

CARBONO NEGRO

Partículas atmosféricas contaminantes que amenazan a los Glaciares del Perú



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares
y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)

Av. Centenario 2656, Independencia,
Huaraz, Áncash
www.gob.pe/inaigem

Editado por:

© Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)

Sede ODMRC: Av. Comandante Espinar Nro. 860 - Oficina 301, Miraflores, Lima, Perú

Elaborado por:

Mg. Elver Villalobos Puma

Revisado por:

Dr. Pedro Tapia Ormeño

Diseño y diagramación:

Joan Ramírez Romero
Sabí Torbisco Cervantes
Martín Benites Morales

Fotografías

Equipo INAIGEM ODMRC
David Guizado Vidal
Elver Villalobos Puma

Favor de citar la publicación como se indica:

INAIGEM (2023). Carbono Negro: Partículas atmosféricas contaminantes que amenazan a los Glaciares del Perú. (Folleto de divulgación). Oficina Desconcentrada Macro Región Centro. Lima, 20 pp.

www.inaigem.gob.pe
Septiembre 2023

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA (INAIGEM)

Alta Dirección

Beatriz Fuentealba Durand
Presidente Ejecutivo

Milagros Vilchez Cáceres
Gerenta General

Directores y jefes de oficinas desconcentradas:

Jesús Gómez López
Director de Investigación en Glaciares (DIG)

Francisco Medina Castro
Director de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM)

Jessenia Cárdenas Campana
Dirección de Información y Gestión del Conocimiento (DIGC)

Pedro Tapia Ormeño
Oficina Desconcentrada Macro Región Centro- Lima (ODMRC)

Víctor Bustinza Urviola
Oficina Desconcentrada Macro Región Sur - Cusco (ODMRS)

CARBONO NEGRO

Partículas atmosféricas contaminantes
que amenazan a los Glaciares del Perú

Los glaciares de las cuencas andinas están enfrentando los efectos globales del cambio climático que inducen el incremento de la temperatura del aire en la capa troposférica y cambios de porcentajes en las fases de precipitación líquida y sólida (nieve). Además del cambio climático, existen factores potenciales de carácter local y regional conocidos como las partículas atmosféricas contaminantes o partículas absorbentes de luz (PALs), siendo el hollín o carbono negro (CN) el componente principal que provoca el retroceso acelerado del sistema glaciar. Estos contaminantes atmosféricos representan una amenaza directa para los glaciares y reservas sólidas de recursos hídricos debido a su rápido derretimiento en el Perú. Además, al transportarse el CN en la escorrentía pueden generar impactos negativos en la calidad del agua de alta montaña.

Los glaciares al ser una superficie blanca tienen la capacidad de modular localmente el balance de energía generando un forzamiento positivo en el sistema climático, a su vez, estas masas de hielo representan un recurso hídrico y su conservación a lo largo del tiempo es crucial en la región andina, ya que, la fusión de la nieve/hielo (cambio de fase desde sólido a líquido) genera escorrentía y contribuyen al volumen total del caudal. Especialmente, durante el periodo seco, cuando no hay precipitaciones el agua proveniente desde los glaciares sostiene el volumen de los ríos, las lagunas y el sistema hídrico de la subcuenca, siendo imprescindible en un periodo de alta necesidad para el consumo de agua en las poblaciones andinas. El 68.5% de los glaciares tropicales se encuentran en el Perú (Veettil & Kamp, 2019), reciben gran variedad de contaminantes atmosféricos y elementos geoquímicos que se generan en las zonas cercanas y más bajas, en algunas ocasiones estos mantos blancos (superficies glaciares) se comportan como una esponja de acumulación de contaminantes y potencialmente pueden ser afectados por contaminantes atmosféricos que se producen a escala regional y local (Magalhães et al., 2019).

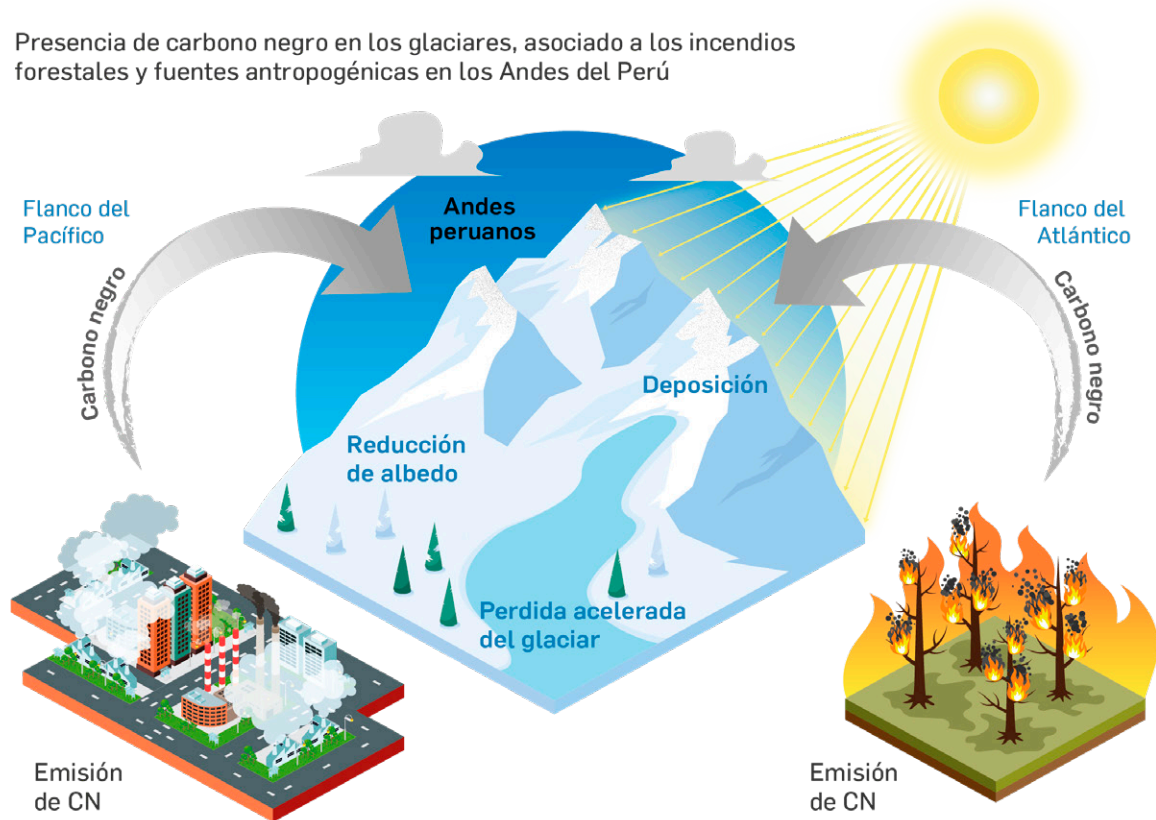
En la figura 1, se muestra un esquema representativo de potenciales fuentes de CN regionalizado para los Andes peruanos. En el cual, se observa que el sistema glaciar a escala regional recibe partículas contaminantes atmosféricas transportadas desde ambos flancos de los Andes: flanco del Pacífico asociado a las industrias y actividades antropogénicas desarrolladas en las ciudades costeras, y el flanco del Atlántico asociado a las

