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

Andrea Miranda-Corzo[1], Elver Villalobos-Puma[1], Ricardo Zubieta[2] y Yamina Silva[2]

[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.° 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 & Bergstrom, 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.

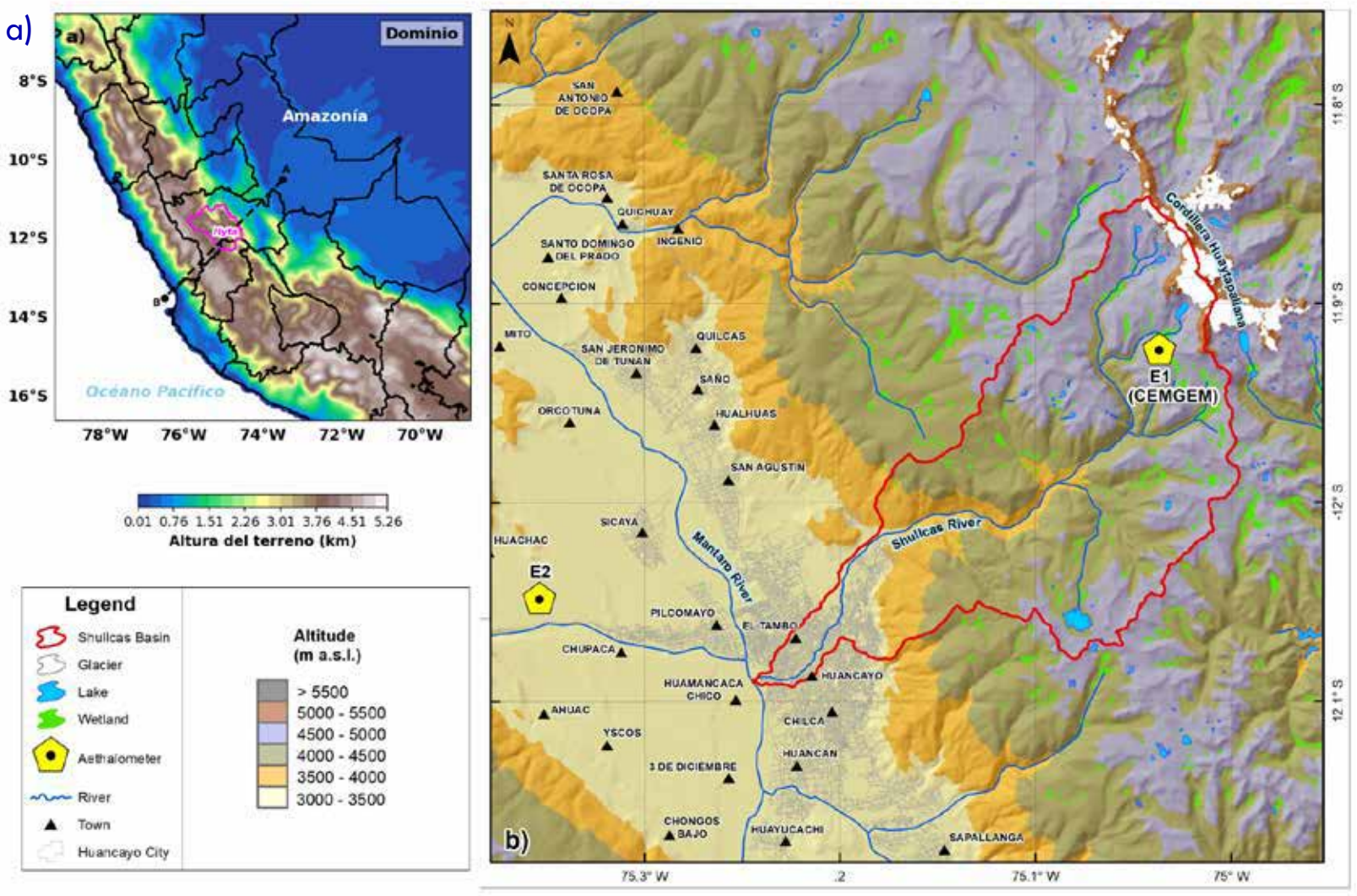

Figura 1. Área de estudio a) dominio simulado con el WRF-Chem, b) el valle del río Mantaro, ciudad de Huancayo y al este, los glaciares de la Cordillera Huaytapallana. E1 (CEMGEM) y E2 indican la ubicación de los etalómetros en la montaña (Hyta) y en el valle (Hyo), respectivamente. Las líneas punteadas 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 (BCff, ff por fossil fuels en inglés) y la quema de biomasa (BCbb, 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.

