

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL ALBEDO Y RETROCESO GLACIAR BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ...

 My Files My Files Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:556145731

Fecha de entrega

12 feb 2026, 10:25 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

12 feb 2026, 10:31 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL ALBEDO Y RETROCESO GLACIAR BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO C....pdf

Tamaño del archivo

1.3 MB

34 páginas

7758 palabras

45.231 caracteres

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 8% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorio.upeu.edu.pe	2%
2	Internet	revistasdigitales.upec.edu.ec	1%
3	Internet	hdl.handle.net	<1%
4	Internet	idoc.pub	<1%
5	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2025-07-22	<1%
6	Internet	tesis.pucp.edu.pe	<1%
7	Internet	repositorio.upsc.edu.pe	<1%
8	Internet	ri.conicet.gov.ar	<1%
9	Internet	www.elperulegal.com	<1%
10	Internet	repositorio.puce.edu.ec	<1%
11	Internet	documentos.dga.cl	<1%

12	Internet	issuu.com	<1%
13	Internet	repositorio.inaigem.gob.pe	<1%
14	Internet	www.coursehero.com	<1%
15	Internet	prezi.com	<1%
16	Internet	www.researchgate.net	<1%
17	Trabajos entregados	Universidad Católica Boliviana "San Pablo" on 2024-11-04	<1%
18	Trabajos entregados	Universidad Científica del Sur on 2025-10-13	<1%
19	Internet	roderic.uv.es	<1%
20	Trabajos entregados	utec on 2024-06-21	<1%
21	Publicación	Artaza, Nicolás Santelices. "Coastal Planning Comparative Analysis and Recomme...	<1%
22	Trabajos entregados	Centro Europeo de Postgrado - CEUPE on 2023-11-06	<1%
23	Trabajos entregados	Universidad Continental on 2024-04-23	<1%
24	Trabajos entregados	Universidad Pública de Navarra on 2025-05-06	<1%
25	Internet	digibug.ugr.es	<1%

26	Internet	paulcairney.wordpress.com	<1%
27	Internet	repositorio.upt.edu.pe	<1%
28	Internet	rutube.ru	<1%
29	Internet	sinia.minam.gob.pe	<1%

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Análisis Multitemporal del albedo y retroceso glaciar bajo escenarios de cambio climático en la Cordillera Apolobamba

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero de Ambiental

Autores:

Evo Alejandro Eloy Larico Flores

Abner Mendoza Llacho

Asesor:

MSc. Loayda Abigail Condori Turpo

Juliaca, febrero de 2026

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Loayda Abigail Condori Turpo, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL ALBEDO Y RETROCESO GLACIAR BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CORDILLERA APOLOBAMBA”** del autor Evo Alejandro Eloy Larico Flores y Abner Mendoza Llacho tiene un índice de similitud de verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 06 días del mes de febrero del año 2026.

MSc. Loayda Abigail Condori Turpo

234

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 06 día(s) del mes de febrero del año 2020, a las 11:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Msc. Enrique Mamani Puela, el (la) secretario(a): Ing. Verónica Haydes Pari Mamani y los demás miembros: Msc. Miguel Angel Salcedo Enríquez, Mtro. Juan Eduardo Tigo Rivera y el (la) asesor(a) Msc. Joayda Abigail Condori Turpo con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

"Análisis Multitemporal del albedo y retroceso glaciar bajo escenarios de cambio climático en la Cordillera Apolobamba"

del(los) bachiller(es): a) Evo Alejandro Eloy Janico Flores
 b) Abner Mendoza Lacho
 c) _____

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Ambiental
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado. Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Evo Alejandro Eloy Janico Flores

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Bachiller (b): Abner Mendoza Lacho

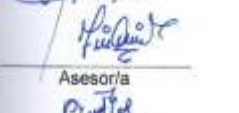
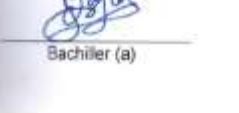
CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

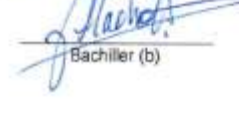
Bachiller (c): _____

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.


 Presidente/a

 Asesor/a

 Bachiller (a)


 Miembro

 Bachiller (b)


 Secretaria

 Miembro

 Bachiller (c)

INDICE GENERAL

10	1. INTRODUCCIÓN.....	7
27	2. METODOLOGÍA.....	8
	2.1. Área de Estudio.....	8
	2.2. Determinación del retroceso glaciar mediante el procesamiento de imágenes satelitales.....	10
	2.3. Cálculo del índice de Temperatura Terrestre (LST).....	11
	2.3.1 Cálculo del NDVI.....	11
	2.3.2 Cálculo de vegetación fragmentada.....	12
	2.3.3 Cálculo de Emisividad.....	12
	2.4. Cálculo del índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI).....	13
	2.5. Determinación de Albedo de Superficie (SA).....	14
	2.6. Análisis de Datos climáticos.....	15
	2.7. Análisis de estimación futura de retroceso glaciar.....	16
	3. RESULTADOS.....	16
	3.1. Determinación del retroceso glaciar mediante imágenes satelitales.....	16
2	3.2. Tendencias de variabilidad climática y su relación con el retroceso glaciar - Análisis climático.....	19
	3.3. Determinación de Superficie de Albedo.....	20
	3.4. Proyección futura del retroceso glaciar.....	22
	4. DISCUSIONES.....	23
	5. CONCLUSIÓN.....	27
	6. REFERENCIAS.....	29

Análisis Multitemporal del albedo y retroceso glaciar bajo escenarios de cambio climático en la Cordillera Apolobamba

Resumen:

Este estudio evalúa la evolución del retroceso glaciar y los cambios en el albedo superficial en la Cordillera Apolobamba entre 1990 y 2024, integrando series multitemporales Landsat 5, 7 y 8 (TM, ETM+, OLI), índices espectrales (NDSI, NDVI) y estimaciones de albedo derivadas de reflectancia superficial procesadas en Google Earth Engine y validadas en Sistemas de Información Geográfica. Los resultados muestran una disminución de 58.23 % del área glaciar y una tendencia lineal altamente significativa $R^2 = 0.9037$, equivalente a una pérdida media de 0.89 km² año. La trayectoria temporal del albedo evidencia un progresivo oscurecimiento superficial, compatible con la reducción de nieve estacional, incremento de detritos y mayor exposición de hielo envejecido. El análisis climático complementario indica una tendencia de enfriamiento débil pero significativa, junto con un incremento sostenido de precipitación, lo que sugiere un desacoplamiento parcial entre los forzantes atmosféricos y la respuesta criosférica. La proyección lineal estima que el sistema glaciar podría reducirse a menos de 10 km² hacia 2040 y aproximarse al colapso antes de 2050. Estos hallazgos confirman que Apolobamba constituye uno de los sistemas glaciares tropicales más vulnerables de Los Andes Peruanos, con implicancias críticas para la disponibilidad hídrica y la gestión de riesgos.

