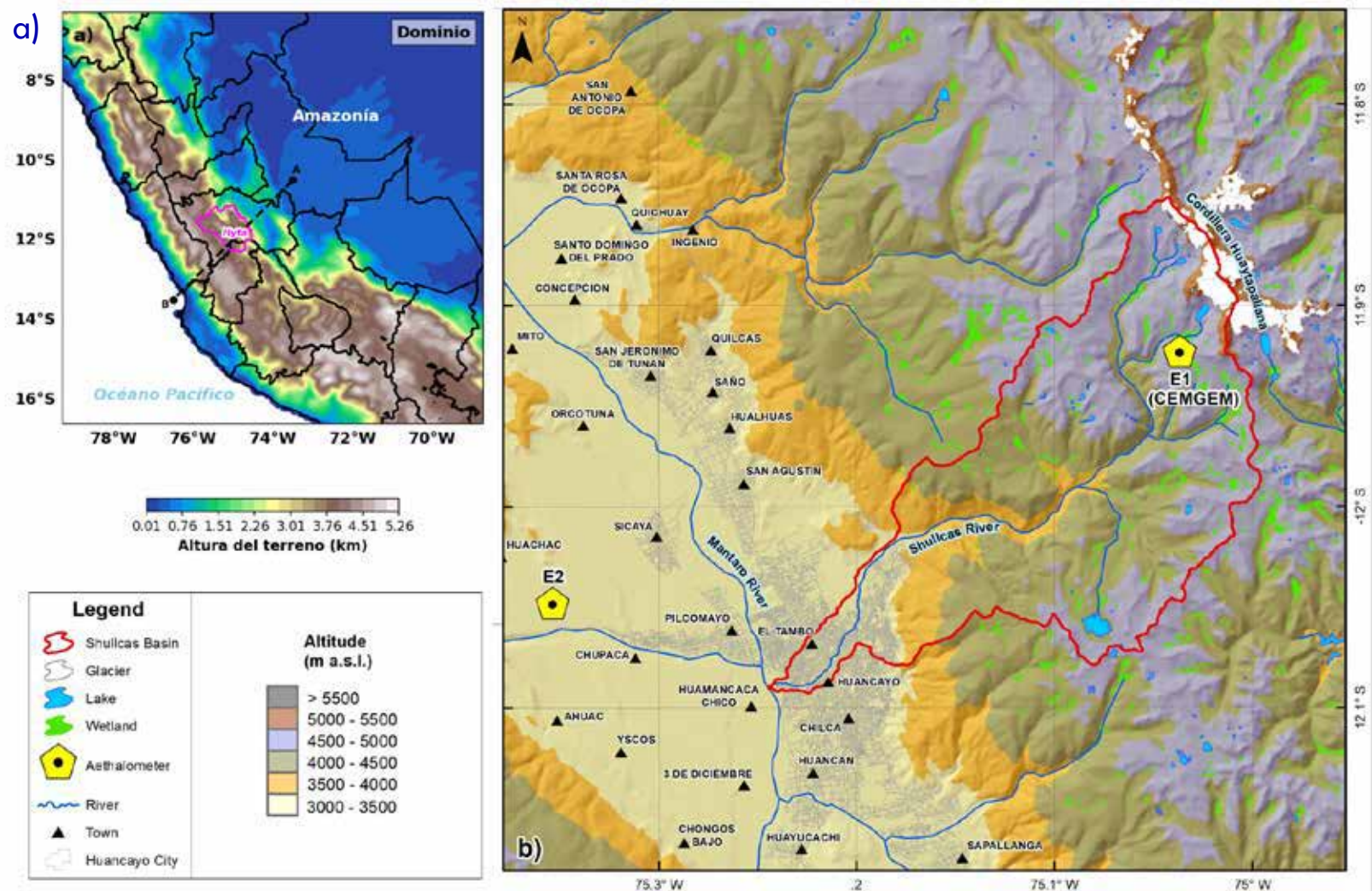


Figura 1. Área de estudio a) dominio simulado con el WRF-Chem, b) el valle del río Mantaro, ciudad de Huancayo y al este, los glaciares de la Cordillera Huaytapallana. E1 (CEMGEM) y E2 indican la ubicación de los etalómetros en la montaña (Hyta) y en el valle (Hyo), respectivamente. Las líneas punteadas de color negro representan a la línea de corte transversal.

Mediciones con el etalómetro

Las mediciones de BC atmosférico se realizaron con un etalómetro, y se representan como carbono negro equivalente (eBC), dado que la técnica de medición se basa en la absorción óptica de la radiación. Esta técnica permite estimar la concentración del BC a partir de la cantidad de luz absorbida. Debido a las distintas formas en que los aerosoles carbonáceos interactúan con la radiación según la longitud de onda, es posible distinguir dos principales fuentes de emisión: la combustión incompleta de combustibles fósiles (BC_{ff}, ff por fossil fuels en inglés) y la quema de biomasa (BC_{bb}, bb por biomass burning en inglés).

Ambos etalómetros (E1 y E2) registran datos con una resolución temporal de un minuto. El período analizado abarca 18 meses, de mayo de 2022 a octubre de 2023. El procesamiento de estos datos se realizó siguiendo los procedimientos descritos en Villalobos-Puma et al. (2024).

Modelo WRF-Chem

WRF-Chem es una versión extendida del Weather Research and Forecasting model (WRF) que incorpora la química de la atmósfera y los aerosoles, acoplándose de manera simultánea con la física y la dinámica (Grell et al., 2005). En este estudio, el modelo

WRF-Chem se utilizó para representar las concentraciones espaciales de BC, incluyendo los procesos de emisión, transporte, mezcla y transformación química de los gases y aerosoles.

Los procesos químicos se integraron al modelo

WRF-Chem mediante esquemas de fase gaseosa, de aerosoles y de fotólisis (Grell et al., 2005). Se tomó en cuenta que los aerosoles alterados químicamente en la atmósfera (contaminantes secundarios) dependen de los esquemas que se establecen en la configuración del modelo (López et al., 2024).

Tabla 1. Configuración del modelo WRF-Chem usado para la simulación de BC

CONFIGURACIÓN	DESCRIPCIÓN
Versión	4.0
Resolución del dominio	9km x 9km
PROCESOS FÍSICOS	
Microfísica	Morrison double-moment
Transferencia de radiación (onda larga, onda corta)	RRTMG
Capa límite planetaria	Yonsei University (YSU)
Cumulus	Grell-Freitas
Física del suelo	Esquema Noah Unified Earth Model
Capa superficial	Surface Layer
PROCESOS QUÍMICOS	
Esquema de fase gaseosa	CBM-Z
Esquema de aerosoles	MOSAIC – 4 bins
Velocidad de reacciones fotolíticas	Esquema de fotólisis Fast-J
DATOS DE ENTRADA DE EMISIONES	
Emisiones biogénicas	MEGAN (1 x 1 km ²)
Emisiones permanentes	EDGARv6.1 (0.1° x 0.1°)
Emisiones estacionales	FINN (1 x 1 km ²)
CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO (IC/BCS)	
Meteorológicas	ERA5 (0.25° x 0.25°)
Químicas	WACCM (0.9° x 1.25°)

La configuración del modelo WRF-Chem usado en el estudio se resume en la Tabla 1 y sigue criterios consistentes con estudios previos que evaluaron la sensibilidad de los parámetros físicos a diferentes resoluciones espaciales en los Andes centrales del Perú (Moya-Álvarez et al., 2018). La preparación y el

preprocesamiento de los datos se realizaron de dos formas (ver Figura 2): mediante el WPS (WRF Processing System) para los datos meteorológicos y topográficos, y con ChePS (Chemical Processing System) para los datos químicos. Debido al alto costo computacional, las simulaciones numéricas se

ejecutaron para un evento extremo detectado por el etalómetro E1, correspondiente al período del 10 de

agosto al 30 de septiembre de 2022, considerando el spin-up de 10 días.