quemadas de biomasa como los incendios forestales que ocurren en extensiones grandes sobre las áreas de la Amazonia, incluido los países vecinos como Brasil y Bolivia. En un contexto local (Figura 1), el sistema glaciar al recibir los contaminantes atmosféricos, inmediatamente altera su coloración y su estado natural generando un impacto directo en las propiedades ópticas de la nieve y el hielo. Además, se producen la formación de Crioconitas, los cuales son perforaciones de distintos tamaños que se forman por la acumulación de PALs en determinados puntos de superficie glaciar, y en consecuencia provocan grandes pérdidas de su masa. En la figura 2 se muestra el árbol de problemas, las causas, el problema central y las consecuencias que existen en los glaciares peruanos debido a los contaminantes atmosféricos. El CN atmosférico es un contaminante de corta vida que permanece por días y semanas durante su transporte en la atmósfera desde la fuente de emisión hasta su deposición, a escala local y regional (Pörtner et al., 2019). La presencia de CN en la atmósfera y principalmente cuando se deposita sobre la superficie glaciar, genera impactos negativos a los elementos de ecosistemas glaciares y periglaciares de alta montaña, así como, a la salud de las personas (Molina et al. 2015; Pörtner et al. 2019; Gilardoni et al. 2022). Siendo el CN atmosférico uno de los forzantes del calentamiento global, además, ejerce una fuerte influencia sobre los cuerpos glaciares, así como en la microfísica de las nubes y precipitaciones. Para el caso específico del clima, incrementa el calentamiento de la capa baja de la tropósfera y contribuye al cambio climático (Pörtner et al., 2019, Niu et al., 2020). El efecto cuando se deposita sobre la superficie de un glaciar es el de disminuir el albedo de la nieve y hielo, y en consecuencia incrementa la absorción de la radiación solar, generando un proceso acelerado de incremento de la temperatura en el entorno de la partícula, que acelera la fusión de la nieve y el derretimiento del glaciar (Kang et al. 2020; Liu et al. 2020).

La mayoría de los eventos de incendios que ocurre en la región andina del Perú está asociada a las sequías estacionales y a los forzantes atmosféricos y oceánicos, principalmente asociado a procesos de teleconexiones que ocurren en el Pacífico central. Por ejemplo, el año 2020 caracterizado como un año de sequía estacional y en una condición de La Niña del Pacífico Central, el número de eventos de incendios se incrementó en un 400% (Zubieta et al., 2023). El estado atmosférico asociado con El Niño-Oscilación Sur (ENSO) en nuestra región tiene un

CONTEXTO REGIONAL: CARBONO NEGRO

Presencia de carbono negro en los glaciares, asociado a los incendios forestales y fuentes antropogénicas en los Andes del Perú



CONTEXTO LOCAL: CARBONO NEGRO

A) Superficie glaciar contaminada

Deposición de Carbono Negro en el glaciar

- Oscurece el brillo de la nieve/firn
- Genera la fusión de la nieve/firn
- Impacta en el recurso hídrico