Palabras clave: Albedo, glaciar, Apolobamba, superficies de reflectancia, precipitación, NDVI, NDSI

Multitemporal analysis of albedo and glacial retreat under climate change scenarios in the Apolobamba mountain range

Abstract:

This study evaluates the evolution of glacial retreat and changes in surface albedo in the Apolobamba Range between 1990 and 2024, integrating multitemporal series from Landsat 5, 7, and 8 (TM, ETM+, OLI), spectral indices (NDSI, NDVI), and albedo estimates derived from surface reflectance processed in Google Earth Engine and validated in Geographic Information Systems. The results show a 58.23% decrease in glacial area and a highly significant linear trend ($R^2 = 0.9037$), equivalent to an average loss of 0.89 km² year. The temporal trajectory of albedo shows a progressive surface darkening, consistent with the reduction of seasonal snow, increased debris, and greater exposure of aged ice. The complementary climate analysis indicates a weak but significant cooling trend, along with a sustained increase in precipitation, suggesting a partial decoupling between atmospheric forcing and the cryospheric response. Linear projections estimate that the glacial system could shrink to less than 10 km² by 2040 and approach collapse before 2050. These findings confirm that Apolobamba is one of the most vulnerable tropical glacial systems in the Peruvian Andes, with critical implications for water availability and risk management.

Keywords: Albedo, glacier, Apolobamba, reflectance surfaces, precipitation, NDVI, NDSI

1. INTRODUCCIÓN

En Perú se concentra alrededor del 70 % de los glaciares tropicales, con una notable reducción del 29 % entre 2000 y 2016 (Seehaus et al., 2019). Estos cuerpos de hielo, situados a más de 4500 m.s.n.m. representan la principal fuente de recurso hídrico para las cuencas aledañas (Lewandowski et al., 2019). El derretimiento de los glaciares tropicales en la cordillera Apolobamba ubicada en Los Andes peruanos, alberga importantes masas glaciares que desempeñan un rol esencial en la regulación hídrica y climática de la región. Mackay et al. (2025) mencionan que el amortiguamiento de la regulación hídrica se vera inhibida en el futuro a consecuencia del retroceso y perdida de masa glaciar ocasionado por el calentamiento global. No obstante, la Cordillera Apolobamba, ha documentado pérdidas significativas de masa glaciar en las últimas décadas (Veettil et al., 2019). A finales de los 70 se a evidenciado un retroceso considerable debido al alza de temperaturas en la región altoandina Veetilet al (2019).

Se han realizado innumerables estudios para cartografiar y cuantificar el retroceso glaciar en el Perú, sin embargo, muchos de estos estudios se han enfocado en zonas de mayor presencia glaciar, tal es el caso de la Cordillera Blanca. Existen estudios realizados en la Cordillera Apolobamba que evidencian un retroceso superior al 50% de perdida glaciar entre 1986-2015, con pérdidas del 0.79km² por año.

Diversos estudios en glaciares tropicales señalan al albedo como un factor directamente correlacionado al retroceso glaciar, dejando en evidencia la necesidad de realizar monitoreos multi temporales bajo variables climáticas (Cunha et al., 2019). Las variaciones de albedo glaciar constituyen la fracción de radiación solar reflejada por la superficie, un mecanismo que juega un papel fundamental en el balance radiactivo-glaciar Shaw et al. (2022) mencionan, una mínima reducción del valor del albedo favorece la absorción de la radiación solar y acelera el derretimiento. En zonas secas de los Andes, se registraron valores mínimos de albedo desde 0,25–0,5 y pérdidas promedio de –0,05 durante el “mega-sequía” de la última década (Shaw et al., 2022). Además, las impurezas, precipitación pluvial o perdida de nieve frescas, la deposición de carbono negro y polvo

mineral ocasionada por la actividad humana y los incendios forestales en la selva amazonica aumentan la probabilidad de una acelerada perdida de glaciares (Cereceda-Balic et al., 2022).

La presente investigación aborda la brecha existencial de estudios mediante le análisis multitemporal del albedo y retroceso glaciar, a partir del cartografiado multitemporal del albedo superficial glaciar y el retroceso en intervalos de 5 años, utilizando imágenes Landsat (5, 7, 8), Sentinel-2 y Sentinel-1, y técnicas de detección espectral como NDSI, NDVI; y modelamiento bajo escenarios climáticos, mediante el uso de plataformas avanzadas como Google Earth Engine, R y Python (Ermida et al., 2020).

Dicha información fortalecerá el conocimiento científico sobre la dinámica glaciar en regiones tropicales, sino que también generarán insumos técnicos clave para futuras investigaciones, así mismo los resultados permitirán a entidades gubernamentales e instituciones ambientales incorporar criterios científicos en la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua y la conservación de ecosistemas frágiles. Los glaciares deben ser considerados ecosistemas estratégicos por su valor hídrico y por representar zonas de riesgo ante el cambio climático.

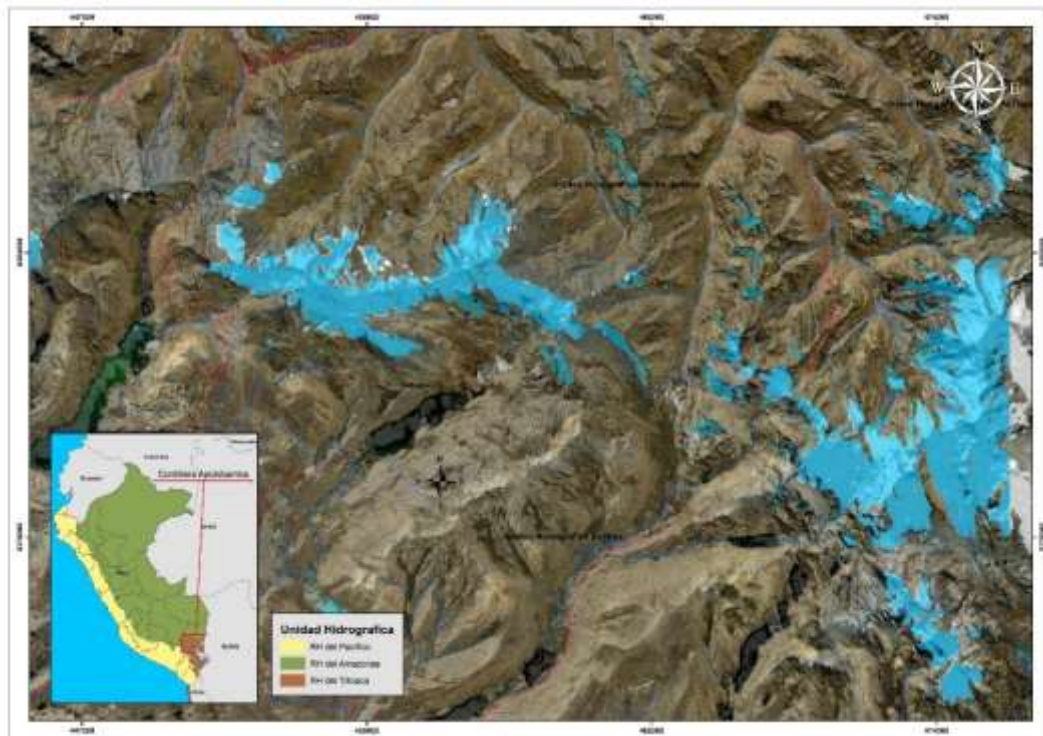
2. METODOLOGÍA

2.1. Área de Estudio

La Cordillera Apolobamba se localiza en el ramal oriental de los Andes peruanos, al sureste del país, donde cumple un rol geoestratégico clave como zona de transición entre el Altiplano andino y la selva amazónica. Esta cordillera de alta montaña se extiende a lo largo de aproximadamente 85 kilómetros en sentido noroeste-sureste, con una superficie glaciar estimada de 40 km², distribuyéndose entre los territorios de Perú y Bolivia.