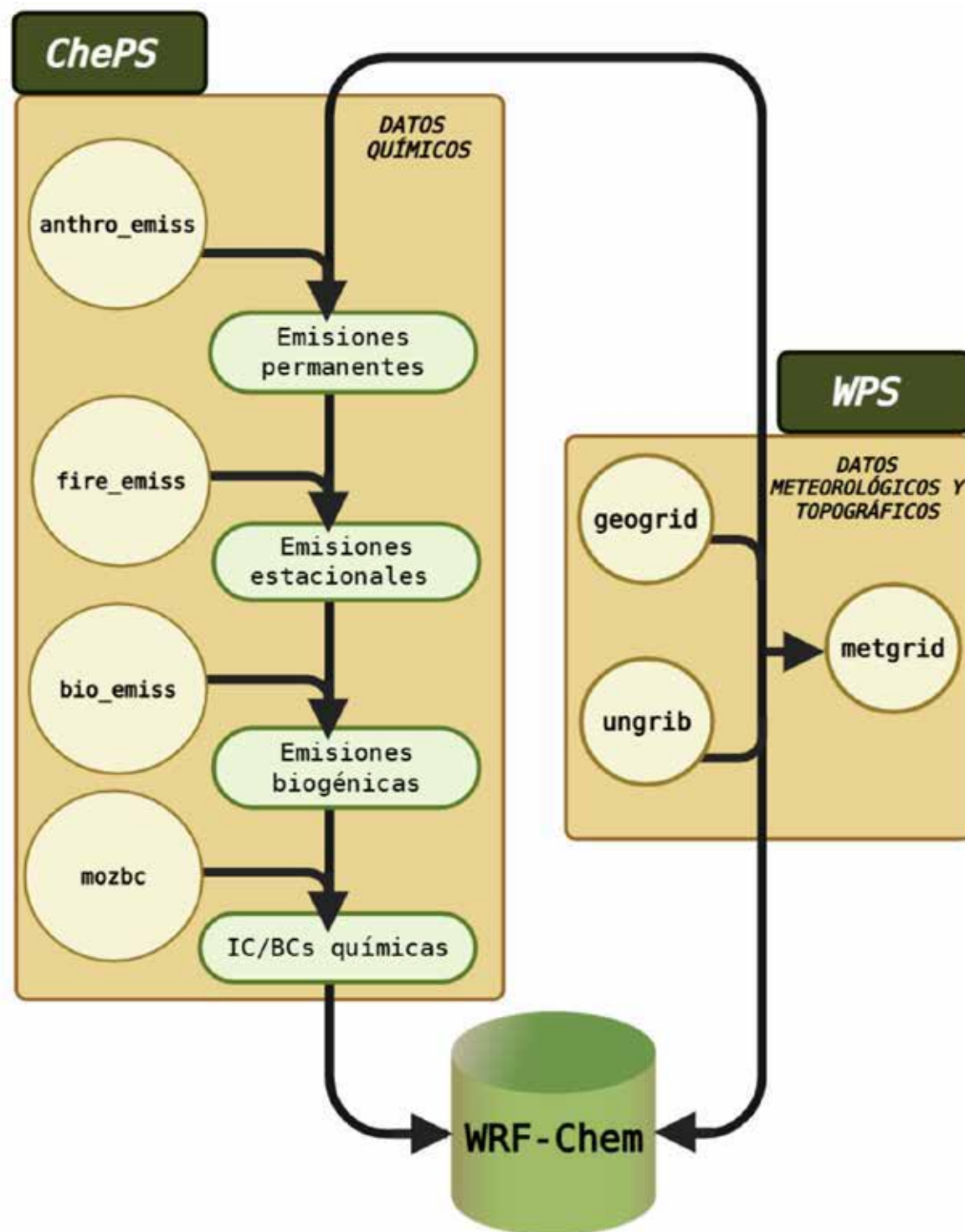


Figura 2. Esquema conceptual del pre-procedimiento realizado para la simulación del BC con el modelo WRF-Chem.

Modelo HYSPLIT

El modelo HYSPLIT se acopló de forma offline al WRF-Chem, empleando sus salidas como entrada para la simulación de las retrotrayectorias. Esta integración permitió incorporar condiciones atmosféricas de alta resolución espacial y temporal, mejorando la representación del transporte de parcelas de aire. A partir del análisis de estas retrotrayectorias, se identificaron regiones con mayor influencia en el transporte de BC hacia la cordillera Huaytapallana, así como la contribución potencial de cada punto geográfico a lo largo de cada trayectoria.

3. Metodología

A partir de los datos observados en el valle y en la montaña, se evidencia una gran contribución de tipo BCff (combustibles fósiles) durante los meses húmedos (DEF, diciembre-enero-febrero), mientras que en los meses secos (JJA, junio-julio-agosto) aumenta la contribución de tipo BCbb (quema de biomasa). En la Cordillera Huaytapallana, los porcentajes de BCff alcanzaron un mínimo en agosto del 2023 y un máximo en febrero del mismo año (Figura 3). Estos resultados evidencian que las emisiones estacionales aportan de manera significativa al total del BC durante los meses de mayores emisiones desde junio a noviembre.

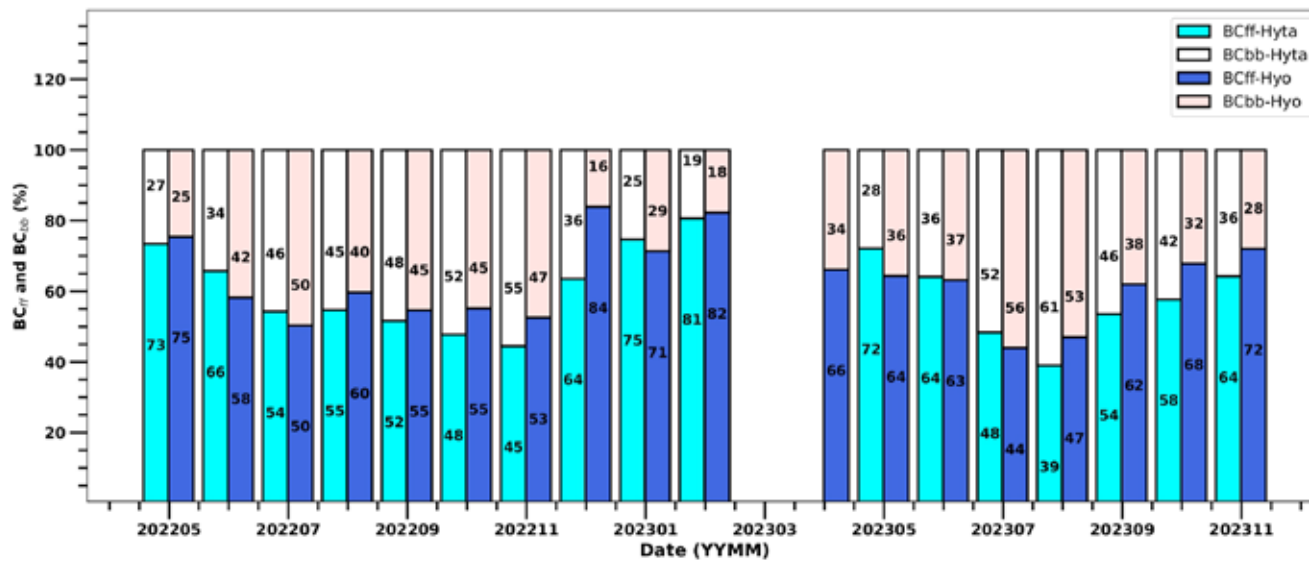


Figura 3. Contribución (%) al BC atmosférico atribuido a las fuentes de emisión BCff (combustibles fósiles) y BCbb (biomasa) para los sitios de monitoreo E1 (Hyta) y E2 (Hyo) durante el período 2022-2023.

La Figura 4 presenta un esquema de las fuentes de BC en distintas épocas del año. Durante la época húmeda (DEF), BCff predomina tanto en el valle como en la montaña, de día y de noche, mostrando una fuerte influencia de emisiones permanentes, probablemente asociada a las actividades humanas desarrolladas en el valle del río Mantaro y la ciudad de Huancayo. En la montaña, la contribución de BCbb aumenta de 33 % en el día a 45 % en la noche, evidenciando la influencia del transporte de emisiones provenientes de la Amazonía a través de las quebradas. En la época

de transición (septiembre a noviembre, SON), las fuentes de BCff predominan en el valle, mientras que en la montaña BCbb supera al BCff durante la noche, reforzando la influencia de la zona de transición Andes-Amazonía. En la estación seca (JJA), BCbb predomina en ambos sitios durante la noche, mientras que el BCff prevalece durante el día, aunque solo en el valle. Estas variaciones responden a la modulación ejercida por la circulación local de los vientos: catabática nocturna (de la montaña hacia el valle) y anabática diurna (del valle hacia la montaña).