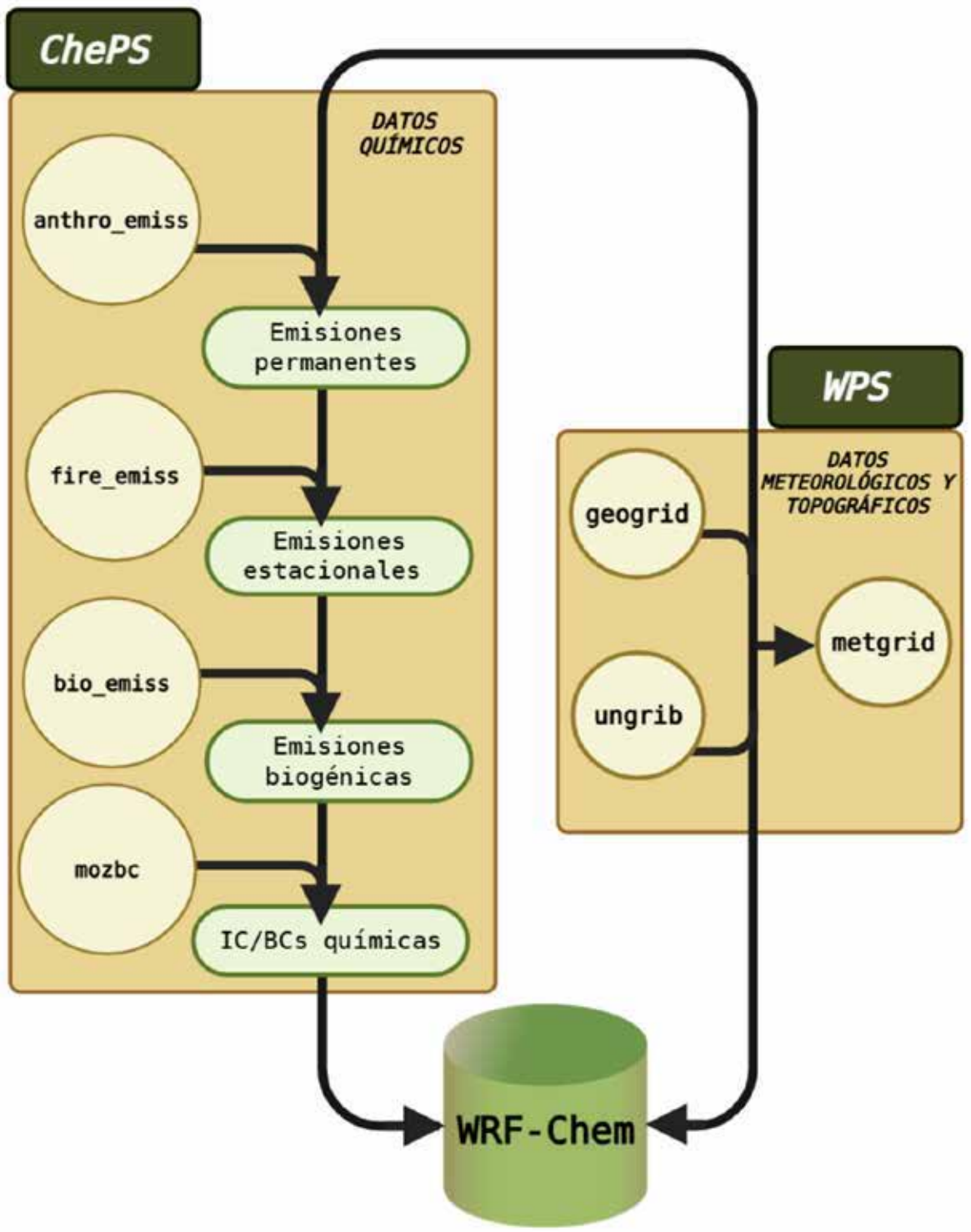

Figura 2. Esquema conceptual del pre-procedimiento realizado para la simulación del BC con el modelo WRF-Chem.

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.

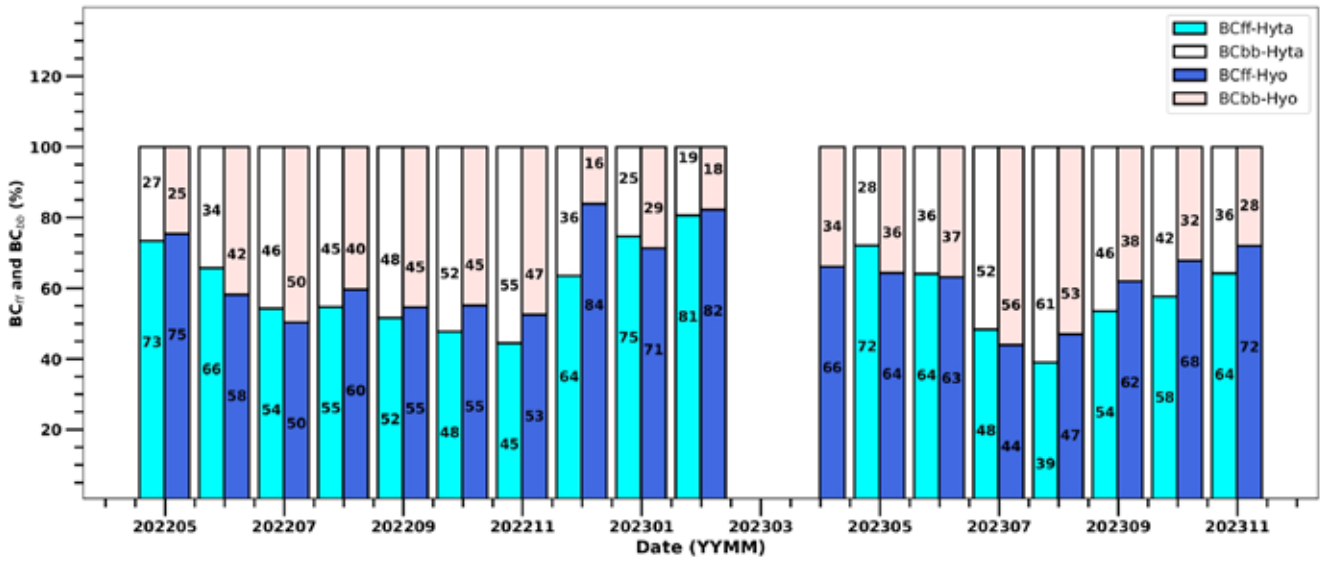

Figura 3. Contribución (%) al BC atmosférico atribuido a las fuentes de emisión BCff (combustibles fósiles) y BCbb (biomasa) para los sitios de monitoreo E1 (Hyta) y E2 (Hyo) durante el período 2022-2023.

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).