Figura 1.

Sistema de extracción de aceite esencial por arrastre con vapor asistido por microondas



La cordillera Apolobamba es una unidad morfoestructural y ecológica de alta relevancia, ya que abastece a dos microcuencas hidrográficas fundamentales; por un lado, contribuye a la vertiente del lago Titicaca a través de pequeños afluentes del Altiplano; por otro, descarga hacia la vertiente amazónica mediante la cuenca del río Inambari, lo que la convierte en una fuente estratégica de agua dulce y biodiversidad (Wood et al., 2021). En términos ecosistémicos, esta cordillera representa un nodo de conectividad altoandino crucial para la regulación hidrológica, la provisión de servicios ecosistémicos y la estabilidad de paisajes de montaña, en especial en contextos de variabilidad climática creciente.

Además, el retroceso glaciar ha favorecido la formación y expansión de lagos proglaciares, incrementando el riesgo de eventos extremos como las GLOFs (Glacial Lake Outburst Floods), particularmente en zonas como Apolobamba donde la estabilidad geomorfológica se encuentra comprometida por la combinación de pendiente, deshielo y actividad sísmica (Shugar et al., 2020). Estas dinámicas posicionan a la Cordillera Apolobamba no solo como un reservorio vital de agua dulce, sino también como una región

críticamente expuesta a los efectos del cambio climático, por tanto, prioritaria para la investigación científica, la conservación ambiental y la formulación de políticas públicas basadas en evidencia.

2.2. Determinación del retroceso glaciar mediante el procesamiento de imágenes satelitales

La presente investigación, tuvo como estudio un periodo de 35 años, entre los periodos de 1990 - 2024, los cuales se dividieron en subperiodos de 5 años, con proyección de mapa UTM, datum WGS84, zona 19 sur con formato Geotiff, en los cuales se seleccionaron imágenes satelitales de los sensores de Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+) y Landsat8 (OLI/TIR) descargadas del repositorio del USGS EarthExplorer, mediante el sitio web [Google Earth Engine](https://code.earthengine.google.com/4702289d29a544c0a4d11402378141a4) <https://code.earthengine.google.com/4702289d29a544c0a4d11402378141a4>.

El sensor TM (Thematic Mapper) a bordo de Landsat 5 otorga información en siete bandas espectrales, abarcando regiones del visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta y una banda térmica. Esta configuración permite su uso prolongado en estudios de superficie y monitoreo criosférico. El Landast 7 está equipado con el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), opera mediante 8 bandas espectrales, incluyendo una banda pancromática de 15m y una banda térmica de mayor estabilidad radiométrica. Aunque la falla del Scan Line Corrector (SLC) estudios recientes han confirmado que el ETM+ mantiene una elevada compatibilidad espectral y radiométrica con sensores de nueva generación (Wulder,M., et al., 2019). Landsat 8 incorpora los sensores OLI (nueve bandas multiespectrales) y TIRS (dos bandas térmicas). Investigaciones recientes demuestran que OLI/TIRS presenta una estabilidad radiométrica significativamente superior a la de TM y ETM+, hecho esencial para series temporales prolongadas aplicadas al monitoreo de retroceso glaciar (Mishra et al., 2014; Storey et al., 2020) aspectos esenciales para la construcción de series temporales de retrocesos glaciar.

Las escenas satelitales fueron seleccionadas optando criterios de calidad estrictos: 1) Filtrado espacial y temporal de la colección Landsat para asegurar coherencia en el análisis.

2) Delimitación el área de estudio y el plano temporal definiendo los años en los que se deberá filtrar la imagen satelital. 3) Umbralización por fracción de nubosidad $<$ al 10%, combinada con el enmascaramiento de nubes y sombras a través de QA o algoritmos específicos para minimizar la pérdida de píxeles útiles (Li et al., 2022; Aybar et al., 2022). 4) Para cada intervalo anual, se integraron todas las escenas satelitales que cumplieran con los criterios de selección previamente definidos. Con dicho conjunto de insumos, se implementó un procedimiento de generación de compuestos anuales basado en el cálculo del valor medio de las imágenes filtradas. Este enfoque permite derivar un promedio estadísticamente representativo que resume la respuesta espectral del glaciar en el año analizado, facilitando así los contrastes multitemporales y la detección de cambios interanuales (Li et al., 2022; Aybar et al., 2022; Tamiminia et al., 2020).

2.3. Cálculo del índice de Temperatura Terrestre (LST)

Según lo planteado por Guha (2022), la distribución espacial de la temperatura de la superficie terrestre (LST) está fuertemente condicionada por las propiedades físicas y radiativas de los materiales presentes en la superficie. Superficies de alta inercia térmica y bajo albedo como áreas urbanizadas, suelos desnudos y afloramientos rocosos tienden a exhibir valores elevados de LST debido a su mayor capacidad de absorción y retención de energía. En contraste, el incremento de la cobertura vegetal y la presencia de cuerpos de agua favorecen una disminución significativa del LST, producto de mecanismos como la evapotranspiración, el sombreado y la mayor capacidad disipativa del agua. Estos contrastes evidencian el papel determinante que desempeñan las características biofísicas superficiales en los patrones térmicos detectados mediante teledetección.

2.3.1 Cálculo del NDVI

Con el fin de determinar la cobertura vegetal y su influencia sobre la dinámica térmica y superficial de la cordillera Apolobamba. De acuerdo con Ermida (2020), el NDVI se deriva a partir de las bandas roja e infrarroja cercana (NIR) utilizando valores de reflectancia superficial (SR), debido a que estos incorporan correcciones atmosféricas y proporcionan estimaciones más estables y precisas que los valores de reflectancia aparente en el tope de

28

la atmósfera (TOA), además tienen un rango más amplio lo que mejora la capacidad de distinguir diferentes estados de vegetación en comparación con los NDVI calculados a partir de reflectancia TOA, para calcular el NDVI se utilizan las siguientes ecuaciones (I) (II).

$$NDVI_{L5,L7} = \frac{(\rho_{B4}) - (\rho_{B3})}{(\rho_{B4}) + (\rho_{B3})} \quad (1)$$

Donde ρ_{B4} es reflectancia superficial en el infrarrojo cercano (NIR), ρ_{B3} es reflectancia superficial en el rojo visible (RED).

$$NDVI_{L8} = \frac{(\rho_{B5}) - (\rho_{B4})}{(\rho_{B5}) + (\rho_{B4})} \quad (2)$$

Donde ρ_{B5} es reflectancia superficial en el infrarrojo cercano (NIR), ρ_{B4} es reflectancia superficial en el rojo visible (RED).

