OBSERVACIONES PARA LA INVESTIGACIÓN EN FÍSICA ATMOSFÉRICA EN LOS ANDES CENTRALES DEL PERÚ: LABORATORIO DE MICROFÍSICA ATMOSFÉRICA Y RADIACIÓN (LAMAR)

Yamina Silva[1], Miguel Saavedra[1], Luis Suárez[1], René Estevan[1], José Flores[1], David Guizado[1] y Lucy Giraldez[1]

[1] Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

Palabras clave: Precipitación, radiación, mantaro, BSRN, aeronet, radares meteorológicos

Citar como Silva, Y., Saavedra, M., Suárez, L., Estevan, R., Flores, J.L., Guizado, D., & Giraldez, L. (2024). Observaciones para la investigación en física atmosférica en los Andes centrales del Perú: Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR). *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.° 02, págs. 13-19.

¿Cuál es la **contribución** de esta investigación para la comunidad científica?

Este artículo permite identificar la diversidad de instrumentos del Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR), cuyos datos puede ser usados por la comunidad científica y académica para generar conocimiento y mejorar los modelos de predicción del tiempo y de eventos extremos en el Perú, tan necesarios para los sistemas de alerta temprana, y de escenarios de cambio climático. De esta forma, se fomenta la continuidad de las investigaciones en LAMAR, además de promoverse colaboraciones científicas y el acceso a esta valiosa información, lo que permitirá una mejor comprensión y preparación frente a eventos meteorológicos extremos en los Andes peruanos.

Resumen

El Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR), implementado en el Observatorio Geofísico de Huancayo del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y ubicado en los Andes centrales peruanos, es un recurso esencial para la investigación, monitoreo y generación de capacidades en temas relacionados con la atmósfera y su interacción con la superficie terrestre en los Andes peruanos. LAMAR, establecido con el propósito de generar información que permita comprender los procesos físicos asociados a los eventos meteorológicos extremos, cuenta con una variedad de instrumentos, desde los convencionales hasta los sofisticados, como los radares meteorológicos, los sensores de radiación, precipitación y aerosoles. Los datos generados por LAMAR han contribuido a mejorar el conocimiento sobre los procesos físicos de la atmósfera en los Andes, lo cual ayuda a mejorar los modelos de predicción del tiempo en el Perú, así como el conocimiento

sobre los aerosoles atmosféricos y su impacto en la radiación solar. Sin duda, la información recopilada en LAMAR representa un recurso único en el contexto peruano y pronto estará al alcance de la comunidad científica y académica. En este artículo presentamos los instrumentos más relevantes de LAMAR, así como las publicaciones que se generaron en torno a ellos, con el propósito de incentivar futuras investigaciones y colaboraciones científicas.

1. Introducción

El Observatorio Geofísico de Huancayo está situado sobre los Andes centrales del Perú, cerca del poblado de Huayao (12°02'18''S, 75°19'22''W, 3313 m s. n. m.), en la provincia de Chupaca, región Junín (Figura 1a). Es la cuna del Instituto Geofísico del Perú (IGP), inaugurado en 1922 como Observatorio Magnético de Huancayo por la Institución Carnegie de Washington (EE. UU.) debido a su proximidad al ecuador magnético. Desde sus inicios, ha desempeñado un papel fundamental en la medición de parámetros atmosféricos. Un ejemplo destacado es la estación meteorológica de Huayao, la cual lleva realizando mediciones de temperatura del aire y precipitación desde 1921, y cuenta con una serie de datos climáticos única en los Andes peruanos. Estos datos han permitido numerosos estudios e investigaciones sobre la variabilidad climática regional de los Andes centrales. En la última década, con el fin de mejorar la comprensión del clima, su variabilidad y los procesos físicos relacionados con los eventos meteorológicos extremos en el valle del Mantaro, se han instalado diversos instrumentos especializados en el Observatorio Geofísico de Huancayo, lo que ha dado origen al Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR).