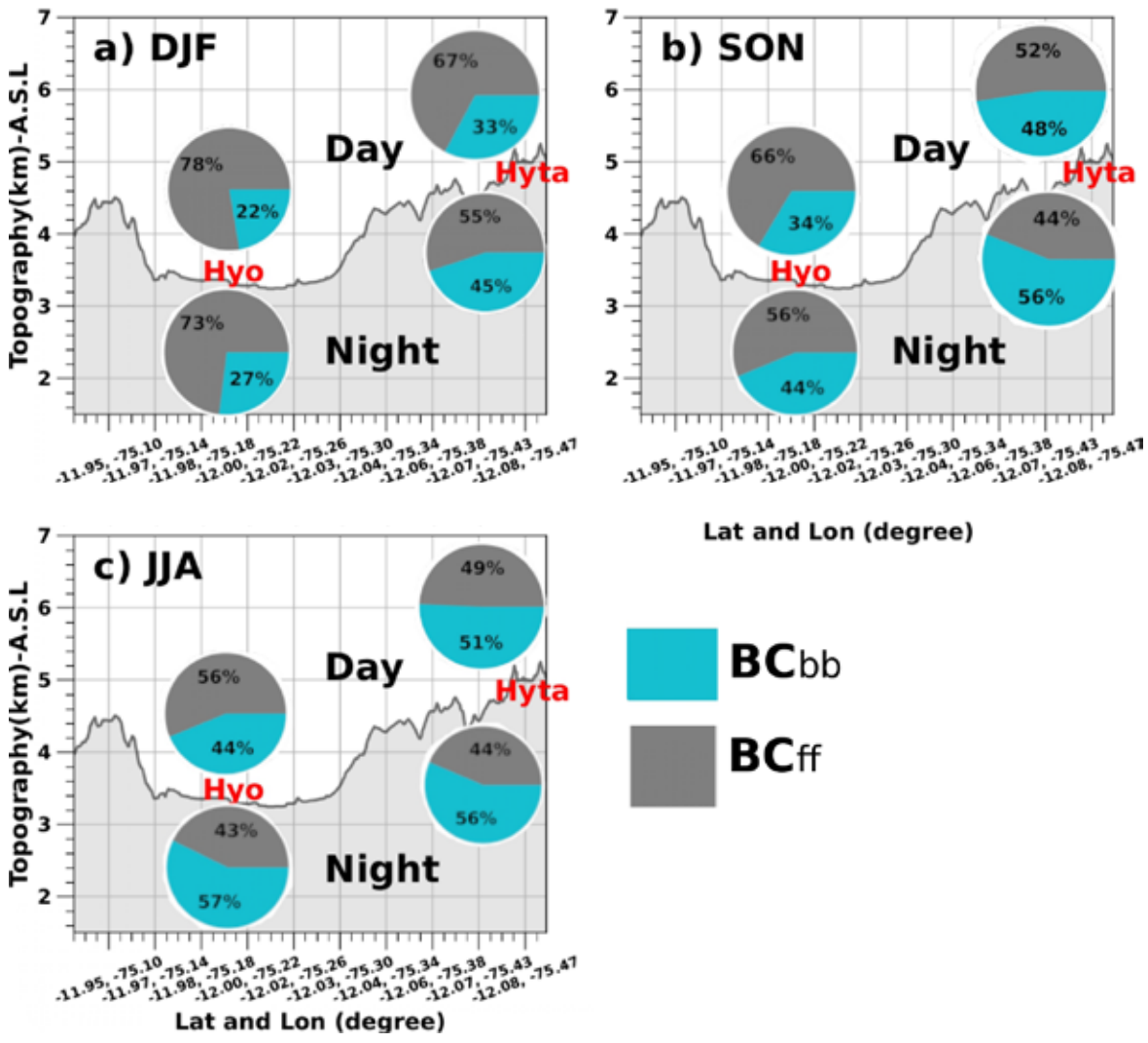

Figura 4. Distribución porcentual de las contribuciones de BC según sus fuentes de emisión (BCff y BCbb) en el valle (Hyo) y en la montaña (Hyta) durante el período 2022-2023; a) estación húmeda (DEF, diciembre-febrero), b) estación de transición (SON, setiembre- noviembre, y c) estación seca (JJA, junio-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