2.3.2 Cálculo de vegetación fragmentada

Discriminar la vegetación fragmentada en el NIR y RED permite capturar variaciones estructurales y fisiológicas de la cubierta vegetal con alta sensibilidad. Estudios recientes demuestran que umbrales mínimos entre 0.20–0.30 permiten separar de manera consistente la vegetación frente a superficies no vegetadas en entornos heterogéneos y de baja productividad primaria (Ermida et al., 2020). Una vez obtenido el NDVI se define un umbral mínimo (τ) para identificar los píxeles clasificados como vegetación.

$$Vegetación\ Fragmentada = \begin{cases} 1, si\ NDVI \geq \tau \\ 0, si\ NDVI < \tau \end{cases} \quad (3)$$

Donde, τ toma el valor de 0.20 y 0.30 respectivamente. Estudios en regiones secas y de baja productividad de biomasa han demostrado que un valor de $NDVI \geq 0.20$ permite discriminar adecuadamente la vegetación frente al suelo desnudo o superficies rocosas (Ermida et al., 2020; Jiang et al., 2020).

2.3.3 Cálculo de Emisividad.

La emisividad se modela como una función de la vegetación fragmentada, la emisividad toma valores térmicos debido a su estructura celular y mayor absorción de radiación de onda larga, mientras que el suelo desnudo muestra menor emisividad y mayor

variabilidad espectral. Xue Zhong et al. (2021) demuestra que la emisividad obtenida de la vegetación fragmentada es consistente, adecuados para investigaciones multitemporales en ecosistemas y monitoreo climático.

$$EMM = F_v * (0.004 + 0.986) \quad (4)$$

Donde EMM es la emisividad y F_v es la vegetación fragmentada.

El cálculo del LST se realizó en tres etapas siguiendo el procedimiento de obtención de la temperatura de brillo, cálculo de vegetación fragmentada y corrección de la emisividad. Estudios realizados por Xue Zhong et al., (2021) validan el enfoque metodológico asegurando reducir incertidumbres asociadas a los datos atmosféricos, proporcionando estimaciones fiables, para obtención del LST se debe aplicar la siguiente ecuación.

$$LST = \left(\frac{T_b}{1 + \left(0.00115 * \frac{T_b}{1.438} \right) * \log(E_p)} \right) - 273.15 \quad (5)$$

Donde, T_b es la Banda Térmica, (Banda seis (B6 para Landsat 7 y 5; B10 para Landsat 8) y E_p es la emisividad. Xue Zhong et al. (2021) señalan que los valores de Reflectancia de Superficie (SR) son factibles para el cálculo de LST, ya que disminuyen el margen de error asociado al procesamiento radiométrico.

2.4. Cálculo del índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI)

Los valores de NDSI indican superficies dominadas por nieve, hielo o mezclas de nieve con detritos debido a su elevada reflectancia visible y baja reflectancia SWIR. Por el contrario, los valores bajos corresponden a detritos, suelos desnudos y rocas, que presentan alta absorción en el visible y mayor reflectancia en el SWIR (Ulloa, 2020). Diversos estudios centrados en la dinámica de retroceso glaciar han demostrado que el NDSI es un indicador sólido para diferenciar nieve en ambientes de alta montaña y glaciares tropicales, incluso bajo escenarios de mezcla espectral compleja. Para el cálculo del NDVI se utilizarán las siguientes ecuaciones (1) (2).

$$NDSI_{L5,L7} = \frac{(B2) - (B5)}{(B2) + (B5)} \quad (1)$$

8

Donde B2 es a alta reflectancia en la región visible (GREEN) y B5 es la absorción en el infrarrojo de onda corta (SWIR).

$$NDSI_{L8} = \frac{(B3)-(B6)}{(B3)+(B6)} \quad (2)$$

8

Donde B3 es a alta reflectancia en la región visible (GREEN) y B6 es la absorción en el infrarrojo de onda corta (SWIR).

2.5. Determinación de Albedo de Superficie (SA)

4

El Albedo de superficie constituye un parámetro clave del balance energético de la superficie terrestre al determinar la fracción de radiación solar reflejada por distintos tipos de cobertura. Esta variabilidad influye en procesos hidrológicos, crioféricos y retroalimentación de información de alta montaña (Brooks, W. et al, 2021). El albedo se emplea como indicador de cambio de uso de suelos y tendencias asociadas a cambio climático, esto debido a la reflectancia espectral de la cobertura terrestre (Xue Zhong et al., 2021). Para el cálculo del Albedo de Superficie (SA) se utilizó el enfoque propuesto, el cual se aplica para productos Landsat de superficies de reflectancia, tal como se expresa en la ecuación (3).

$$SA = b_{Blue} * p_{Blue} + b_{Green} * p_{Green} + b_{Red} * p_{Red} + b_{Nir} * P_{Nir} + b_{Swir1} * p_{Swir1} + b_{Swir2} * p_{Swir2} + b_0 \quad (3)$$

Donde, (p) corresponde a la reflectancia bidireccional de superficie corregida atmosféricamente, y (b) representa los coeficientes de conversión narrow-to-broadband específicos para cada sensor Landsat. Estos coeficientes han sido calibrados para garantizar la compatibilidad entre sensores (TM, ETM+ y OLI), incluso en análisis multitemporales de larga duración (Xue Zhong et al., 2021). La Tabla 1 presenta los coeficientes de conversión correspondientes a cada banda espectral de los sensores Landsat empleados en este análisis

Tabla 1

Coeficientes de conversión de banda para calcular el albedo de onda corta para los diferentes datos Landsat

Sensor	bBLUE	bGREEN	bRED	bRIN	BSWIR1	BSWIR2
--------	-------	--------	------	------	--------	--------

Landastt-5TM	0.3206	0	0.1570	0.3666	0.1162	0.0457
Landsat-7 ETM+	0.3141	0	0.1607	0.3694	0.1160	0.0456
Landsat-8 OLI	0.2453	0.0508	0.1804	0.3081	0.1332	0.0521

Nota: Se muestra la conversión de bandas para albedo glaciar.

El preprocesamiento de las escenas Landsat en Google Earth Engine incluyó corrección radiométrica y geométrica, cálculo del NDSI y estimación del albedo de superficie mediante algoritmos automatizados, cuyos productos fueron exportados para su posterior análisis en ArcGIS Pro. La validación de la clasificación supervisada se realizó utilizando una matriz de contingencia, lo que permitió cuantificar la concordancia entre la clasificación espectral y la distribución real de la cobertura glaciar, siguiendo metodologías recomendadas en estudios recientes de superficies criosféricas (Shahtahmassebi et al., 2021).

2.6. Análisis de Datos climáticos

La serie climática utilizada en la investigación proviene inicialmente de la estación meteorológica de Ananea, cuya información proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) abarca el periodo 1963–2024. No obstante, los registros presentan discontinuidades importantes entre 1963 y 2001 como consecuencia de vacíos observacionales y fallas técnicas, lo que limita la reconstrucción histórica de las condiciones climáticas en la zona de estudio. Frente a esta limitación, y con el fin de disponer de una serie continua y homogénea que permita analizar la variabilidad climática de largo plazo en ambientes glaciares de la Cordillera Apolobamba, se incorporaron datos complementarios de temperatura media y precipitación provenientes del sistema NASA POWER.