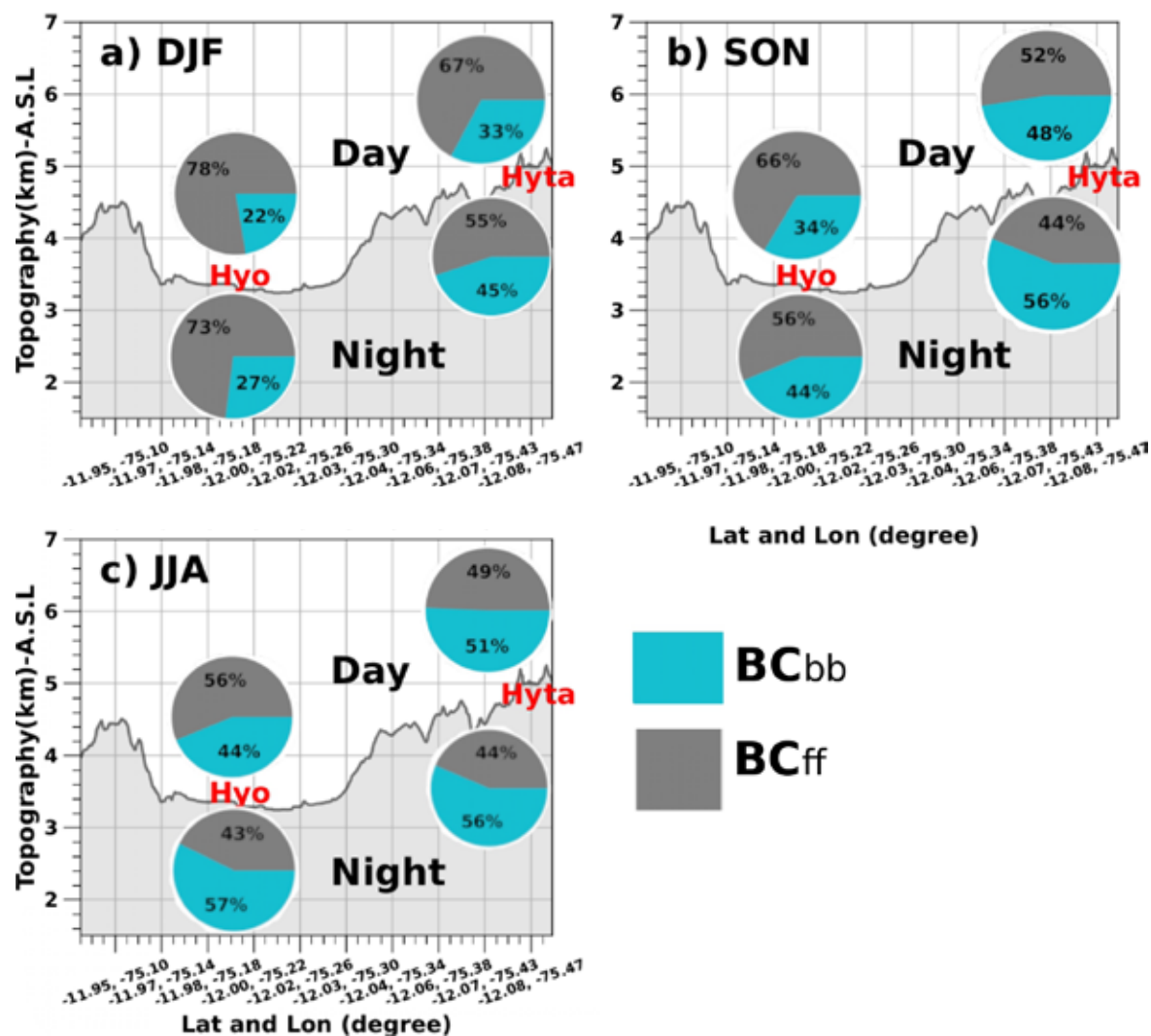


Figura 4. Distribución porcentual de las contribuciones de BC según sus fuentes de emisión (BCff y BCbb) en el valle (Hyo) y en la montaña (Hyta) durante el período 2022-2023; a) estación húmeda (DEF, diciembre-febrero), b) estación de transición (SON, setiembre- noviembre), y c) estación seca (JJA, junio- agosto), para condiciones diurnas y nocturnas.

En la Figura 5, se presenta la distribución espacial simulada del promedio diario de concentración de BC durante el período del 5 al 10 de septiembre de 2022. En los primeros días (a y b), el transporte regional de BC es favorecido por vientos del sureste, que se desplazan paralelos a la cordillera, que la acumulan BC en la ladera oriental de la Cordillera Huaytapallana. En los días posteriores (c y d), la configuración atmosférica cambia y los vientos del noreste mantienen la acumulación y encajonamiento de BC en la misma zona. Este transporte regional, y la

interacción de la circulación de valle-montaña y vientos del este predominantes en niveles medios de la atmósfera, constituye el principal mecanismo de transporte de BC regional hacia Hyta. Bajo estas condiciones atmosféricas, se observa que podría facilitarse la incursión de emisiones de BC provenientes de la zona transición Andes-Amazonía, y en general de la cuenca amazónica, a pesar del efecto barrera de la cordillera de los Andes y de los procesos de deposición y dilución atmosférica (Bourgeois et al., 2015).

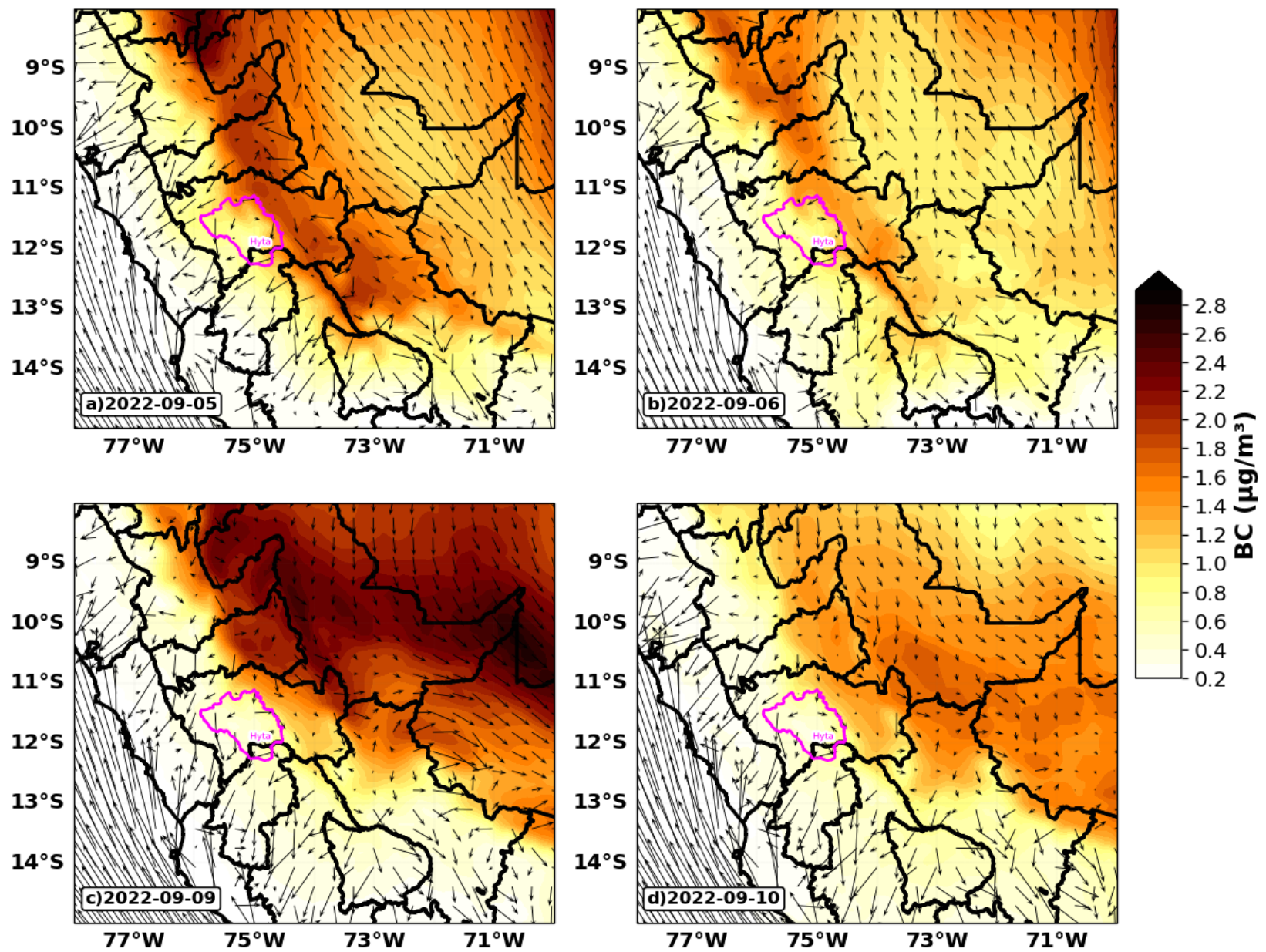


Figura 5. Distribución espacial del promedio diario del BC y campos de viento correspondientes para algunos días representativos de la simulación, mostrando los patrones de transporte y acumulación regional de BC hacia la cordillera Huaytapallana. Los círculos verdes representan los puntos donde ocurrieron las emisiones estacionales.