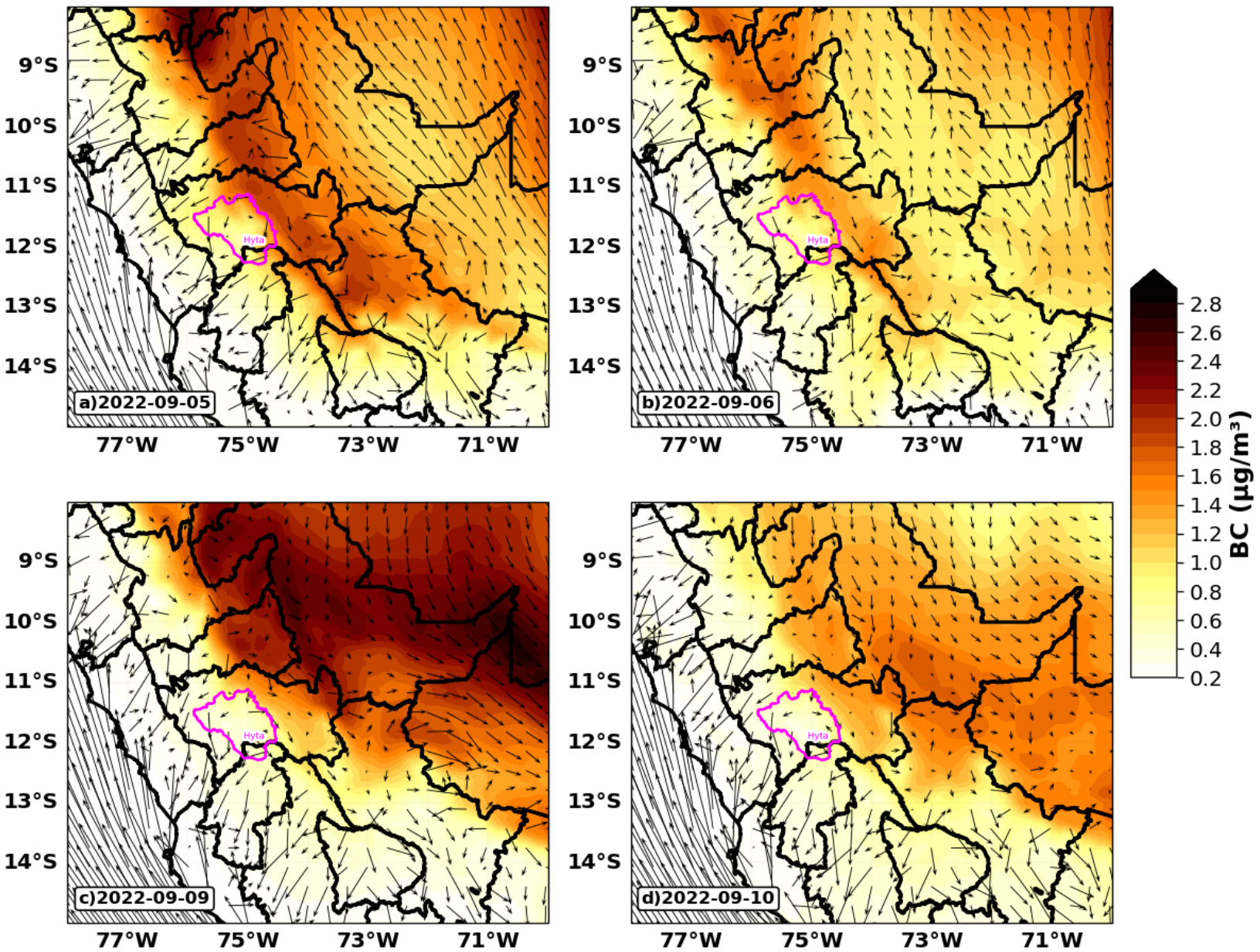

Figura 5. Distribución espacial del promedio diario del BC y campos de viento correspondientes para algunos días representativos de la simulación, mostrando los patrones de transporte y acumulación regional de BC hacia la cordillera Huaytapallana. Los círculos verdes representan los puntos donde ocurrieron 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 µg/m3 (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).