El uso de esta fuente es metodológicamente consistente en estudios de alta montaña, ya que investigaciones recientes evidencian que NASA POWER reproduce adecuadamente las tendencias multidecadales de temperatura y precipitación en regiones glaciadas. Jasrotia et al. (2023) demostraron que las series climáticas derivadas de NASA POWER presentan patrones temporales coherentes con observaciones in situ y con productos consolidados

como CRU TS4, lo que permite caracterizar la evolución climática asociada al retroceso glaciar. De forma complementaria, Wangmo et al. (2025) identificaron que los registros de temperatura de NASA POWER explican de manera significativa las variaciones en el área glaciar en la cuenca de Mo Chu (Bután), lo que valida su utilización como insumo para estudios de sensibilidad climática en ambientes de alta montaña.

2.7. Análisis de estimación futura de retroceso glaciar.

Para estimar la evolución futura de la superficie glaciar se empleó un modelo de tendencia lineal, adecuado para glaciares tropicales en desequilibrio climático, donde la pérdida de masa y área responde de manera casi proporcional al forzante térmico regional (Hugonnet et al., 2021; Zemp et al., 2019). Este enfoque ha sido aplicado ampliamente en escenarios de retroceso acelerado, donde los glaciares muestran una dinámica de ablación dominada por el incremento sostenido de temperatura y el descenso del albedo superficial. Se aplicará la siguiente fórmula.

$$A(t) = \beta_0 + \beta_1(t - t_0) \quad (4)$$

Donde, $A(t)$: superficie glaciar estimada en el año t (km^2), β_0 : superficie inicial (año base), β_1 : tasa media anual de pérdida ($\text{km}^2/\text{año}$), t_0 : año base (1990 en este estudio).

3. RESULTADOS

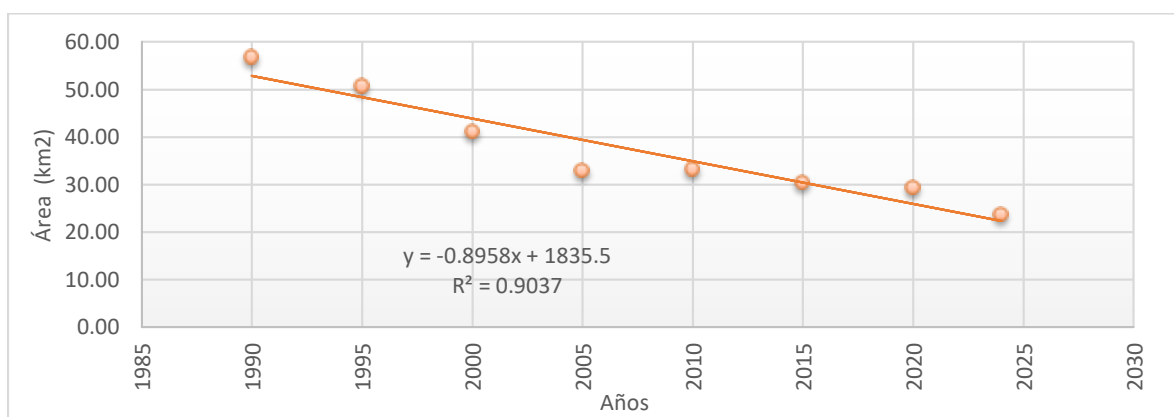
3.1. Determinación del retroceso glaciar mediante imágenes satelitales

Los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales permiten identificar un patrón de disminución sostenida del área glaciar a lo largo de 35 años, considerando el mejor método de digitalización de cobertura nival. En cuanto al coeficiente de correlación, la pendiente negativa de la ecuación constituye un indicador cuantitativo de que el retroceso glaciar ocurre a una tasa aproximada de 0.89 km^2 por año, lo cual representa un ritmo de ablación elevado para un sistema glaciar tropical. Este comportamiento es consistente con lo descrito en investigaciones de glaciares intertropicales, los cuales responden a las variaciones en la temperatura atmosférica. El coeficiente de determinación

$R^2 = 0.9037$ obtenido en el modelo representa el proporción de la variabilidad total de la superficie glaciar que es explicada exclusivamente por la variable tiempo, significa que el 90.37 % de la variación en el área glaciar se atribuye de forma consistente al paso del tiempo, y solo un 9.63% responde a factores no modelados como: errores de clasificación, variabilidad atmosférica interanual, ruido espectral o procesos no lineales, tal como se muestra en la (Figura 2).

Figura 2.

Áreas de cobertura glaciar en función de los años.



En el año 1990 la Cordillera Apolobamba obtuvo un 56.77 km² de cobertura glaciar y para el 2024 obtuvo 23.71 Km², lo que evidencia un retroceso glaciar de 58.23% para el periodo de 1990-2024. (Tabla2).

Tabla 2

Superficie y porcentaje del retroceso glaciar obtenidas en la clasificación supervisada (1990-2024)