Las concentraciones más altas de BC se ubican en el flanco oriental de la cordillera, desde la superficie hasta aproximadamente los 4 km de altura, con valores de hasta 1.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 6). A mayor altitud las concentraciones de BC disminuyen progresivamente. Durante la noche (03:00 HL), el BC permanece confinado cerca de la superficie, mientras que en la tarde (15:00 HL), se observa un transporte más intenso hacia niveles altos en la

ladera oriental, llegando a superar los 6 km. Estas condiciones evidencian el aporte de los aerosoles emitidos en la Amazonía y su posterior transporte y ascenso hacia la cordillera. La diferencia de la distribución vertical de BC entre el día y la noche sugiere una fuerte influencia de la capa límite planetaria, aunque no sea mostrado explícitamente en la figura. Esta dinámica es coherente con lo reportado en estudios previos (Hu et al., 2024; Li et al., 2024).

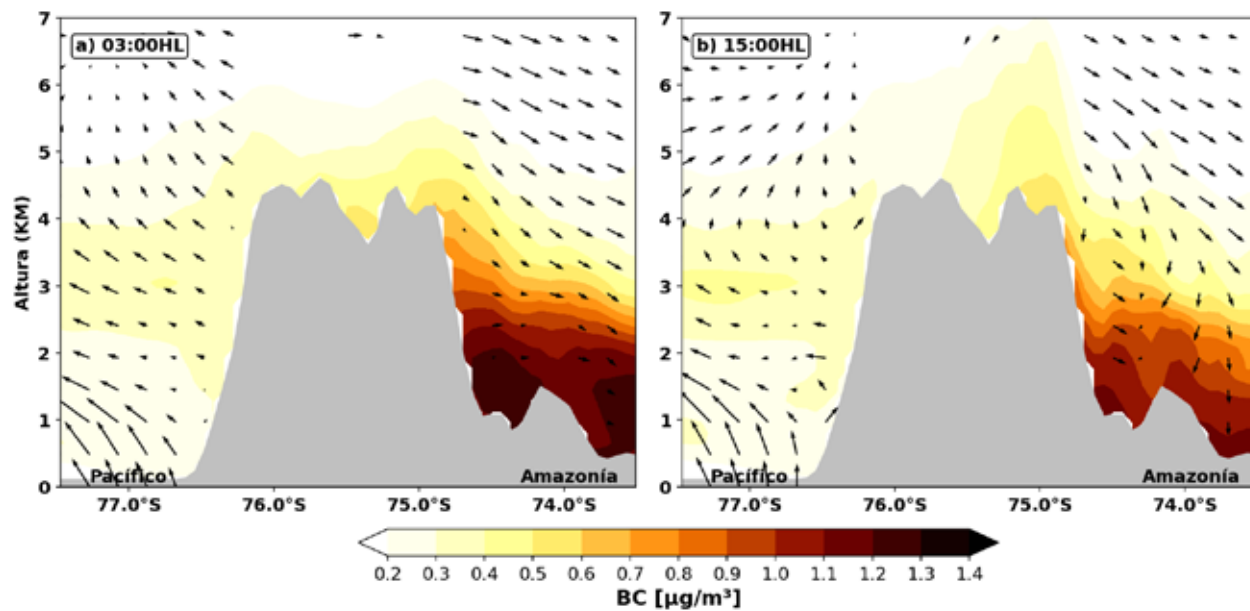


Figura 6. Sección transversal del flujo de BC simulado (ubicación indicada con líneas discontinuas de color negro en la Figura 1) a las 03:00 y 15:00 hora local (HL), promediada para el período del 4 al 13 de setiembre 2022. Los contornos representan la concentración de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que los vectores representan el campo de viento asociado.

Para evaluar la contribución potencial de la concentración de BC que alcanza Hyta desde zonas con concentraciones superiores a $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se presenta en la Figura 7. En ella se muestra el origen de las retrotrayectorias y la distribución espacial promedio del BC simulada para el período del 4 al 13 de setiembre de 2022. En la Figura 7a se distinguen cuatro componentes principales de transporte, destacando la quebrada del norte como la zona con mayor número de retrotrayectorias. Desde el sur, se observa el paso de masas de aire sobre la ciudad de Huancayo, lo que evidencia la contribución urbana permanente, aunque de menor magnitud.

En complemento, la Figura 7b evidencia que las zonas de mayor concentración se ubican en la quebrada del norte de Hyta, alcanzando hasta los $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que al sur los valores no superan $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Expresado en porcentajes, la contribución potencial de los cuatro componentes en Hyta se expresa de la siguiente manera: noroeste (66.1%), noreste (15.6%), sureste (14.7%) y suroeste (3.6%). Estos resultados confirman que el mayor aporte de BC en Hyta proviene principalmente de la zona de transición Andes-Amazonas, donde se ubican las mayores fuentes de emisiones estacionales (ver Figura 5).

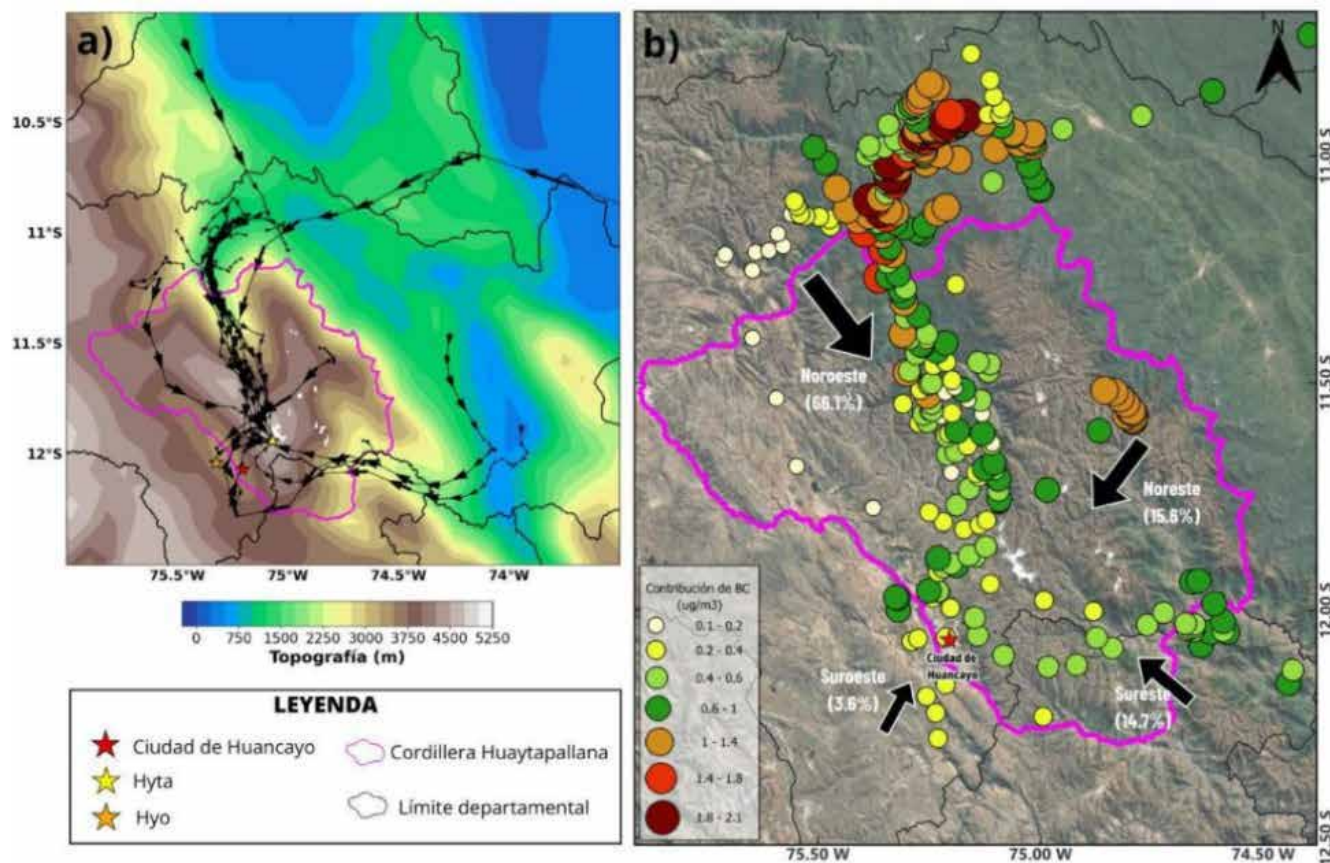


Figura 7. Contribución potencial de la concentración de BC que llega a Hyta (a) retrotrayectorias diarias de las masas de aire teniendo como punto receptor Hyta y (b) promedio espacial de las concentraciones superficiales de BC más altas estimado en cada punto de trayectoria, para el período del 4 al 13 de setiembre 2022.