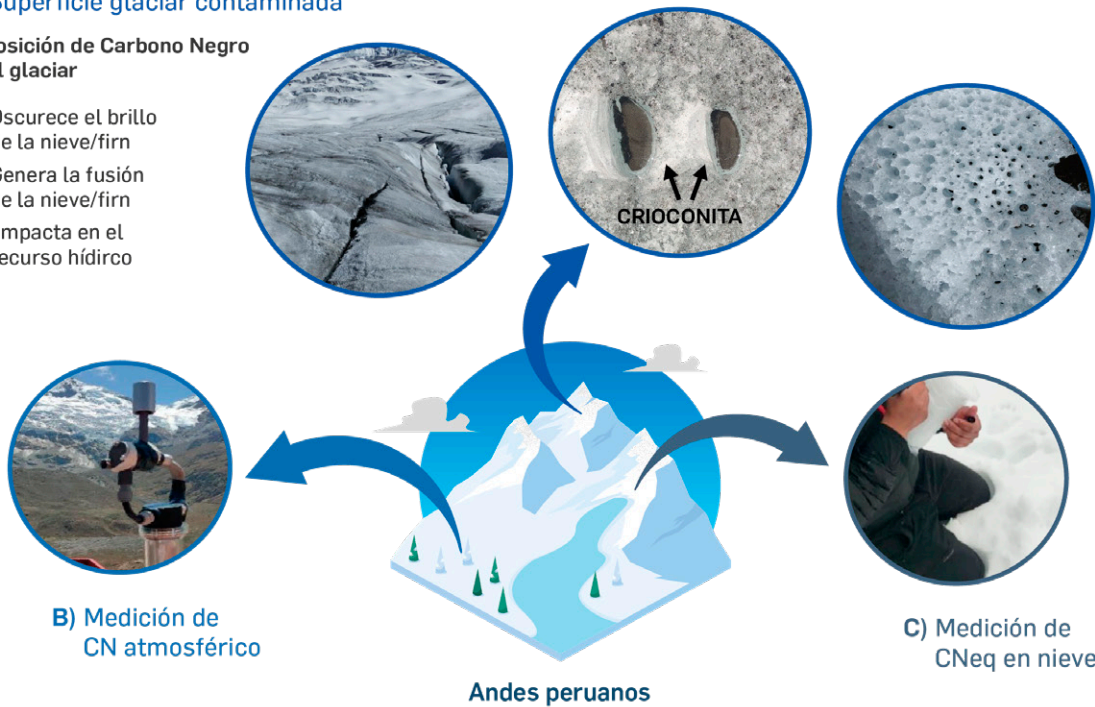


Figura 1: Esquema representativo de potenciales fuentes de CN y su impacto local asociado a las emisiones antropogénicas e incendios forestales en los Andes peruanos.

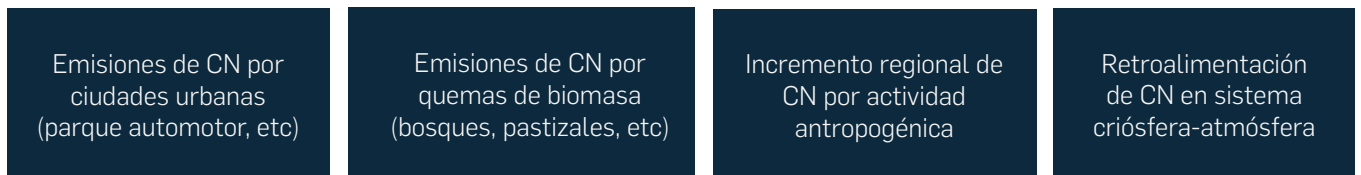
rol significativo sobre las quemadas de biomasa y el número de eventos de incendios, especialmente, las altas frecuencias de los incendios se encontraron durante la transición del ENSO desde la fase de El Niño hacia La Niña (Zubieta et al., 2019), mientras que, altas concentraciones de CN se reportaron en la fase de El Niño y la sequía estacional, como es el caso del año 2016 (Rodríguez & Schmitt 2018).

Las quemadas de biomasa que se producen en la cuenca Amazónica emiten grandes cantidades de aerosoles carbónicos, su transporte como plumas atmosféricas se expanden horizontalmente logrando alcanzar la cordillera de los Andes (Molina et al., 2015). Estas plumas, en ocasiones especiales, son muy pronunciadas sobre el flanco oriental de los Andes, es por eso que a esta región se le conoce como corredor de partículas atmosféricas. Particularmente, en esta región el

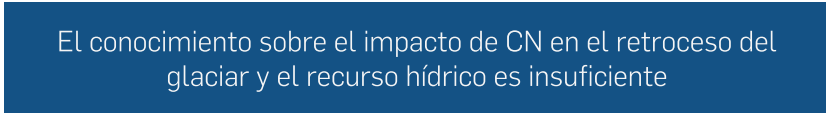
transporte se realiza por debajo de la capa límite planetaria (2 km de altura del suelo) y logran llegar sobre las montañas de los Andes, a pesar que predomina el proceso de remoción y dilución durante su transporte (Bourgeois et al., 2015). Los principales mecanismos que están asociados al transporte de aerosoles atmosféricos responden a la circulación de escala sinóptica y a los efectos orográficos de escala local (Bourgeois et al., 2015). En el caso específico del CN sobre el flanco oriental de los Andes, este se transporta orográficamente hacia niveles altos de los Andes asociado a los vientos anabáticos y al calentamiento diferencial diurno que genera el transporte más eficiente durante el día que por la noche.

La medición y la estimación de las emisiones de CN in situ son escasas y fragmentadas en las montañas andinas peruanas, las pocas mediciones se han realizado en algunas cordilleras glaciares.

CAUSAS QUE ORIGINAN



PROBLEMA CENTRAL



EFFECTOS Y CONSECUENCIAS

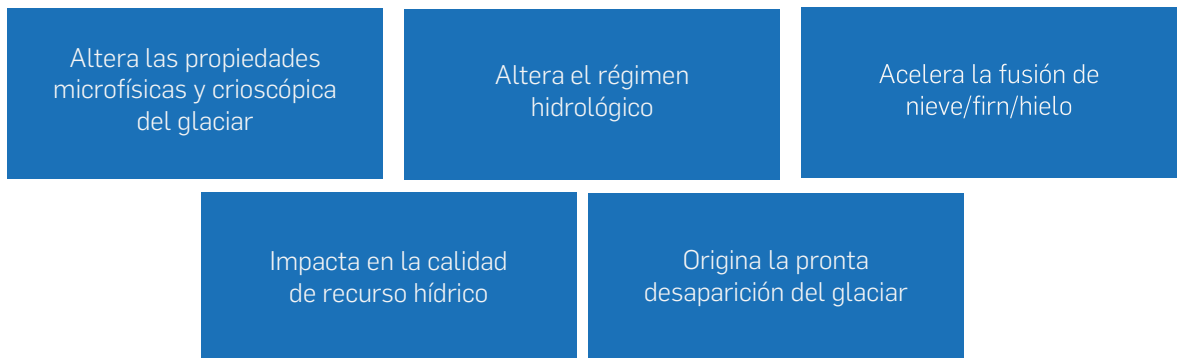


Figura 2: Árbol de problemas que se evidencian en los glaciares debido a los contaminantes atmosféricos