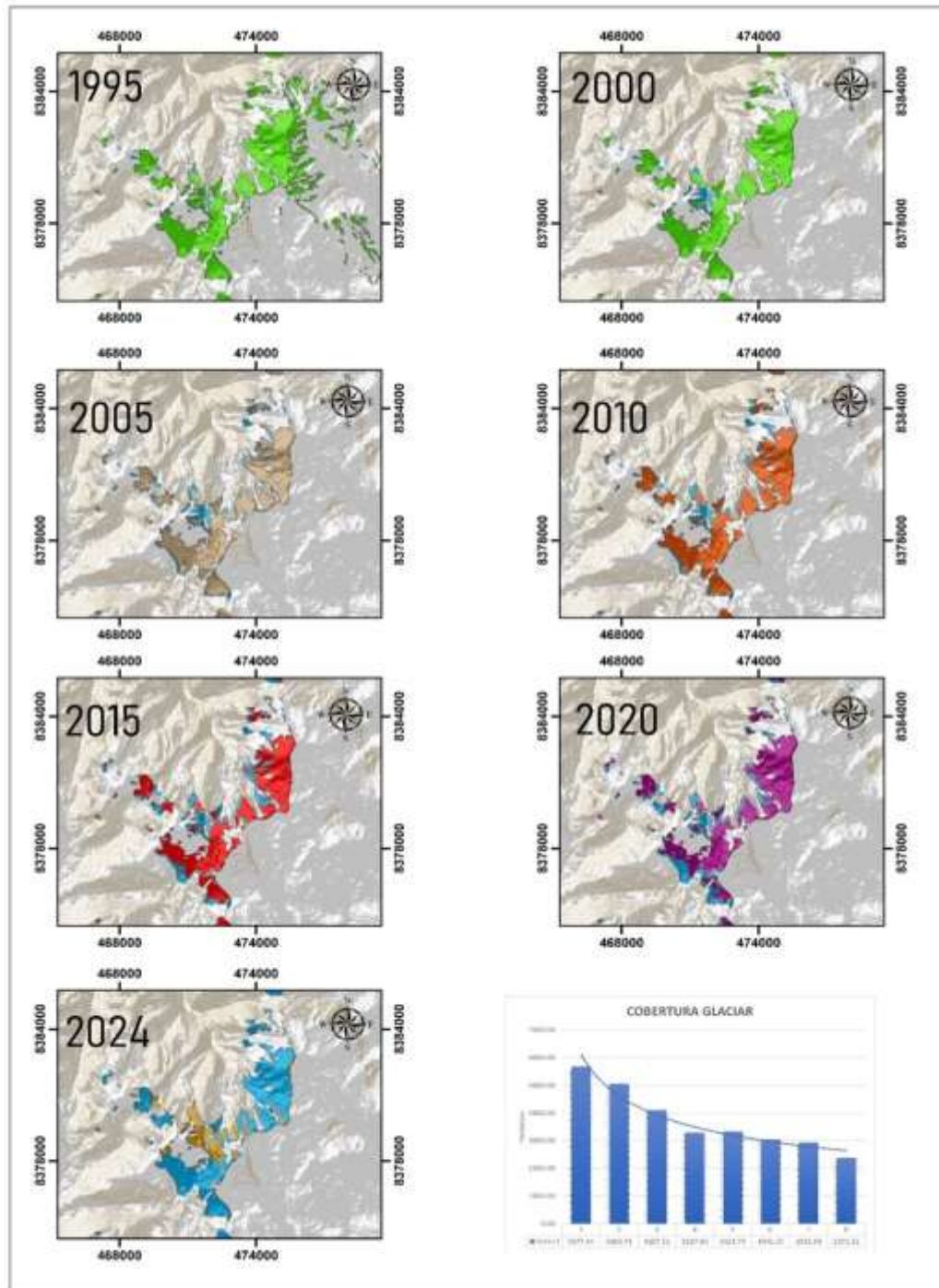
Año	Área (Km2)	Área perdida en relación con 1990	Porcentaje de retroceso (%)
1990	56.77	-	-
1995	50.61	6.17	10.86
2000	41.08	15.70	27.65
2005	32.88	23.90	42.09
2010	33.25	23.53	41.44
2015	30.42	26.36	46.43
2020	29.33	27.45	48.34
2024	23.71	33.06	58.23

Nota: Se muestra el porcentaje de retroceso glaciar

El retroceso glaciar se evidencia mediante la cartografía (Figura 3), comparando la cobertura glaciar del año 1990, Donde se ve el retroceso progresivo en la parte noroeste de la cordillera, para el año 2020 se observa que el retroceso no fue tan significativo como en años anteriores.

Figura 3.

Retroceso de la cordillera Apolobamba en comparación del año 1990



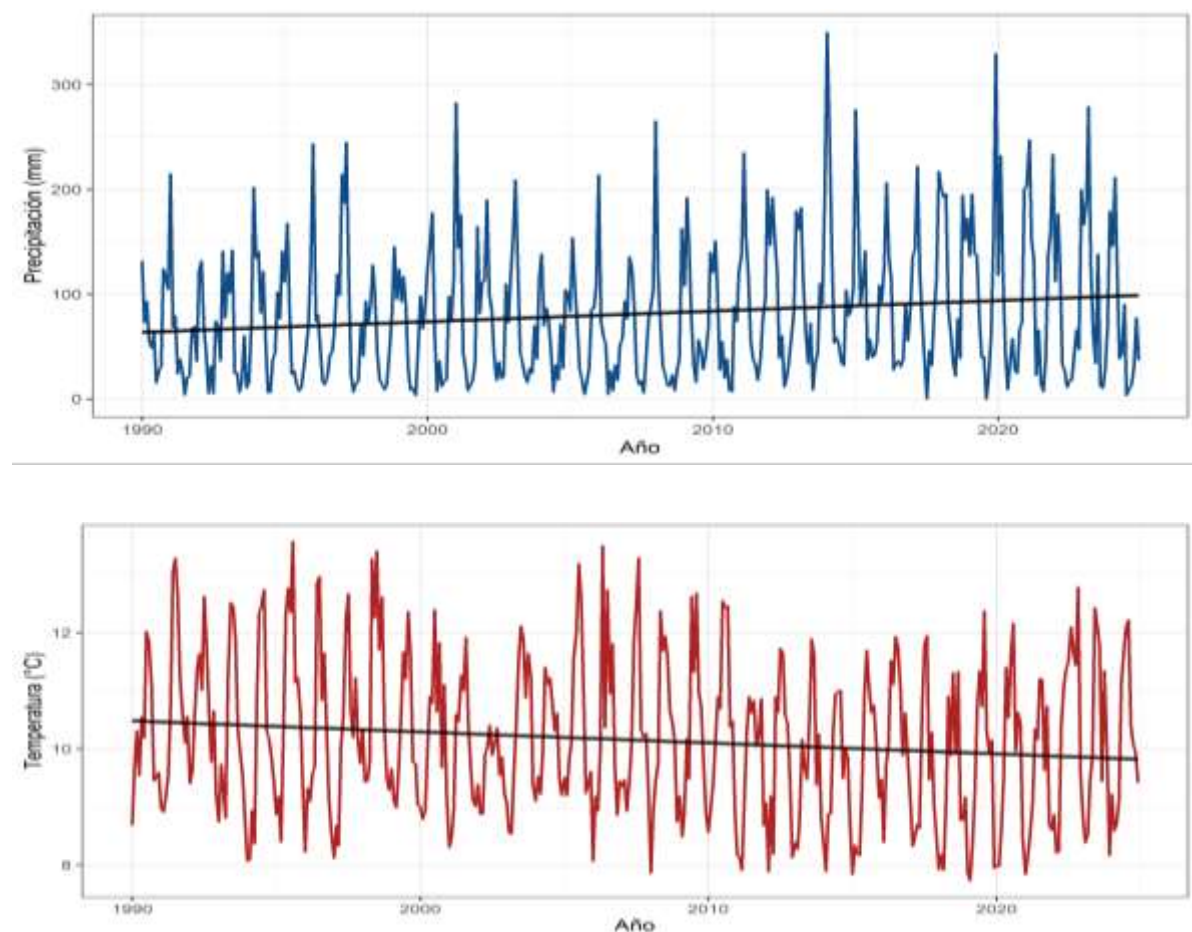
3.2. Tendencias de variabilidad climática y su relación con el retroceso glaciar -

Análisis climático

El análisis de tendencia mediante la prueba de Mann–Kendall reveló una disminución significativa en la temperatura media mensual ($\tau = -0.0866$, $p = 0.008$), mientras que la pendiente de Sen confirmó un enfriamiento de -0.00152 °C por mes (≈ -0.018 °C/año). En contraste, la precipitación acumulada mensual mostró un incremento significativo ($\tau = 0.0933$, $p = 0.0043$), con una pendiente de Sen comprendida entre 0.018 y 0.101 mm/mes. Tal como se presenta en la figura 4.