4. Conclusiones

Este estudio analizó la variabilidad espacio-temporal del carbono negro (BC) y su posible contribución desde regiones con altas concentraciones, considerando la dinámica de interacción valle-montaña en la Cordillera Huaytapallana. El análisis integró datos observacionales (2022-2023), simulaciones con el modelo WRF-Chem para un evento de alta contaminación, y retrotrayectorias de masas de aire obtenidas con el modelo HYSPLIT.

Los resultados sugieren que la presencia y el transporte de BC en el Huaytapallana y sus fuentes estarían modulados por la estacionalidad, la dirección de los vientos y la dinámica local-regional, lo que podría facilitar su transporte tanto desde la ciudad de Huancayo como desde la Amazonía. Además, se observó que durante las noches en la temporada seca (JJA) y de transición (SON) tiende a predominar el BC de origen por quema de biomasa (BC_{bb}), lo cual también se reflejó en el evento simulado, donde la disminución de la altura de la capa límite planetaria parece haber favorecido la acumulación de BC cerca de la superficie.

Asimismo, los resultados indican que la quebrada con orientación norte-sur podría constituir uno de los principales corredores de transporte, concentrando las mayores cargas de BC y aportando hasta un 80 % de tipo biomasa (BC_{bb}) al Huaytapallana durante el evento analizado. Este hallazgo apoya la idea de que el mayor aporte de BC en la cordillera Huaytapallana está vinculado a emisiones estacionales de quema de biomasa, lo que concuerda con las mediciones del etálometro, que registraron un predominio de este tipo de emisiones durante los meses de SON.

Referencias

- Bond, T. C., & Bergstrom, R. W. (2006). Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review. *Aerosol Science and Technology*, 40(1), 27–67.
<https://doi.org/10.1080/02786820500421521>
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., ... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380–5552.
<https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Bourgeois, Q., Ekman, A. M. L., & Krejci, R. (2015). Aerosol transport over the Andes from the Amazon basin to the remote Pacific Ocean: A multiyear CALIOP assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(16), 8411–8425.
<https://doi.org/10.1002/2015JD023254>
- Flanner, M. G., Zender, C. S., Randerson, J. T., & Rasch, P. J. (2007). Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D11), Article D11202.
<https://doi.org/10.1029/2006JD008003>
- Gillardoni, S., Di Mauro, B., & Bonasoni, P. (2022). Black carbon, organic carbon, and mineral dust in South American tropical glaciers: A review. *Global and Planetary Change*, 213, Article 103837.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103837>
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. (2005). Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39(37), 6957–6975.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>
- Hu, Y., Yu, H., Kang, S., Yang, J., Rai, M., Yin, X., Chen, X., & Chen, P. (2024). Aerosol-meteorology feedback diminishes the transboundary transport of black carbon into the Tibetan Plateau. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(1), 85–107.
<https://doi.org/10.5194/acp-24-85-2024>
- Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y., & Wang, H. (2020). A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere. *Earth-Science Reviews*, 210, Article 103346.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346>
- Lapere, R., Huneus, N., Mailler, S., Menut, L., & Couvidat, F. (2023). Meteorological export and deposition fluxes of black carbon on glaciers of the central Chilean Andes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(2), 1749–1768.
<https://doi.org/10.5194/acp-23-1749-2023>
- Li, D., Liu, H., Liu, J., Li, J., & Wang, K. (2024). Impacts of Anthropogenic Emissions and Open Biomass Burning in South Asia and Southeast Asia on

Air Quality and Meteorology Over Southern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(17), e2024JD041267.
<https://doi.org/10.1029/2024JD041267>

Liu, D., He, C., Schwarz, J. P., & Wang, X. (2020). Lifecycle of light-absorbing carbonaceous aerosols in the atmosphere. *npj Climate and Atmospheric Science*, 3(1), Article 40.
<https://doi.org/10.1038/s41612-020-00145-8>

López, E. G., Pepino Minetti, R. C., & Puliafito, S. E. (2024). Análisis de Sensibilidad del Modelo Numérico WRF-Chem al Inventario de Emisiones Antropogénicas. *AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)*, 37, 1-7.
<https://doi.org/10.33414/ajea.1709.2024>

Magalhães, N. de, Evangelista, H., Condom, T., Rabatel, A., & Ginot, P. (2019). Amazonian Biomass Burning Enhances Tropical Andean Glaciers Melting. *Scientific Reports*, 9(1), Article 16914.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-53284-1>

Molina, L. T., Gallardo, L., Andrade, M., Baumgardner, D., Borbor-Córdova, M., Bórquez, R., Casassa, G., Cereceda-Balic, F., Dawidowski, L., Garreaud, R., Huneus, N., Lambert, F., McCarty, J. L., Mc Phee, J., Mena-Carrasco, M., Raga, G. B., Schmitt, C., & Schwarz, J. P. (2015). Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere. *Earth's Future*, 3(12), 345–369.
<https://doi.org/10.1002/2015EF000311>

Moya-Álvarez, A. S., Estevan, R., Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2023). Spatial and temporal distribution of Black Carbon in Peru from the analysis of biomass burning sources and the use of numerical models. *Earth Systems and Environments*, 7(2), 411–430.
<https://doi.org/10.1007/s41748-023-00342-4>

Moya-Álvarez, A. S., Martínez-Castro, D., Flores, J. L., & Silva, Y. (2018). Sensitivity Study on the Influence of Parameterization Schemes in WRF-ARW Model on Short- and Medium-Range Precipitation Forecasts in the Central Andes of Peru. *Advances in Meteorology*, 2018(1), Article 1381092.
<https://doi.org/10.1155/2018/1381092>

Niu, H., Kang, S., Wang, H., Du, J., Pu, T., Zhang, G., Lu, X., Yan, X., Wang, S., & Shi, X. (2020). Light-absorbing impurities accelerating glacial melting in southeastern Tibetan Plateau. *Environmental Nabat,*

Pollution, 257, Article 113541.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113541>

IPCC. (2022). The ocean and cryosphere in a changing climate: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157964>

Qian, Y., Yasunari, T. J., Doherty, S. J., Flanner, M. G., Lau, W. K. M., Ming, J., Wang, H., Wang, M., Warren, S. G., & Zhang, R. (2015). Light-absorbing particles in snow and ice: Measurement and modeling of climatic and hydrological impact. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(1), 64–91.
<https://doi.org/10.1007/s00376-014-0010-0>

Réveillet, M., Dumont, M., Gascoin, S., Lafaysse, M., Nabat, P., Ribes, A., Nheili, R., Tuzet, F., Ménégoz, M., Morin, S., Picard, G., & Ginoux, P. (2022). Black carbon and dust alter the response of mountain snow cover under climate change. *Nature Communications*, 13(1), Article 5279.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-32501-y>

Schmitt, C. G., All, J. D., Schwarz, J. P., Arnott, W. P., Cole, R. J., Lapham, E., & Celestian, A. (2015). Measurements of light-absorbing particles on the glaciers in the Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere*, 9(1), 331–340.
<https://doi.org/10.5194/tc-9-331-2015>

Suarez, L., Torres, C., Helmig, D., & Hueber, J. (2017). Medición y análisis del aerosol de carbono negro en el observatorio de Huancayo, Peru. *Revista Boliviana de Física*, 30(30), 9–17.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232017000100003&lng=es&tlng=es

Villalobos-Puma, E., Suarez, L., Gillardoni, S., Zubieta, R., Martínez-Castro, D., Miranda-Corzo, A., Bonasoni, P., & Silva, Y. (2024). Atmospheric black carbon observations and its valley-mountain dynamics: Eastern cordillera of the central Andes of Peru. *Environmental Pollution*, 355, Article 124089.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124089>

Zubieta, R., Prudencio, F., Alarco, G., & Reupo, J. (2019). Ocurrencia de incendios forestales en el Perú durante eventos El Niño. *Boletín técnico: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 6(5), 5-9.
<http://hdl.handle.net/20.500.12816/4704>

EL INTERCAMBIO DE ENERGÍA Y CARBONO EN LOS ANDES CENTRALES DE PERÚ: AVANCES DEL PROYECTO LAMAR

José Luis Flores Rojas¹

¹ Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

Palabras clave: Eddy Covariance, flujos turbulentos, capa límite atmosférica, cambio climático, Huancayo.

Citar como Flores Rojas J.L. (2025). El intercambio de energía y carbono en los Andes centrales: avances del proyecto LAMAR. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.º 10, págs. 14-18.