La cordillera Blanca, Huaytapallana y Vilcanota (Schmitt *et al.*, 2015; Rodríguez and Schmitt, 2018; Torres *et al.*, 2018; Soto Carrión *et al.*, 2021). Estos estudios a través de datos observacionales confirman que las concentraciones más grandes de CN están asociadas a la proximidad de ciudades altoandinas (e.g. Huaraz) (Schmitt *et al.*, 2015).

Con la finalidad de monitorear el impacto de CN en los glaciares de Perú, se logró instalar un equipo moderno de alta precisión conocido como etalómetro, localizado con las coordenadas: 11.938°S, 75.069°W, y 4709 m s.n.m. El cual mide el CN atmosférico en la proximidad del glaciar Huaytapallana. Este equipo forma parte del Centro de Monitoreo de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (CEMGEM) del INAI GEM

(Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña), ubicado en el Área de Conservación Regional (ACR) Huaytapallana. El etalómetro proporciona datos de alta resolución temporal y permite medir la concentración de CN proveniente de las zonas bajas de los Andes y la Amazonia, producto de la actividad humana y relacionadas directamente con incendios forestales, la quema de residuos de biomasa agrícola, pastos y combustibles fósiles que emiten los vehículos en las ciudades altoandinas del país. El etalómetro (Figura 3), realiza mediciones en 7 longitudes de onda, de los cuales se utiliza la longitud de onda de 880 nm para medir el CN atmosférico. Además, el equipo tiene un modelo incorporado que permite distinguir las fuentes de CN, tales como las fuentes de quemas de biomasa

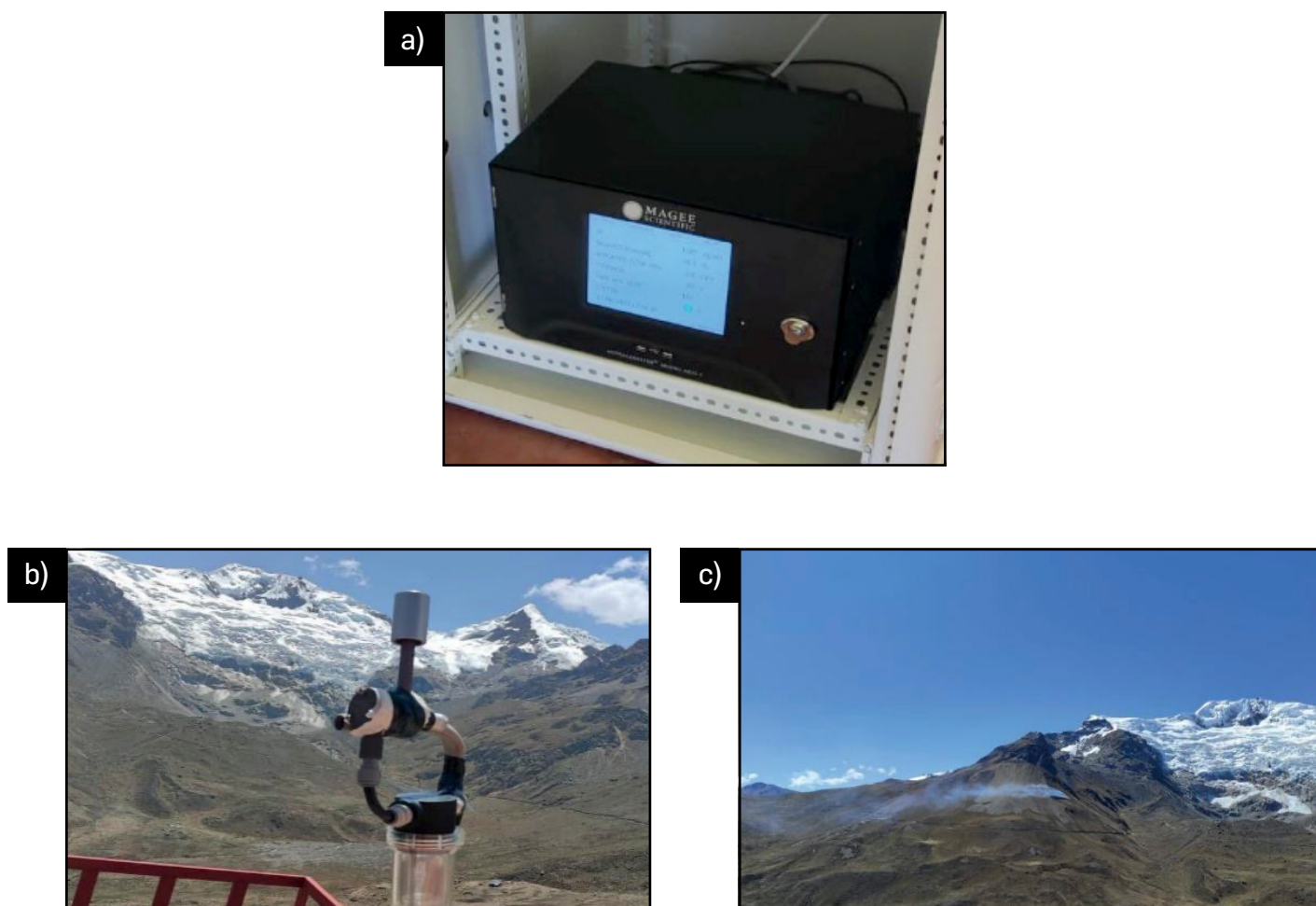


Figura 3: Estimación de CN atmosférico en Huaytapallana. a) el equipo etalómetro que mide el CN en la atmósfera, b) cabezal del etalómetro que permite absorber el flujo de aire y c) la pluma de la quema local que corresponde la emisión de CN

(CNbb) y las fuentes de emisión por efecto de la combustión de los fósiles (CNff).