El objetivo de LAMAR es generar datos atmosféricos y ampliar el conocimiento sobre los procesos físicos y dinámicos en la atmósfera, con el propósito de explicar la variabilidad climática y los eventos meteorológicos extremos característicos de los Andes peruanos, tales como lluvias intensas, heladas, veranillos, tormentas y granizadas. Este conocimiento es crucial para mejorar la capacidad de los modelos físico-matemáticos utilizados en la predicción del tiempo y del clima, así como para evaluar los posibles impactos del cambio climático en el futuro. Los datos generados por LAMAR también se emplean para evaluar técnicas de sensoriamento remoto. La contribución de LAMAR no solo se limita a la comprensión del clima regional, sino que también ofrece recursos valiosos para la investigación y generación de capacidades.

LAMAR cuenta con instrumentos de tecnología avanzada que proporcionan información detallada sobre parámetros atmosféricos. Forma parte del Baseline Surface Radiation Network (BSRN) que mide las componentes radiativas y permite determinar el balance de energía en la superficie, además del programa AERONET (AErosol RObotic NETwork), red de detección remota de aerosoles en tierra establecidas por la NASA. Asimismo, realiza mediciones de precipitación, evaporación y evapotranspiración para calcular el balance de agua. Por otro lado, los disdrómetros y el radar de nubes y precipitación permiten conocer la microestructura vertical de la nube y la precipitación, así como su variación en el tiempo. Por tanto, este avance de investigación presenta los principales instrumentos de LAMAR y sirve como preámbulo a un documento posterior que describirá la base de datos, la cual estará disponible para la comunidad científica. Esto se realiza con la finalidad de contar con una base sólida para la generación de conocimiento científico sobre los procesos físicos de la atmósfera en nuestra región andina.

2. Descripción general

El Observatorio Geofísico de Huancayo tiene un área aproximada de 300 m x 300 m. Está cubierto principalmente por pasto, además de algunos árboles frutales y eucaliptos. Asimismo, cuenta con algunas viviendas usadas como centros de mediciones y oficinas. Los instrumentos y las estaciones están localizados en diferentes espacios, teniendo en consideración la dirección predominante de los vientos o la puesta y salida del sol, así como la ubicación de las viviendas y árboles a fin de que no influyan en las mediciones. En la Figura 1b se muestran las zonas donde se ubican los instrumentos: la parcela de observación meteorológica (1); la torre de gradiente con una altura de 30 m (2); la torre de flujos de 4 m (3); el radar perfilador de vientos y precipitación-CLAIRE (4); el radar perfilador de nubes y precipitación-MIRA 35C, las cámaras de cielo y el fotómetro solar de la red AERONET (5); el etalómetro y el medidor de ozono troposférico (6); el radar de capa límite-BLTR (7); la estación de la red de radiación solar-BSRN (8) y el radiómetro de UV (9).