¿Cuál es la contribución de esta investigación para los tomadores de decisiones?

Esta investigación ofrece mediciones directas y de alta resolución sobre cómo los cultivos altoandinos intercambian energía, agua y carbono con la atmósfera. Esta información permite determinar, con evidencia local, cuánto estos ecosistemas capturan o emiten carbono hacia la atmósfera a lo largo del día. Estos datos son importantes para ajustar los factores de emisión utilizados en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y para mejorar la evaluación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. Además, al asegurar que las mediciones representen realmente el territorio donde se cultiva, los resultados incrementan la confiabilidad de los modelos que apoyan la planificación agrícola, la gestión del agua y la reducción de riesgos climáticos. En conjunto, esta evidencia ofrece a los tomadores de decisiones una base científica sólida para diseñar políticas más efectivas y focalizadas, orientadas a reducir riesgos climáticos en los Andes centrales.

Resumen

El proyecto LAMAR (Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación) del Instituto Geofísico del Perú fortalece la capacidad nacional de observación climática mediante tecnología avanzada para medir el intercambio de energía, agua y carbono entre la superficie agrícola y la atmósfera en los Andes centrales del Perú. A través del sistema Eddy Covariance, instalado en el Observatorio Geofísico de Huancayo, se cuantifican los flujos turbulentos de dióxido de carbono y vapor de agua (CO_2 y H_2O), complementados con estudios de la Capa Límite Atmosférica (CLA), simulaciones de turbulencia y modelación del footprint o área de influencia. Los resultados permiten caracterizar la respiración del ecosistema agrícola y aportar información esencial para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y las estrategias de adaptación al cambio climático. El fortalecimiento de LAMAR consolida al Perú como referente regional en observaciones de parámetros físicos en la superficie y la atmósfera en zona de montaña.

1. Introducción

Los Andes centrales del Perú constituyen un entorno altamente sensible donde la agricultura depende del equilibrio energético entre suelo y atmósfera. Hasta hace poco, las mediciones directas de flujos turbulentos eran escasas. El proyecto LAMAR, ejecutado en el Observatorio Geofísico de Huancayo ($12^{\circ}02' \text{ S}$, $75^{\circ}19' \text{ O}$; 3350 m s. n. m.), responde a esta necesidad mediante observaciones continuas y de alta frecuencia que describen los procesos de intercambio superficie-atmósfera.

El proyecto "Fortalecimiento de LAMAR" forma parte del programa SINACTI II (Mejoramiento y ampliación de los servicios de Ciencia, Tecnología e Innovación), financiado por PROCENCIA-CONCYTEC (registro E044-2023-01-BM/86050) a través del préstamo del Banco Mundial. Su objetivo general es fortalecer las capacidades de medición y modelado micro-meteorológico del IGP para evaluar medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en la zona agrícola del valle del Mantaro.

2. Metodología

Medición de flujos turbulentos

El núcleo del proyecto es el sistema Eddy Covariance (EC), integrado por un anemómetro sónico tridimensional y un analizador de gases. El primero mide las componentes del viento (U, V, W) y la temperatura a 10 Hz; el segundo registra concentraciones instantáneas de CO₂ y H₂O. A partir de la covarianza entre las fluctuaciones turbulentas de la velocidad vertical (w') y la concentración (c') se obtiene el flujo medio vertical:

$$F = w'c'$$

Este método cuantifica el intercambio neto de gases y energía con alta resolución temporal.

Caracterización de la capa límite atmosférica (CLA)

La CLA es la región de la atmósfera que responde en minutos a la influencia de la superficie: calentamiento radiativo, fricción y evapotranspiración. Se analizan datos de radio-sondeos, realizados en campañas de observación y gradientes térmicos observados mediante sensores instalados en una torre de gradiente, con la finalidad de describir su estructura diurna, desde la capa superficial hasta la capa convectiva (Figura 1).

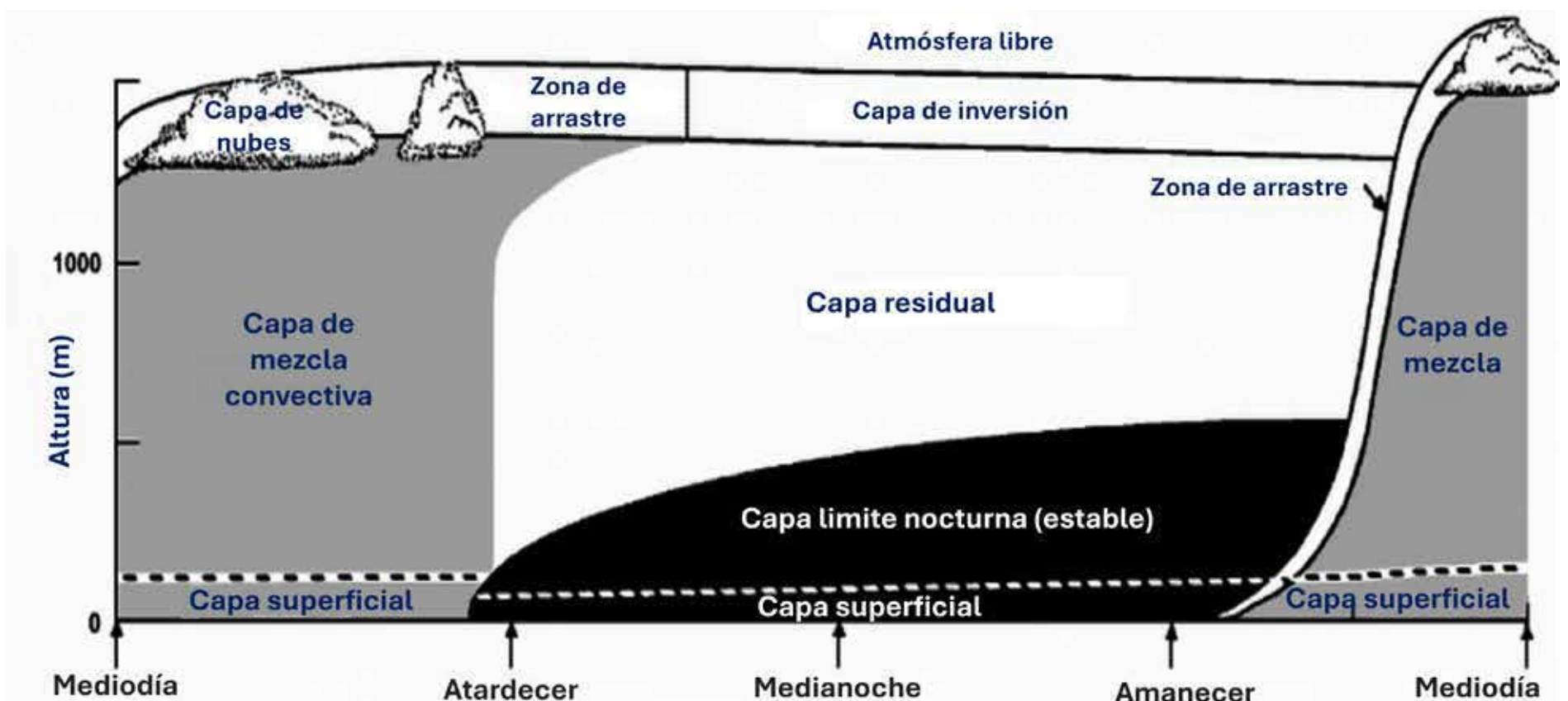


Figura 1. Estructura típica de la CLA durante el día y la noche (adaptado de Stull, 2003).

Modelación de turbulencia y footprint

Se aplican modelos de energía cinética turbulenta (k) y tasa de disipación (ω) (Liu, et.al., 2020). Paralelamente, se calculan *footprints* (Kljun, et.al., 2015) que delimitan el área de contribución de cada medición, considerando la dirección del viento, la rugosidad superficial (z_0) y la altura del sensor. El proyecto adopta criterios de calidad (WMO, 2018) y

procesamiento en Python para el cálculo de covarianzas, detección de anomalías y filtrado nocturno.



Figura 2. Sistema Eddy Covariance para la medición de flujos de vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2), instalado en el Observatorio Geofísico de Huancayo del IGP.

3. Resultados y discusión

Flujos de energía y carbono

Las observaciones del sistema Eddy Covariance (Figura 2) muestran ciclos diurnos definidos: el flujo de calor sensible alcanza su máximo al mediodía, mientras que el de calor latente predomina por la tarde, reflejando una intensa evapotranspiración. Los flujos de CO_2 evidencian fuerte asimilación fotosintética entre 09:00 y 15:00 horas, seguida de emisión nocturna por respiración vegetal y del suelo. Estos datos permiten estimar el balance neto de carbono (NBP), indicador de si el ecosistema actúa como fuente o sumidero de dióxido de carbono.