Adicional a las mediciones de CN atmosférico, también en el glaciar Huaytapallana se realiza la colecta de la nieve/firn para estimar el CN depositado en la superficie glaciar y las propiedades glaciológicas. Específicamente, el CN estimado a partir del análisis de las muestras de CN aplicando la técnica de calentamiento por absorción de luz se denomina como el carbono negro equivalente (CNeq), debido a que esta técnica aplicada no permite distinguir otras partículas impurezas que se depositan en la superficie glaciar, todas estas partículas en general se le conoce como las PALs. Esta información generada será fundamental para

evaluar el impacto de las PALs en el derretimiento del glaciar y en el balance radiativo. En la figura 4a se observa el proceso de colecta de la nieve en una bolsa hermética, en la cual, se espera la fusión de la nieve a condiciones ambientales. En la figura 4b se observa la muestra de CNeq, el filtro contiene fuerte cantidad de CNeq y aparentemente contiene mayor cantidad de material particulado que el propio CN, evidenciando con bastante claridad que el glaciar Huaytapallana contiene grandes cantidades de PALs. Para estimar la concentración de los contaminantes, los filtros con muestra de CN se procesan en un equipo analizador conocido como LAHM (Light Absorption Heating Method) con el cual se obtienen las concentraciones de las PALs depositado en la superficie glaciar.



Figura 4: Colecta de muestras de nieve para cuantificar la concentración de carbono negro equivalente (CNeq), a) colecta de la nieve, b) filtro con muestras de CNeq

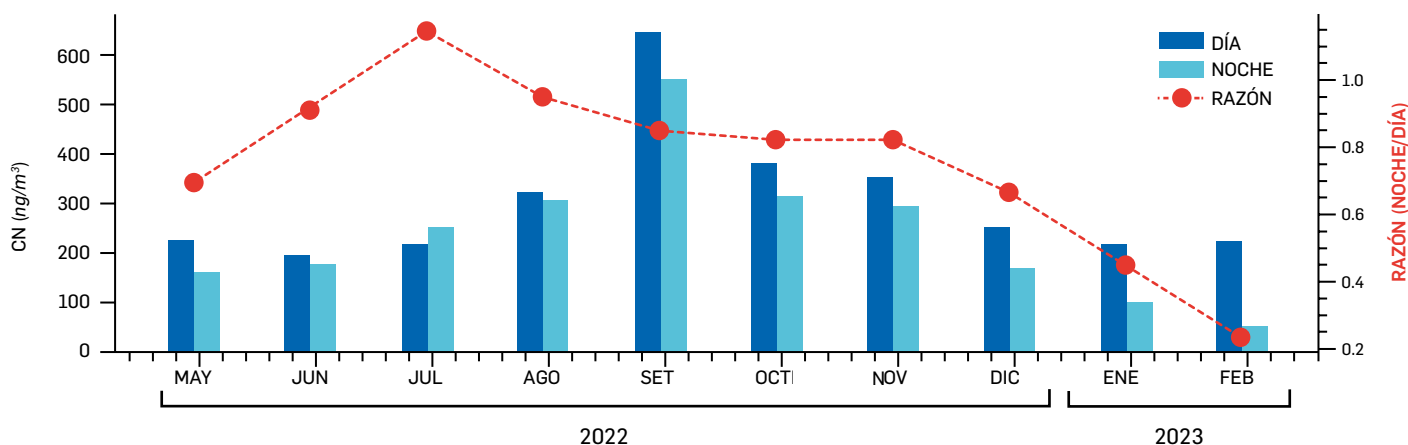


Figura 5: Promedio mensual de carbono negro (CN, ng/m^3) tanto para la noche como para el día y la razón mensual de los promedios entre la noche y el día durante 2022-2023.

La figura 5 muestra la variación mensual de CN separando los períodos de día y noche. Se evidencia que las altas concentraciones de CN corresponden al período diurno (día), mientras que las concentraciones son menores durante el período nocturno (noche), a excepción en el mes de Julio, se observa concentraciones opuestas superando las concentraciones de la noche a los del día. La tasa de CN entre la noche y el día varía durante los meses del año, especialmente en los meses más lluviosos del año (enero-febrero) se encuentra una tasa más baja evidenciando que en estos meses hay mayor diferencia en las concentraciones de CN entre el día y la noche. Las más altas tasas de concentraciones de CN ocurrió en el mes de setiembre con valores cerca de $650 \text{ ng}/\text{m}^3$.