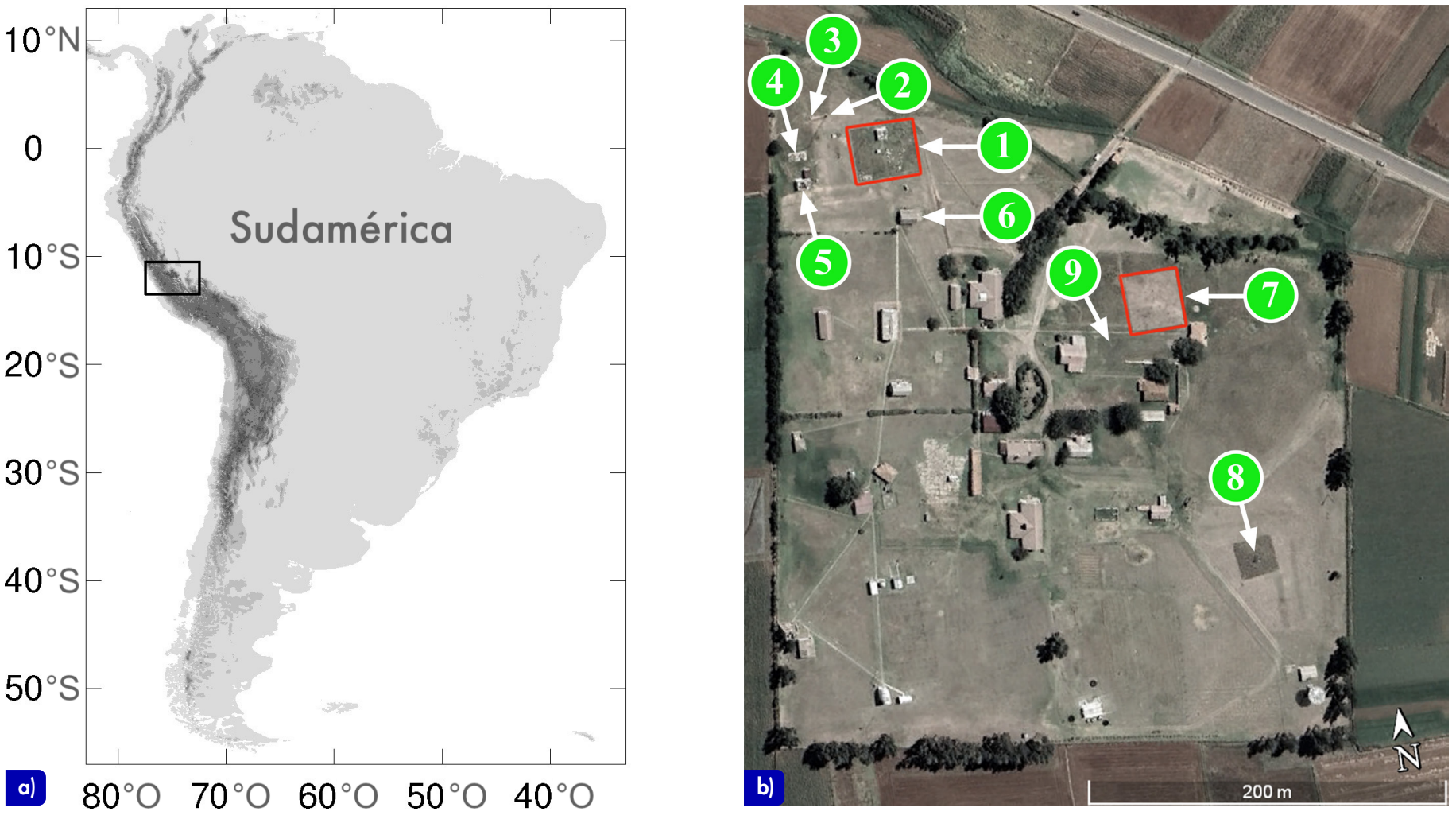

Figura 1. a) Referencia de la ubicación del Observatorio Geofísico de Huancayo en Sudamérica (cuadro negro). b) Vista aérea (Google Earth) del Observatorio Geofísico de Huancayo donde se indican las áreas ocupadas por instrumentos del LAMAR.

Dentro de la parcela de observación meteorológica (1) se encuentran ubicados los siguientes instrumentos: la estación climatológica de Huayao, con instrumental convencional (1A), operada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi) según normas de la OMM (2021); la estación meteorológica automática (1B); el disdrómetro Parsivel 2 (1C); el pluviómetro de peso Pluvio2 S (1D) y el colector de agua de lluvia (1E) (Ver Figura 2).

Figura 2. Algunos instrumentos y estaciones de LAMAR según la distribución presentada en la Figura 1.