De acuerdo a las estimaciones del balance hídrico, la ET en las cuencas de los ríos Marañón y Ucayali alcanzó medias anuales de 529 mm y 639 mm, respectivamente, mientras que en la cuenca del Madeira el promedio fue de 971 mm por año (Figura 1). Para los dos años de observaciones en la torre de Quistococha, la ET media anual fue cercana a 1025 mm por año. Baker et al. (2021) reportaron una notable sobreestimación de la ET “observada” —derivada por balances hídricos (11 cuencas) y 6 torres de flujo a lo largo de toda la Amazonía— por parte del producto satelital GLEAM.

Este comportamiento también se observa en los productos grillados ERA5Land, XBASE y TerraClimate para la Amazonía occidental (Figura 1).

Dinámica de la capa límite

El espesor de la CLA varía entre 300 m en la noche y más de 1 500 m al mediodía, en respuesta al calentamiento solar y a la turbulencia convectiva. Este ciclo controla la dispersión de calor y humedad, coincidiendo con observaciones internacionales (Helbig et al., 2021).

Importancia del footprint

El análisis del *footprint* indica que los contornos de contribución de 75 %, 50 % y 25 % para las emisiones de vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) indican que las áreas que influyen en las mediciones se extienden hasta 100-150 metros del sistema Eddy Covariance y que cambian su dirección y alcance según la dirección e intensidad del viento; así como, por la intensidad de la turbulencia, que presenta un ciclo diurno bien definido (Figura 3).

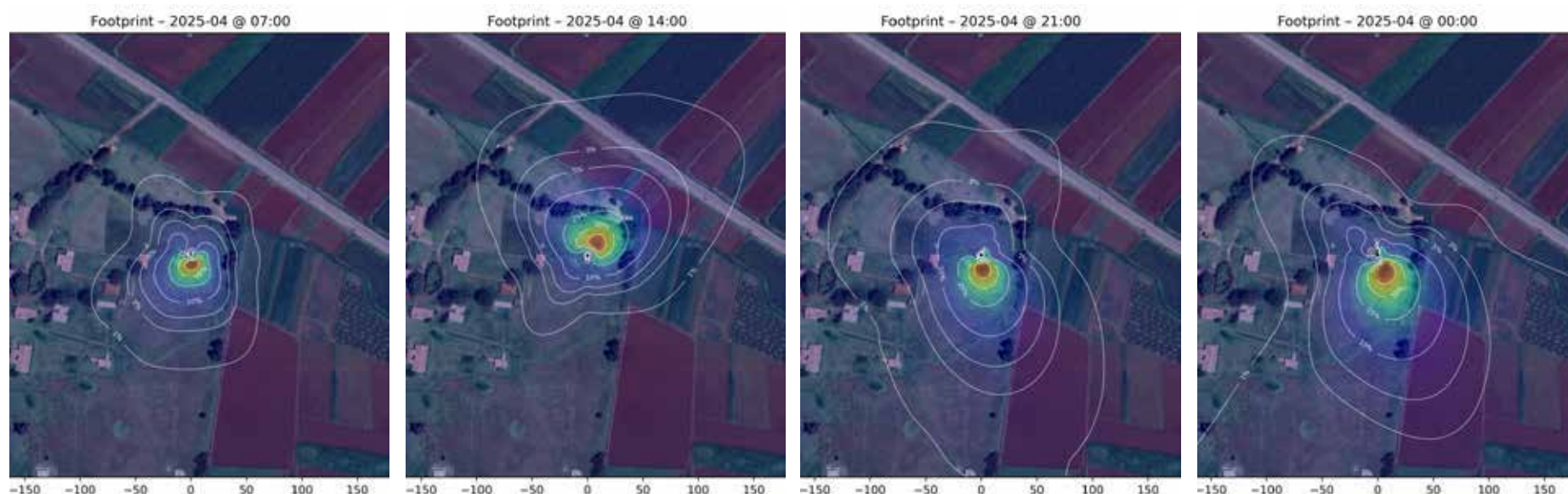


Figura 3. Ejemplos de footprint calculados para el sistema Eddy Covariance para diferentes horas del día con los contornos de 75 %, 50 % y 25 %. Las distancias se indican en metros.

Fotosíntesis y respiración

Los datos de flujos de CO_2 permiten cuantificar la “respiración del ecosistema”. Durante el día, la fotosíntesis supera la respiración, resultando en un flujo negativo (hacia la superficie); de noche, el proceso se invierte. Por otro lado, la captura de carbono por la vegetación se realiza a través de sus estomas abiertas, lo cual resulta también en la pérdida de agua hacia la atmósfera mediante la transpiración, la cual sirve para impulsar el transporte

de nutrientes y agua desde el suelo hacia las hojas, además de contribuir a regular la temperatura de las mismas ante el calentamiento por radiación. Por esto, el flujo de carbono y de agua tienden a ser opuestos a lo largo del día.

La medición directa de estos flujos ofrece una visión integrada del ciclo del carbono y del vapor de agua (Figura 4) en ecosistemas agrícolas altoandinos, relevante para los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero del Perú.

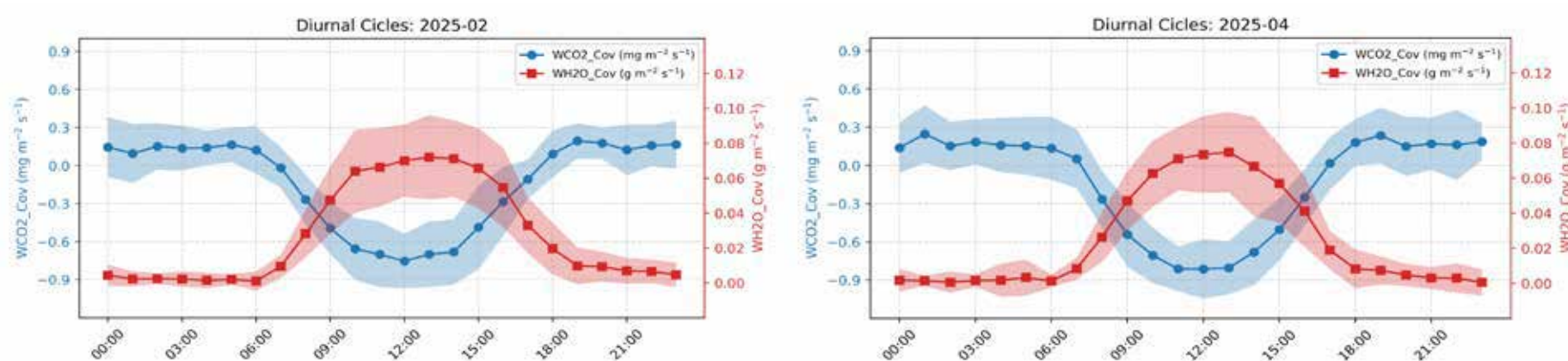


Figura 4. Ciclo diario del flujo vertical de vapor de agua (H_2O) y del dióxido de carbono (CO_2) para los meses de febrero (panel de la izquierda) y abril (panel de la derecha).

Relevancia regional e internacional

El Observatorio Geofísico de Huancayo, fundado en 1922 por la Fundación Carnegie, posee la serie climática más larga del país (1921–presente). LAMAR combina esta tradición histórica con instrumentación moderna: radares de viento y nubes, radiómetros, disdrómetros, sensores de humedad del

suelo, entre otros. Su integración a redes como AmeriFlux (Chu et al., 2023) y GLAFO (Wulfmeyer et al., 2022) pone al Perú en la vanguardia de la investigación de flujos de energía y carbono en montaña y promueve la cooperación científica con Estados Unidos y Alemania.

4. Conclusiones

- LAMAR ha instalado la primera torre de flujos turbulentos en los Andes centrales del Perú, lo que permite cuantificar directamente el intercambio de energía y carbono entre el suelo y la atmósfera.
- Las mediciones revelan alta variabilidad diurna de flujos de calor y CO₂, característica de ecosistemas agrícolas altoandinos.
- El *footprint* confirma la representatividad de las observaciones y facilita el filtrado de influencias externas.
- LAMAR fortalece la investigación micrometeorológica del IGP y sirve como plataforma de formación para nuevos investigadores.
- Los datos generados alimentan modelos climáticos y políticas de mitigación, posicionando al Perú como referente regional en ciencia atmosférica de montaña.