La figura 6 muestra el ciclo diurno (variación horaria) del total de CN y sus componentes (CNff y CNbb) indicando fuentes de combustible fósil y quemas de biomasa, respectivamente. En la montaña, el ciclo diurno de CN es bien marcado presentándose una moda principal y centrado entre las 12 y 14 LT (hora local). Además, en horario diurno existe una mayor separación de ambos componentes (CNff y CNbb), siendo el aporte del CNff el más importante que contribuye al total de CN, asimismo, los percentiles indican que las fuentes de tipo CNff presentan una alta variabilidad en comparación a los de CNbb. De otro lado, en horas nocturnas se presenta una segunda moda sumamente ligera centrada entre las horas 22 y 00 LT, y las magnitudes de los componentes (CNff y CNbb) son similares, por lo que se puede

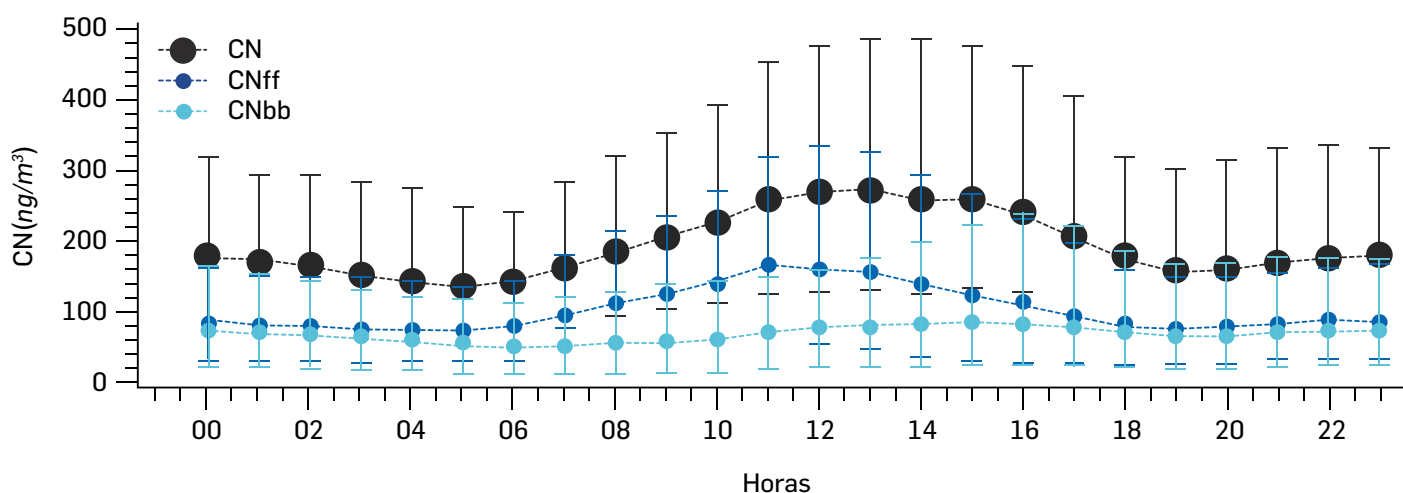
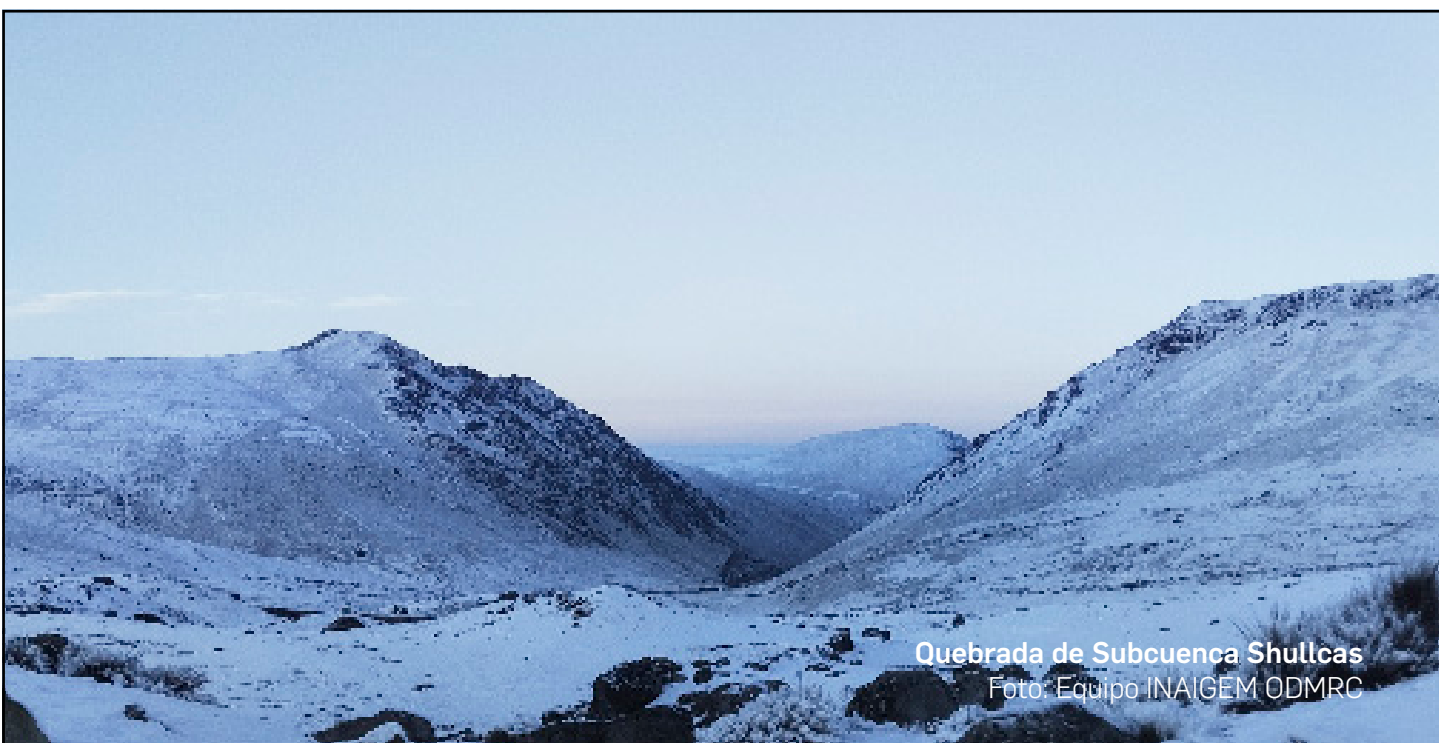