3. Tipos de instrumentos y sensores de LAMAR

Los instrumentos de LAMAR se pueden clasificar en tres grupos:

a) Instrumentos con sensores únicos

En ese grupo de instrumentos contamos con el disdrómetro y pluviómetro, los que miden las precipitaciones con diferentes principios. Además, se dispone de un colector de lluvia que permite tomar muestras para analizar los compuestos isotópicos del agua de lluvia; dos cámaras de cielo (diurna y nocturna) con un ángulo de 360° que permiten visualizar el cielo para evaluar la formación de nubes; un fotómetro solar para medición de aerosoles; un medidor de ozono; un etalómetro para medición de carbono negro en la atmósfera y un radiómetro para medición de la radiación ultravioleta. En la Tabla 1 se detallan algunos principios de medición, las variables que se obtienen y los artículos publicados usando los datos de estos instrumentos.

Tabla 1. Resumen de instrumentos del LAMAR, sus principios de medición, las variables que se obtienen y los artículos que fueron publicados usando los datos de estos instrumentos.

n.° Fig. 1 y 2	Equipo	Principio de Medición	Variable medida	Artículo publicado
1C	Disdrómetro óptico (OTT, modelo PARSIVEL 2)	Óptico, por dispersión de luz láser	• Tasa de lluvia (mm. hr^{-1}) • Velocidad de las gotas ($m.s^{-1}$) • Reflectividad del radar (dBZ) • Concentración de gotas (log ($m^{-3}.mm^{-1}$)	Valdivia et al. (2022)
1D	Pluviómetro de peso OTT Pluvio2 S	Pesaje mediante una celda de carga	Cantidad e intensidad de la precipitación	
1E	Colector de agua de lluvia	Análisis Isotópicos	Análisis Isotópicos oxígeno 18 y deuterio (VSMOW)	Apaestegui et al. (2023)
5B	Cámara de cielo nocturno OCULUS	Fotografía	Cobertura de nubes	
5C	Fotómetro solar (CIMEL, modelo CE318–T)	Medición de la irradiancia solar y de cielo, en ocho longitudes de onda, modelo 318T de Cimel (Francia)	• AOD 440 y 500 nm (adimensional) • Exponente de Angstrom 440-870 nm (adimensional) • Masa óptica (adimensional) • Agua precipitable (mm de H_2O) • Columna total de ozono (unidades Dobson) • Columna total de dióxido de Nitrógeno (unidades Dobson)	Estevan et al. (2019 a) Estevan et al. (2019 b) Victoria & Estevan (2021) Flores et al. (2021) Cazorla et al. (2024)
6A	Medidor de ozono troposférico	Medición por fotometría UV, modelo 49i de Thermo Scientific de EE.UU.	Concentración de ozono troposférico ($ug.m^{-3}$)	Suárez-Salas (2021)
6B	Etalómetro	Óptico, por absorción de luz láser en siete longitudes de onda	Concentración de carbono negro en la atmósfera ($ng.m^{-3}$)	Suárez et al. (2017) Villalobos-Puma et al. (sometido)
9	Radiómetro de radiación ultravioleta (GUV)	Radiómetro de filtro multicanal, modelo GIUV511 de Biospherical Inc. (EE.UU.)	• Irradiancia UV a 305, 320, 340 y 380 nm ($uW.cm^2$) • Radiación PAR (400-700nm) ($uE/(cm^2.sec)$ • Índice UV (adimensional)	Suárez et al. (2017)

b) Estaciones y torres con grupo de sensores

Aquí están consideradas las estaciones o torres que cuentan con un conjunto de sensores que, de manera individual o complementaria, permiten la medición de diferentes variables atmosféricas y de superficie. La torre de gradiente y la torre de flujos permiten evaluar el intercambio de humedad y energía entre el suelo y la atmósfera. En tanto, la BSRN, con todos sus sensores, permite evaluar el balance de energía en la superficie. Ver Tabla 2.