Figura 4.

a) Tendencia de la Precipitación Acumulada Mensual, b) Tendencia de la Temperatura Media Mensual, c) Correlación entre temperatura y Precipitación y d) Tendencias comparadas de Temperatura y Precipitación; Periodo 1990-2024



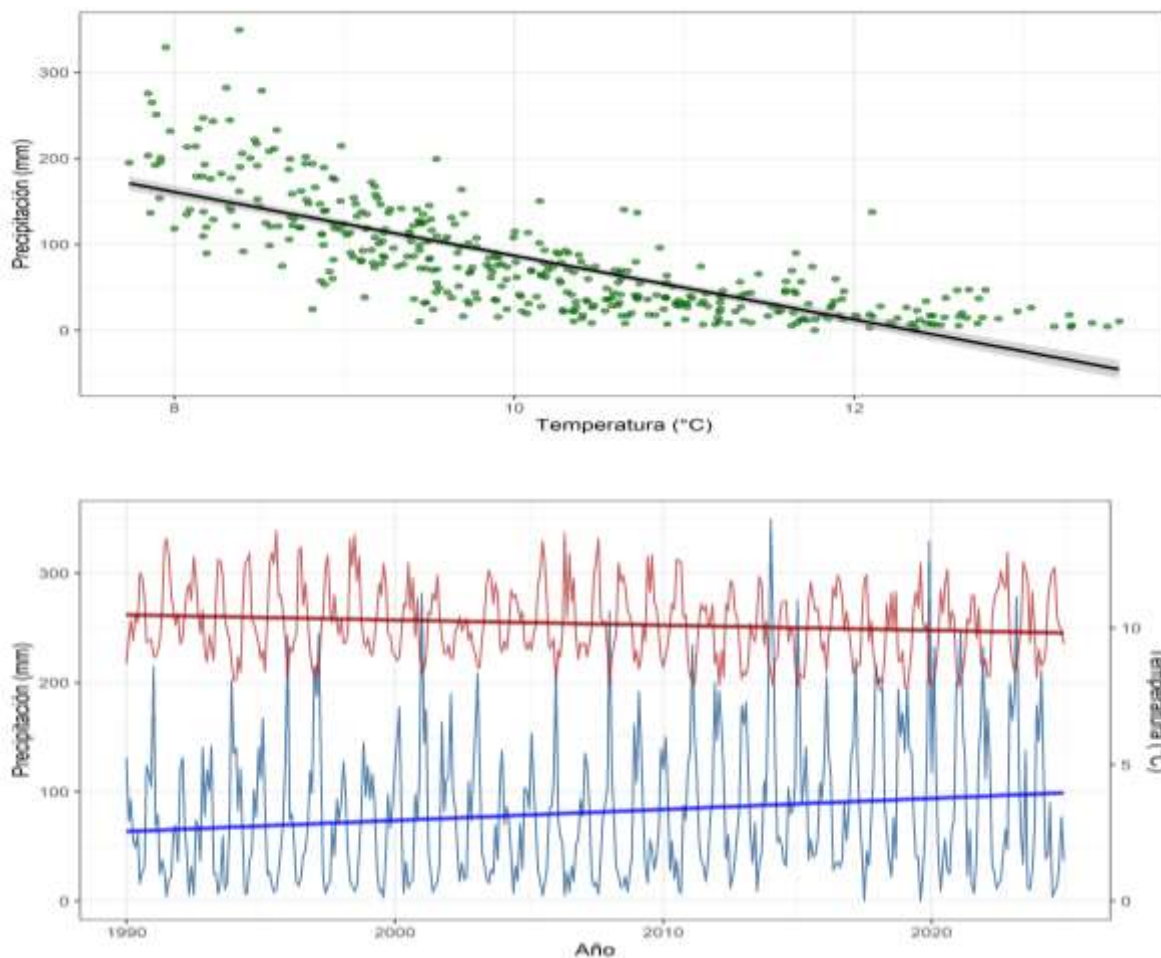


Tabla 3

Estadísticos de tendencia para Temperatura y Precipitación (1990–2024)

Variable	Tau MK	p-value MK	Sen's slope (unidad/mes)	Sen (unidad/año)	Tendencia	Significancia
Temperatura (°C)	-0.0866	0.008	-0.00152 °C/mes	-0.0182 °C/año	Decreciente	Significativa (p < 0.01)
Precipitación (mm)	0.0933	0.0043	+0.0595 mm/mes (promedio)	+0.714 mm/año	Creciente	Significativa (p < 0.01)

Nota: Se muestra significancia de las variables y sus tendencias

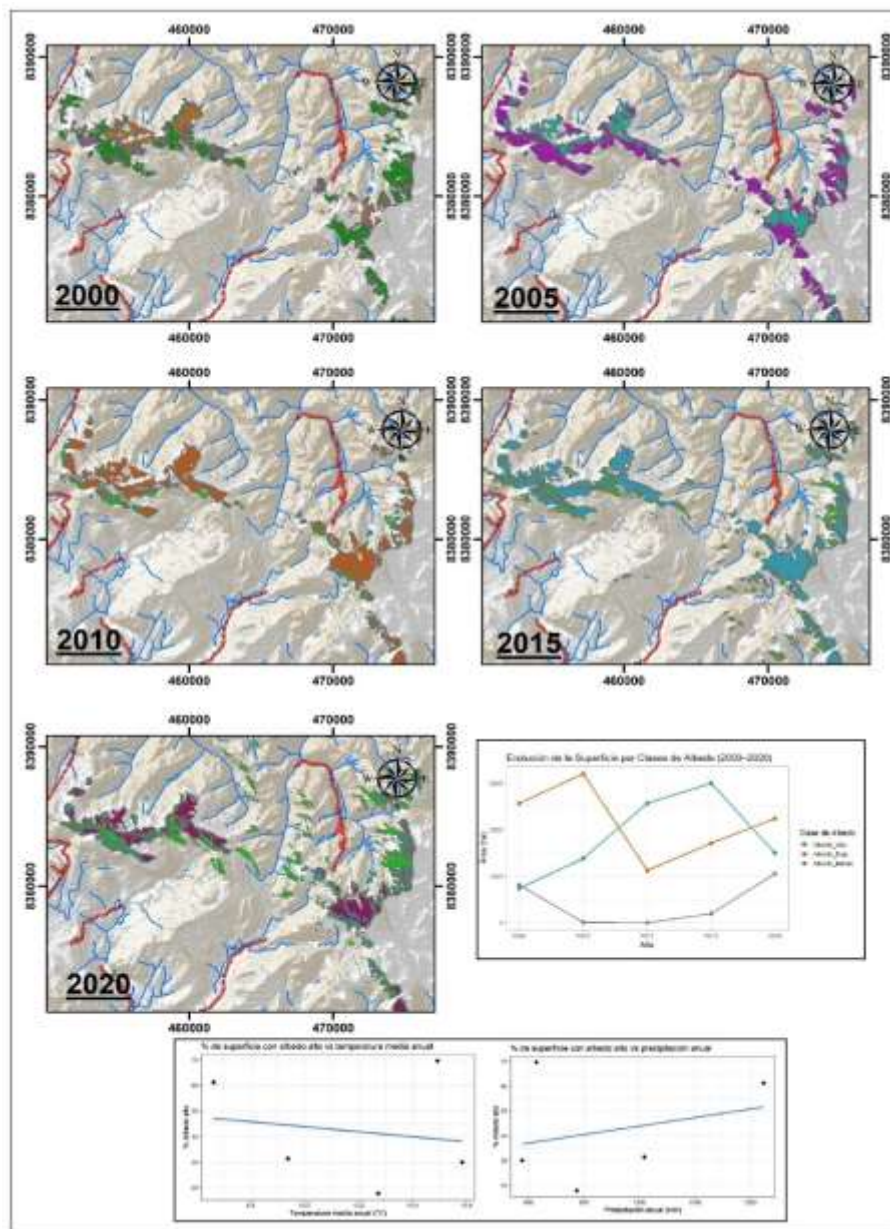
3.3. Determinación de Superficie de Albedo