Figura 6: Ciclo diurno de CN atmosférico en la montaña, las barbas son percentiles (25, 50 y 75) y los círculos representan las medianas de CN (ng/m^3) atmosféricas.

señalar que durante la noche el aporte al CN total provienen de ambos componentes (CNff y CNbb) con magnitudes equivalentes.

Basados en el análisis de las mediciones de CN se encontraron que durante la estación húmeda en horas del día las fuentes de tipo CNff (CNbb) representan 57% (43%) en el Centro de Monitoreo de montaña en Huaytapallana. Estos porcentajes indican que la contribución de tipo CNff prevalece sobre el CNbb, por lo cual, es posible señalar que el sector oeste de Huaytapallana asociado a la ciudad de Huancayo tiene una influencia significativa en el aporte de CN, donde las altas concentraciones de CN generadas en esa ciudad llegan a las zonas altas de Huaytapallana. Mientras que, en las horas de la noche el tipo de CNff (CNbb) representa el 44% (56%), invirtiéndose esta relación, es decir, las fuentes de tipo CNbb superan a los aportes de CNff en un 6%, evidenciando que el CN que se detecta en la montaña de Huaytapallana, tiene fuerte influencia desde la zona de transición Andes-Amazonia que son transportados y canalizados hacia las montañas de Huaytapallana a través de las quebradas. Durante la estación seca en horas del día las fuentes de tipo CNff (CNbb) representan el 64% (36%) reportados en el CEMGEM.

De otro lado, en las horas de la noche el tipo de CNff (CNbb) representa el 54% (46%) en el Centro de Monitoreo de montaña. Tanto en el día como en la noche, las contribuciones de CNff superan a los de CNbb, y especialmente las mayores contribuciones se producen durante el día debido a que la circulación térmica favorece el transporte de las parcelas de aire desde el valle del Mantaro y la zona de transición Andes-Amazonía hacia las montañas de Huaytapallana.



Quebrada de Subcuenca Shullcas
Foto: Equipo INAIGEM ODMRG

EVENTOS EXTRAORDINARIOS DE CARBONO NEGRO DETECTADO EN HUAYTAPALLANA

En la figura 7, se muestran medias móviles de concentraciones de CN a escala horaria (azul) y diaria (verde) durante agosto-setiembre de 2022. Este periodo corresponde a un caso especial debido a que en todo el periodo que se viene monitoreando el CN atmosférico desde abril de 2022 hasta junio de 2023, no se han encontrado magnitudes similares. El primer momento de CN se presentaron durante los días del 13 al 20 de agosto, seguidamente, a partir del 26 de agosto se incrementó la concentración de CN continuamente hasta el día 29 de agosto, inmediatamente otro evento de CN, al día siguiente comenzó a incrementar intensamente alcanzando a valores extraordinarios (cerca de 2500 ng/m^3) hasta el día 14 de setiembre de 2022. Estos valores son extraordinarios para condiciones de montaña, por lo que, este periodo

se caracterizó como los eventos extraordinarios de CN únicamente detectado para la zona de montaña durante el año 2022. Estos resultados evidencian que en situaciones específicas es posible detectar altas concentraciones de CN en regiones de montaña, incluso sus magnitudes pueden ser equivalentes a las magnitudes detectadas en los entornos de ciudades altoandinas como es el caso de Huancayo. Este periodo con altos niveles de CN detectado en la montaña representa un caso especial, por lo que se requiere hacer estudios de modelamiento químico-atmosférico con un enfoque de alta resolución espacial y temporal para detectar las plumas del CN atmosférico, y a la vez, identificar las fuentes principales de estos contaminantes usando modelos de retro-trayectorias.