Tabla 2. Instrumentos de LAMAR agrupados en torres y estaciones.

n.° Fig. 1 y 2	Equipo	Sensores	Variable medida	Referencias
1B	Estación meteorológica automática	• Pluviómetro (Campbell S, modelo CS700) • Termohigrómetro (Vaisala, modelo HMP45) • Barómetro (Setra, modelo CS100) • Anemómetro (Young, modelo 01513V) • Termómetro (CampbellS, modelo 107-L) • Termómetro (Apogee, modelo SI-111) • Piranómetro (Kipp-Zonnen, modelo CMP11) • Pirgeómetro (Kipp-Zonnen, modelo CGR3)	• Precipitación (mm) • Temperatura del aire a 2m (°C) • HR del aire a 2m (%) • Presión atmosférica (hPa) • Velocidad del viento 10 m (ms^{-1}) • Dirección del viento 10 m (°). • Temperatura del aire a 10 cm. • Temperatura de superficie (°) • Radiación solar incidente (Wm^{-2}) • Radiación infrarroja incidente (Wm^{-2}) • Humedad, temperatura y conductividad 50, 30, 10, 5 y 2 cm (m^3/m^3, °C, mS/cm)	Callañaupa et al. (2021); Saavedra & Takahashi (2017)
2	Torre de gradiente, 30 metros	• 06 termohigrómetros (Campbell Scientific, modelo HMP60) • 06 anemómetros de cazoletas (Campbell Scientific, modelo 3101) • 02 Veletas (Met One, modelo 024A) • 01 placa de flujo de calor (Campbell Scientific, modelo HFP01)	• Temperatura (°C), humedad relativa (%) y velocidad del viento (m/s) a 2, 6, 12, 18, 24 y 29 m • Dirección del viento (grados) a 18 y 29 m • Flujo de calor superficial (w/m^2) a 8 cm de profundidad del suelo	Flores-Rojas et al. (2019) Flores-Rojas et al. (2021b)
3	Torre de flujos, 4 metros	Higrómetro de criptón (modelo KH2O) y anemómetro sónico (modelo 81000) de Campbell Si., EE.UU. Técnica de Eddy Covariance	Evapotranspiración, flujo de calor sensible y calor latente	Callañaupa et al. (2021)
8	Estación BSRN	• 03 piranómetros (KIPP&ZONEN, CMP21) • 02 pirgeómetros (KIPP&ZONEN, CGR4) • 01 pirheliómetro (KIPP&ZONEN, CHP 1)	• Radiación de onda corta incidente y reflejada ($W.m^{-2}$) • Radiación de onda larga incidente y reflejada ($W.m^{-2}$) • Radiación solar directa ($W.m^{-2}$) • Radiación de onda corta difusa (Wm^{-2})	Flores-Rojas et al. (2021a)

c) Radares meteorológicos

LAMAR cuenta con tres radares perfiladores de vientos, nubes y precipitación (Tabla 3). Estos permiten el registro continuo de datos con una distribución vertical que alcanza hasta los 11 kilómetros de altura. Gracias a ellos, se ha podido explicar la formación y desarrollo de nubes de tormenta, lo que ha contribuido a mejorar el análisis de los modelos atmosféricos. Estos datos son únicos en el Perú.

Tabla 3. Lista de los radares meteorológicos que forman parte del LAMAR, incluyendo los principios de medición, las variables medidas y las publicaciones científicas que hicieron uso de los datos registrados por estos instrumentos.

n.° Fig. 1 y 2	Nombre del equipo y fabricante	Principio de medición	Variable medida	Referencias
4	Radar perfilador de vientos y precipitación-CLAIRE (IGP, Perú)	Emisión de radiación electromagnética en banda UHF (445 MHz)	Perfil vertical del viento y la precipitación	Oscanoa et al. (2017) Valdivia J. (2018) Valdivia et al. (2020) Flores-Rojas et al. (2021a)
5A	Radar perfilador de nubes y precipitación: MIRA 35C (METEK, Alemania)	Emisión de radiación electromagnética en banda Ka (35 GHz)	• Reflectividad (mm6.m-3) • Razón de despolarización línea (LDR) • Velocidad radial (m.s-1) • SNR (Db)	Valdivia et al. (2022) Kumar et al. (2020) Valdivia et al. (2020)
7	Radar de capa límite y tropósfera-BLTR (Genesys Software Pty, Australia)	Emisión de radiación electromagnética en la frecuencia de 10 KHz	Perfil vertical de las componentes zonal, meridional y vertical del viento	Prado J. (2021) Valdivia et al. (2020) Flores-Rojas et al. (2021a)