Referencias

- Liu, Y., Liu, Y., Muñoz-Esparza, D., Hu, F., Yan, C., & Miao, S. (2020). Simulation of Flow Fields in Complex Terrain with WRF-LES: Sensitivity Assessment of Different PBL Treatments. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(9), 1481-1501.
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0304.1>
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., and Schmid, H. P. (2015): A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 8(11), 3695-3713,
<https://doi.org/10.5194/gmd-8-3695-2015>
- Chu, H., Christianson, D. S., Cheah, Y.-W., Pastorello, G., O'Brien, F., Geden, J., Ngo, S.-T., Hollowgrass, R., Leibowitz, K., Beekwilder, N. F., Sandesh, M., Dengel, S., Chan, S.W., Santos, A., Delwiche, K., Yi, K., Buechner, C., Baldocchi, D., Papale, D., Keenan, T. F., Biraud, S. C., Agarwal, D. A., & Torn, M. S. (2023). AmeriFlux BASE data pipeline to support network growth and data sharing. *Scientific Data*, 10(1), 614.
<https://doi.org/10.1038/s41597-023-02531-2>
- Helbig, M., Gerken, T., Beamesderfer, E. R., Baldocchi, D. D., Banerjee, T., Biraud, S. C., Brown, W. O. J., Brunsell, N. A., Burakowski, E. A., Burns, S. P., Butterworth, B. J., Chan, W. S., Davis, K. J., Desai, A. R., Fuentes, J. D., Hollinger, D. Y., Kljun, N., Mauder, M., Novick, K. A., ... Richardson, A. D. (2021). Integrating continuous atmospheric boundary layer and tower-based flux measurements to advance understanding of land-atmosphere interactions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, Article 108509.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108509>
- Oke, T. R. (2002). *Boundary Layer Climates*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203407219>
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- Instituto Geofísico del Perú (2025). Proyecto LAMAR: Fortalecimiento del Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación. Wulfmeyer, V., Apituley, A., Berger, F., Breil, M., Bogena, H., Bosfeld, F. C., Chaney, N., Edwards, J., Ek, M., Ferguson, C. R., Findell, K. L., Mauder, M., Rotach, M., Turner, D. D., van Oevelen, P., Vercauteren, N., Vereecken, H., Verhoef, A., Zhang, Y., ... Torn, M. S. (2022). Exploring Terra Incognita in the Earth System: The GEWEX Land-Atmosphere Feedback Observatory (GLAFO). GEWEX/GLASS White Paper.
https://www.gewex.org/gewex-content/uploads/2022/12/221003_GLAFO_White_Paper.pdf

RESUMEN INFORME TÉCNICO

n.º PPR/EL NIÑO-IGP/2025-09

Publicado el 23 de octubre de 2025

Actualmente se observa el arribo de ondas de Kelvin frías a la costa americana, las cuales continuarían presentes en la región hasta hasta fines de noviembre e inicios de diciembre, por lo pronto. Posteriormente, se prevé el arribo, durante el verano, de ondas de Kelvin cálidas. Para agosto, según el Índice Costero El Niño (ICEN) correspondiente a agosto se mantendría en la categoría Neutra (-0.01), al igual que los ICEN temporales (ICEN-tmp) estimados para setiembre (-0.19) y octubre (-0.29). Por su parte, el promedio de los pronósticos de los modelos climáticos de NMME indican, a la fecha, que las anomalías de la temperatura superficial del mar frente a la costa norte y centro del Perú se mantendrían dentro de la categoría Neutra hasta abril de 2026; sin embargo, entre abril y mayo de 2026, los modelos pronostican el desarrollo de un evento El Niño costero. En el Pacífico central, el Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) de agosto (-0.32) corresponde a la categoría Neutra. Los valores del ONI temporales de setiembre (-0.49) y octubre (-0.65), corresponden a las categorías Neutra y Frías Débiles, respectivamente. El promedio de los pronósticos de los modelos climáticos de NMME indican el desarrollo de un evento La Niña en el Pacífico central de magnitud débil, el cual se iniciaría en octubre y concluiría en enero de 2026. Posteriormente, se observa una tendencia positiva del ONI que alcanza la categoría Cálida Débil en junio de 2026.

El informe técnico completo se encuentra disponible en: <https://bit.ly/4p8V8qU>



Advertencia: El presente informe sirve como insumo para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN). El pronunciamiento colegiado de la comisión multisectorial del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

COMUNICADO OFICIAL

EFEN n.º 11 - 2025



ESTUDIO NACIONAL DEL
FENÓMENO "EL NIÑO"

COMISIÓN MULTISECTORIAL ENCARGADA
DEL ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO "EL NIÑO" – ENFEN
Decreto Supremo n.º 007-2017-PRODUCE

Estado del sistema de alerta: No activo¹

Publicado el 17 de octubre de 2025

La Comisión Multisectorial del ENFEN, en base al análisis de las condiciones oceánicas y atmosféricas observadas hasta la fecha, así como de los pronósticos de los modelos climáticos nacionales e internacionales, mantiene el Estado del Sistema de Alerta ante El Niño Costero/La Niña Costera como "No Activo" en la región Niño 1+2 (Figura 1). Para el verano 2025-2026, se estima una probabilidad de 55 % que la temperatura superficial del mar en la región Niño 1+2 continúe con valores dentro de la condición neutra², seguido de una probabilidad de 35 % de condiciones cálidas (Tabla 1, Figura 2).

Por otro lado, en el Pacífico central (región Niño 3.4, Figura 1), es más probable que la condición fría débil continúe hasta diciembre de 2025. Para el verano 2025-2026 es más probable la condición neutra (51 %),

con un segundo escenario probable (39 %) de la condición fría (Tabla 2, Figura 2).

Para el otoño 2026, tanto en la región 1+2 como en la región 3.4, considerando las limitaciones de la predictibilidad, es más probable el desarrollo de condiciones cálidas.

Para el trimestre octubre– diciembre³ de 2025, se prevén temperaturas del aire dentro de sus rangos normales en la costa peruana y precipitaciones inferiores a lo normal en la costa norte, mientras que, en la vertiente occidental andina norte y centro, es más probable un escenario de lluvias entre normales a por debajo de lo normal. En cuanto al pronóstico hidrológico⁴, se prevé que en los ríos de la Vertiente Hidrográfica del Pacífico predominen caudales normales.

¹ No activo: Ocurre cuando se presentan condiciones neutras o, cuando de acuerdo al análisis de las condiciones oceánicas y atmosféricas observadas y de la predicción de los modelos climáticos, el pronóstico probabilístico mensual del Índice Costero El Niño (ICEN) indica que la probabilidad de la categoría neutra superará el 50% durante al menos los siguientes tres meses consecutivos (Nota Técnica ENFEN 02-2024;

<https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-02-2024-sistema-de-alerta-ante-el-nino-y-la-nina-costera/>)

² Las condiciones mensuales se establecen en base al valor del ICEN. En el caso de la condición neutra, esta corresponde cuando el valor del ICEN es mayor o igual que -0.7 y menor o igual que +0.5 (Nota Técnica ENFEN 01-2024; <https://enfen.imarpe.gob.pe/download/notatecnica-enfen-01-2024-definicion-operacional-de-los-eventos-el-nino-costero-y-la-nina-costera-en-el-peru/>). Para el caso del Pacífico central, la condición neutra se considera cuando el valor del ONI es mayor que -0.5 y menor que +0.5

(https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

En cuanto a los recursos pesqueros, para las próximas semanas, se espera que en la región norte-centro continúe el desove de la anchoveta de acuerdo al patrón histórico. En el caso de los recursos transzonales, se mantendrá la disponibilidad del jurel y caballa. Además, se espera que se incrementen los procesos de maduración gonadal y desove de los recursos bonito y del jurel, de acuerdo al patrón estacional.

Se recomienda a los tomadores de decisiones adoptar medidas correspondientes a la prevención, preparación y reducción del riesgo de desastres. Asimismo, se sugiere dar seguimiento constante a los avisos meteorológicos⁵ y pronósticos estacionales⁶, para las acciones correspondientes. Por otro lado, se exhorta a la población a mantenerse informada a través de las fuentes oficiales del ENFEN.

La Comisión Multisectorial del ENFEN continuará monitoreando la evolución de las condiciones oceánicas, atmosféricas y biológicas-pesqueras, y

actualizando las perspectivas. La emisión del próximo Comunicado Oficial ordinario será el martes 18 de noviembre de 2025.

- Para más información, consultar el Informe Técnico en el siguiente enlace: <https://bit.ly/4pjMgPl>

INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN



³ <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-64.pdf>

⁴ <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02694SENA-62.pdf>

⁵ <https://www.senamhi.gob.pe/?p=aviso-meteorologico>

⁶ <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-climatico&pro=trimestral>



-  @igp.peru
-  @igp_peru
-  @igp.peru
-  @igp_videos
-  @institutogeofisicodelperu
-  @igp.peru