Quebrada de Subcuenca Shullcas

Foto: Equipo INAIGEM ODMRC



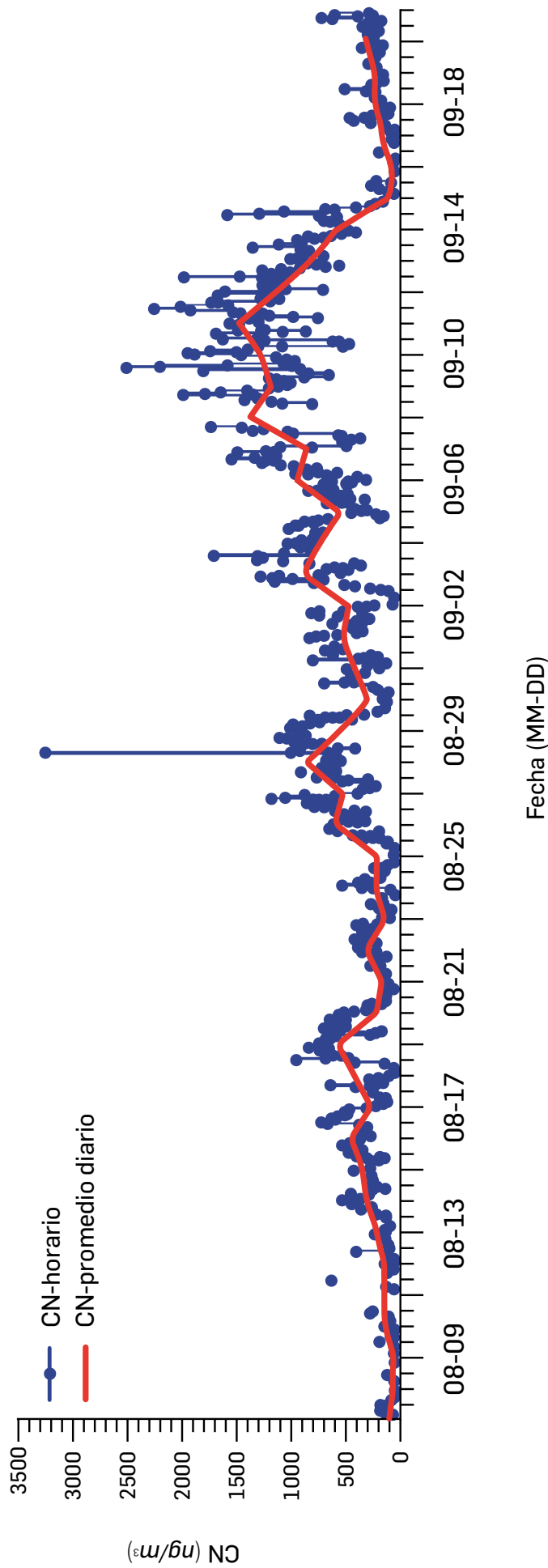


Figura 7: Concentración de CN (ng/m^3) observado durante los meses de agosto y setiembre de 2022



Equipos de medición del CEMGEM
Foto: David Guizado

CONCLUSIONES

En este primer reporte se presentan las primeras evidencias de los niveles de concentraciones y tipos de las fuentes de CN atmosférico analizado a escala horaria, diaria y mensual a partir de las mediciones del etalómetro localizado en el entorno del glaciar Huaytapallana. Aquí se evidenció la dominancia del CN de tipo CNff asociado a la actividad antropogénica local desarrollado en la cordillera oriental de los Andes (11-12.5 °S). Como segunda contribución se evidencia que la fuente de tipo CNbb está asociado a las fuentes de las quemadas (asumidas intencionales) de biomasa. Estos contaminantes atmosféricos de origen antropogénico deben ser de mayor atención para evaluar los cambios futuros que se presentarán

en los ecosistemas y el almacenamiento sólido de agua en la montaña. Por consiguiente, a partir de los resultados encontrados existe la necesidad de ampliar el monitoreo de partículas atmosféricas contaminantes en alta montaña y así cuantificar la contribución relativa de las diferentes fuentes de emisiones de CN, principalmente asociadas a los incendios forestales y agrícolas en las laderas de la Cordillera de los Andes y a la contaminación del parque automotor en las zonas rurales y urbanas. Estos esfuerzos permitirán plantear estrategias de mitigación en relación a las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos para luchar contra el efecto del cambio climático a lo largo de los Andes peruanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

Bourgeois, Q., Ekman, A. M., & 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.

Gilardoni, 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*, 103837.

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, 103346.

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), 40.

Magalhães, N. D., Evangelista, H., Condom, T., Rabatel, A., & Ginot, P. (2019). Amazonian biomass burning enhances tropical Andean glaciers melting. *Scientific reports*, 9(1), 16914.

Molina, L. T., Gallardo, L., Andrade, M., Baumgardner, D., Borbor-Córdova, M., Bórquez, R., ... & Schwarz, J. P. (2015). Pollution and its impacts on the South American cryosphere. *Earth's Future*, 3(12), 345-369.

Niu, H., Kang, S., Wang, H., Du, J., Pu, T., Zhang, G., ... & Shi, X. (2020). Light-absorbing impurities accelerating glacial melting in southeastern Tibetan Plateau. *Environmental Pollution*, 257, 113541.

Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., & Weyer, N. M. (2019). The ocean and cryosphere in a changing climate. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate, 1155.

Rodríguez, W. S., & Schmitt, C. (2018). Partículas Absorbentes de Luz durante El Niño y El Niño Costero en los Glaciares de la Cordillera Blanca, Perú. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, (4), 14-14.

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.

Soto Carrión, C., Schmitt, C. G., Zúñiga Negrón, J. J., Jiménez Mendoza, W., Arbieto Mamani, O., Pozo Enciso, R. S., ... & Rado Cuchills, M. S. (2021). Quantitative estimation of black carbon in the glacier Ampay-Apurimac. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 9(1), 3-0.

Torres, C., Bendezú, Y., Álvarez, D., Suárez-Salas, L., Cruz, A. H. D. L., Schmitt, C., ... & Caro, E. (2022). Caracterización estacional de los elementos traza y partículas absorbentes de luz (PAL) en la nieve del glaciar Huaytapallana (Perú). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 38.

Veettil, B. K., & Kamp, U. (2019). Global disappearance of tropical mountain glaciers: observations, causes, and challenges. *Geosciences*, 9(5), 196.

Magalhães, N. D., Evangelista, H., Condom, T., Rabatel, A., & Ginot, P. (2019). Amazonian biomass burning enhances tropical Andean glaciers melting. *Scientific Reports*, 9(1), 1-12.

Zubieta Barragán, R., Prudencio, F., Alarco, G., & Reupo, J. (2019). Ocurrencia de incendios forestales en el Perú durante eventos El Niño.

Zubieta, R., Ccanchi, Y., Martínez, A., Saavedra, M., Norabuena, E., Alvarez, S., & Ilbay, M. (2023). The role of drought conditions on the recent increase in wildfire occurrence in the high Andean regions of Peru. *International Journal of Wildland Fire*.