3. Perspectivas futuras de LAMAR

Durante la última década, el IGP ha realizado esfuerzos significativos para fortalecer el Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR), consolidándose como un referente en la medición de parámetros atmosféricos con tecnología avanzada. Este laboratorio es operado y mantenido por personal científico y técnico del IGP en el Observatorio Geofísico de Huancayo, desde donde se ha convertido en un centro crucial para la investigación atmosférica de la región.

LAMAR promueve la colaboración científico-técnica y está abierto a la integración de nuevos instrumentos que permitan un mejor registro de datos atmosféricos para investigar los procesos físicos y dinámicos en la región de los Andes centrales, la evaluación y mejora de modelos numéricos globales y regionales, la realización de investigaciones de intercomparación, entre otros aspectos. Por tanto, LAMAR está abierto a recibir propuestas para incorporar tecnologías específicas que refuercen las mediciones de precipitación y otros parámetros, lo que fomentará la sinergia y el intercambio de conocimientos. Este enfoque colaborativo refuerza la posición de LAMAR como recurso invaluable para la comunidad científica y académica.

Entre las perspectivas futuras de LAMAR, se contempla su evolución hacia un observatorio GLAFO (The GEWEX Land-Atmosphere Feedback Observatory, https://www.gewex.org/gewex-content/files_mf/1583952472Feb2020.pdf), integrándose como parte fundamental para entender el sistema Tierra desde mediciones locales.

Referencias

Apaéstegui, J., Romero, C., Vuille, M., Sulca, J., & Ampuero, A. (2023). Moisture Sources and Rainfall $\delta^{18}O$ Variability over the Central Andes of Peru—A Case Study from the Mantaro River Basin. *Water*, 15(10), 1867. https://doi.org/10.3390/w15101867

Callañaupa, S., Segura, H., Saavedra, M., Flores, J., Silva, Y., & Cuxart, J. (2021). Seasonal variability of daily evapotranspiration and energy fluxes in the Central Andes of Peru using eddy covariance techniques and empirical methods. *Atmospheric Research*, 261, 105760. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105760

Cazorla, M., Giles, D.M., Herrera, E. Suárez, L., Estevan, R., Andrade, M., Bastidas, A. (2024). Latitudinal and temporal distribution of aerosols and precipitable water vapor in the tropical Andes from AERONET, sounding, and MERRA-2 data. *Scientific Reports 14*(1), 897. https://doi.org/10.1038/s41598-024-51247-9

Estevan, R., Martínez-Castro, D., Suarez-Salas, L., Moya, A., & Silva, Y. (2019a). First two and a half years of aerosol measurements with an AERONET sun photometer at the Huancayo Observatory, Peru. *Atmospheric Environment: X, 3*, 100037. https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100037

Estevan, R., Moya Álvarez, A. S. , Suárez Salas, L. F., Álvarez Tolentino, D.,Silva Vidal, Y. (2019b). Caracterización de los aerosoles durante las temporadas de quema de biomasa para el período 2015-2018 en el Observatorio de Huancayo, Perú. En L. Á. Ruiz Fernández, J. Estornell Cremades, A. Calle, J. C. Antuña Sánchez (Eds.), *Teledetección: hacia una visión global del cambio climático* (pp. 193-196). Ediciones Universidad de Valladolid. http://www.aet.org.es/congresos/xviii/Libro_ACTAS_XVIII_AET.pdf

Flores-Rojas, J. L., Silva, Y., Suárez-Salas, L., Estevan, R., Valdivia-Prado, J., Saavedra, M., Giraldez, L., Piñas-Laura, M., Scipión, D., Milla, M., Kumar, S., & Martinez-Castro, D. (2021a). Analysis of Extreme Meteorological Events in the Central Andes of Peru Using a Set of Specialized Instruments. *Atmosphere, 12*(3), 408. https://doi.org/10.3390/atmos12030408