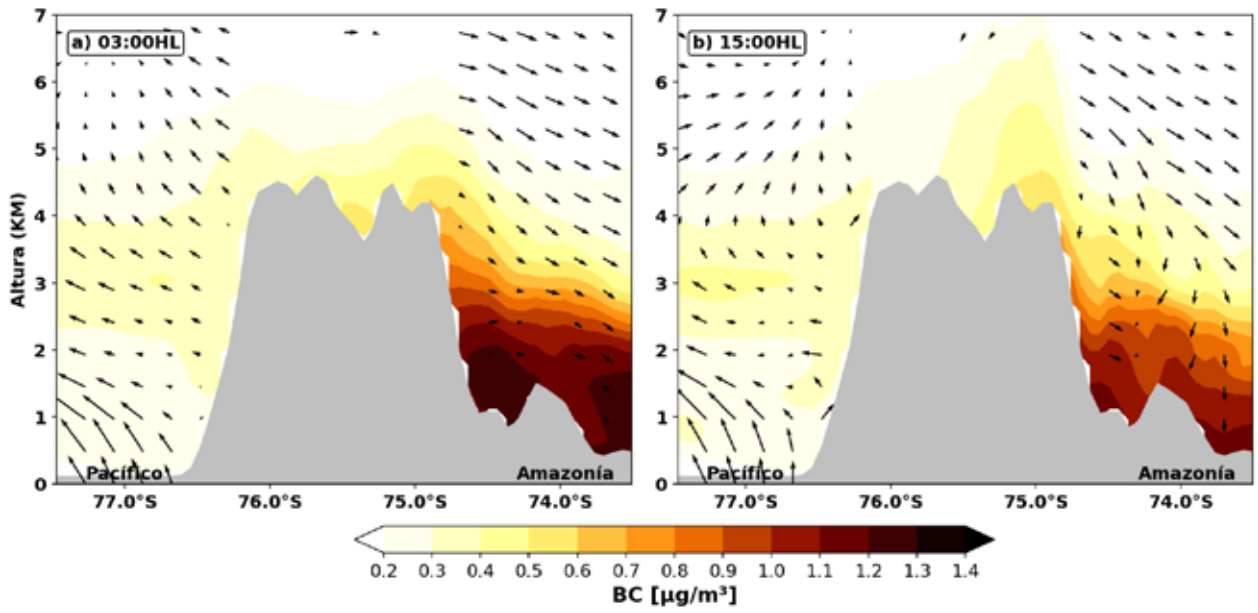

Figura 6. Sección transversal del flujo de BC simulado (ubicación indicada con líneas discontinuas de color negro en la Figura 1) a las 03:00 y 15:00 hora local (HL), promediada para el período del 4 al 13 de setiembre 2022. Los contornos representan la concentración de BC (µg/m3), mientras que los vectores 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 µg/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 septiembre 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 µg/m^3, mientras que al sur los valores no superan 1 µg/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).