Flores-Rojas, J. L., Moya-Álvarez, A. S., Valdivia-Prado, J. M., Piñas-Laura, M., Kumar, S., Karam, H. A., Villalobos-Puma, E., Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2021b). On the dynamic mechanisms of intense rainfall events in the central Andes of Peru, Mantaro valley. *Atmospheric Research, 248*, 105188. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105188

Flores-Rojas, J. L., Cuxart, J., Piñas-Laura, M., Callañaupa, S., Suárez-Salas, L., Kumar, S., Moya-Álvarez, A. S., & Silva, Y. (2019). Seasonal and Diurnal Cycles of Surface Boundary Layer and Energy Balance in the Central Andes of Peru, Mantaro Valley. *Atmosphere, 10*(12), 779. https://doi.org/10.3390/atmos10120779

Kumar, S., Del Castillo-Velarde, C., Valdivia, J. M., Flores, J. L., Callañaupa, S. M., Moya, A. S., Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2020). Rainfall characteristics in the Mantaro basin over tropical Andes from a vertically pointed profile rain radar and in-situ field campaign. *Atmosphere, 11* (3), 248. https://doi.org/10.3390/atmos11030248

Oscanoa, J., Castillo, C., & Scipión, D. (2017). *CLAIRE: An UHF wind profiler radar for turbulence and precipitation studies.* 2016 IEEE XXIII International Congress on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), 1-6 August 2016, Piura, Peru. https://doi.org/10.1109/INTERCON.2016.7815577

Prado, J. J. (2021). *Caracterización de la capa límite atmosférica en el Valle del Mantaro empleando radiosondas y sensores remotos* (Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental). Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú. https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4990

Saavedra, M., & Takahashi, K. (2017). Physical controls on frost events in the central Andes of Peru using in situ observations and energy flux models. *Agricultural and Forest Meteorology. 239*, 58-70 https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.019

Suárez-Salas, L. (2021). Influencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en la variación de la capa de ozono en la región andina central del Perú. *Boletín Científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, 8(06), 14-20. http://hdl.handle.net/20.500.12816/5335

Suárez, L. F., Flores, J. L., Pereira, A. J., & Karam, H. A. (2017). Ultraviolet solar radiation in tropical central Andes (12.0°S). *Photochemical & Photobiological Sciences, 16* (6), 954-971. https://doi.org/10.1039/c6pp00161k

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

Valdivia, J. M. (2018). *Cuantificación de lluvias usando el radar perfilador de banda Ka MIRA 35C* [Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental, Un Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho, Perú. http://hdl.handle.net/20.500.12816/4276

Valdivia, J. M., Gatlin, P. N., Kumar, S., Scipión, D., Silva, Y., & Petersen, W. A. (2022). The GPM-DPR Blind Zone Effect on Satellite-Based Radar Estimation of Precipitation over the Andes from a Ground-Based Ka-band Profiler Perspective. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 61*(4), 441-456. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0211.1

Valdivia, J. M., Scipión, D. E., Milla, M., & Silva, Y. (2020). Multi-instrument rainfall-rate estimation in the Peruvian Central Andes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 37*(10), 1811–1826. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0105.1

Victoria, C., Estevan, R.(2021). Comportamiento de los aerosoles atmosféricos en el Observatorio de Huancayo durante los eventos de quema de biomasa del año 2019. *Revista de Investigación de Física 24*(1), 40-54, https://10.15381/rif.v24i1.20246

Villalobos-Puma, E., Suarez, L., Gillardoni, S., Zubieta, R., Martinez-Castro, D., Miranda, A., Bonasoni, P., & Silva, Y. (Año pendiente de publicación). Atmospheric black carbon observations and its valley-mountain dynamics: Eastern Cordillera of the Central Andes of Peru. *Environmental Pollution*. Enviado para su revisión.