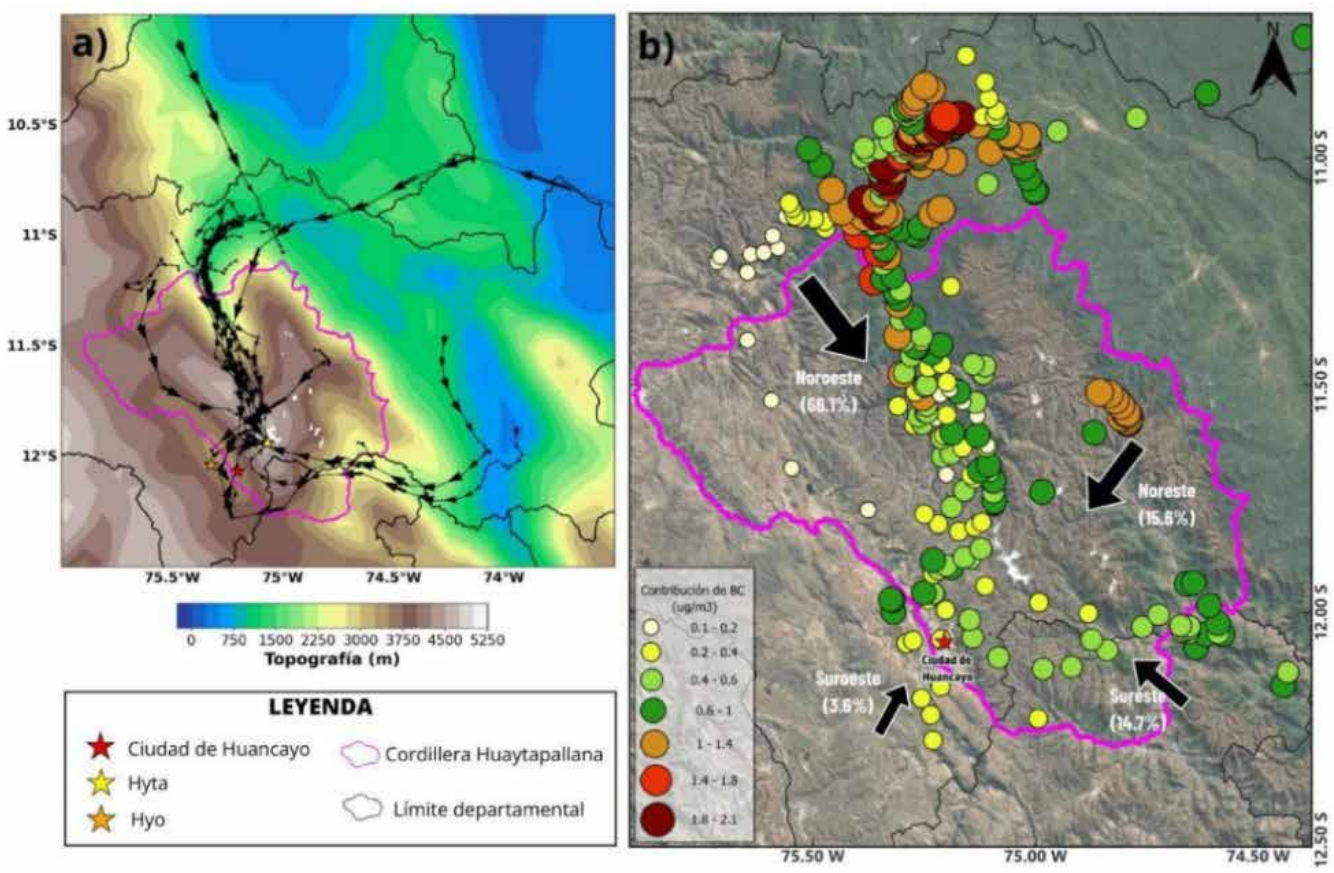

Figura 7. Contribución potencial de la concentración de BC que llega a Hyta (a) retrotrayectorias diarias de las masas de aire teniendo como punto receptor Hyta y (b) promedio espacial de las concentraciones superficiales de BC más altas estimado en cada punto de trayectoria, para el período del 4 al 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 (BCbb), 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 (BCbb) 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., Huneeus, 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-Cõrdova, M., Bõrquez, R., Casassa, G., Cereceda-Balic, F., Dawidowski, L., Garreaud, R., Huneeus, 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., Martinez-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