La variabilidad significativa del albedo entre 2000 y 2020 se muestran en la Figura 5, con una tendencia general hacia el oscurecimiento de la superficie glaciaria. En el año 2000 predominó el albedo bajo (2563 ha) frente al albedo alto (734 ha), reflejando un sistema ya afectado por pérdida de nieve e incremento de superficies expuestas. Aunque se observa un aumento temporal del albedo alto en 2010 (2563 ha) y 2015 (2998 ha), este periodo coincide

con años más húmedos que favorecieron la renovación nival. Sin embargo, para 2020 el albedo alto disminuye nuevamente a 1500 ha, mientras el albedo bajo aumenta a 2233 ha, evidenciando una recuperación limitada y un retorno a condiciones de mayor absorción de radiación.

Figura 5.

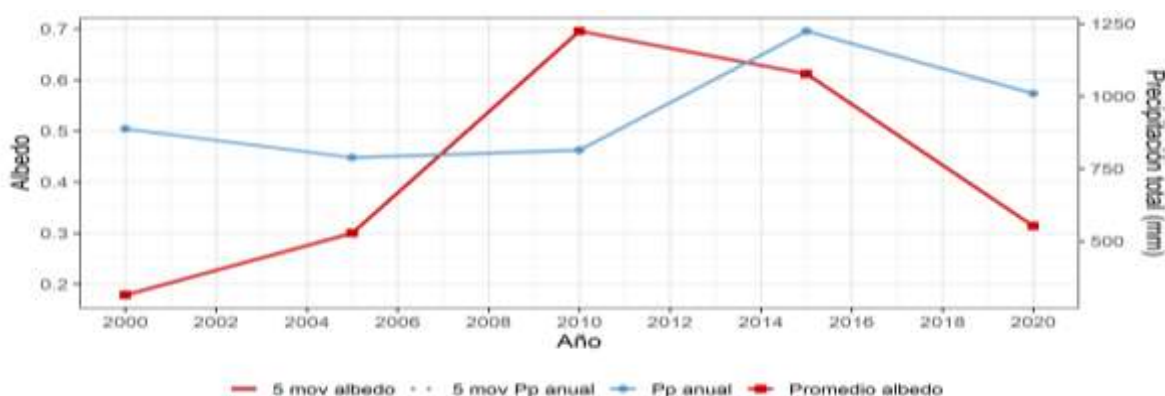
Evolución de la Reflectancia Superficial de Albedo (2000–2020): Diferenciación por Rangos de Albedo Alto, Medio y Bajo



La figura 6 muestra el conjunto de albedo y precipitación anual muestra una relación no lineal y parcialmente desacoplada, característica de sistemas glaciares en estado avanzado de degradación. Entre 2000 y 2010, el albedo se mantiene bajo pese a variaciones moderadas en precipitación, indicando predominio de superficies oscurecidas por ablación y detritos.

Figura 6.

Gráfico albedo y precipitaciones en meses de invierno y verano



3.4. Proyección futura del retroceso glaciar

La proyección indica que el glaciar de la Cordillera Apolobamba mantiene una trayectoria de pérdida acelerada, con una reducción media cercana a 0.95 km² por año. Bajo esta tendencia, la superficie remanente disminuiría a ~19 km² en 2035 y a menos de 5 km² hacia 2050, acercándose a un punto de colapso geométrico e hidrológico. Tal como se muestra en la tabla.

Tabla 4

Escenario futuro de la superficie glaciar de la cordillera Apolobamba

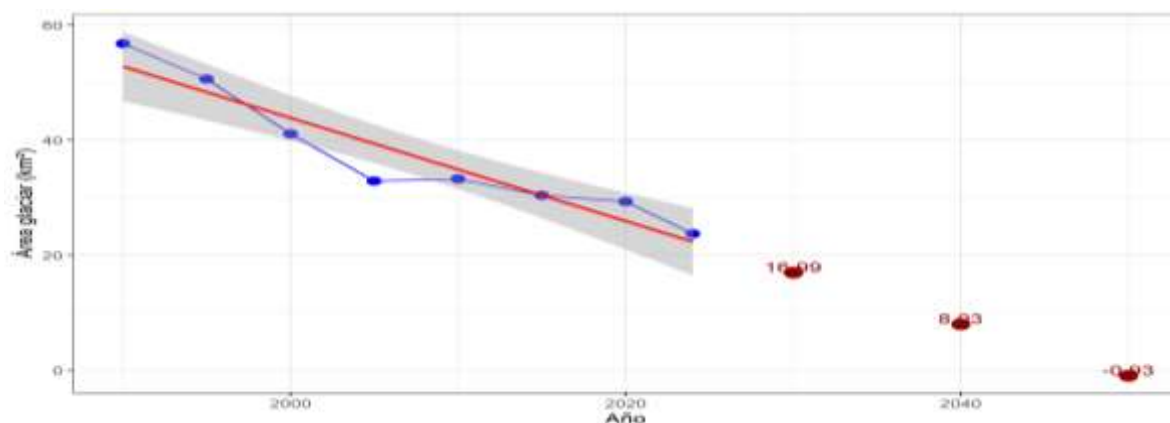
Año	Área proyectada (km ²)	Interpretación
2030	18.85 km ²	33% del glaciar original
2040	9.37 km ²	Menos del 17% del glaciar original
2050	0 km ²	Colapso casi total del glaciar

Nota: Se muestra la proyección de la superficie glaciar

La figura 9 muestra aplicación del modelo lineal indica que la Cordillera Apolobamba mantendrá una reducción sostenida de su superficie glaciar, alcanzando 18.9 km² en 2030, 9.4 km² en 2040 y aproximándose al colapso (<1 km²) hacia 2050. En este caso, la reconstrucción histórica muestra que el sistema ha perdido más del 58% de su área desde 1990, lo que evidencia un glaciar en avanzado estado de desequilibrio climático. Al proyectar la tendencia lineal observada, el glaciar de Apolobamba podría reducirse a 18.9 km² en 2030, 9.4 km² en 2040 y aproximarse al colapso hacia 2050, un comportamiento coherente con proyecciones realizadas en otros macizos tropicales.

Figura 7.

Proyección de área Glaciar al 2030, 2040 y 2050



4. DISCUSIONES

El retroceso glaciar documentado en la Cordillera Apolobamba confirma que el sistema se encuentra en un estado avanzado de desequilibrio frente al calentamiento reciente. La contracción superior al 58 % del área glaciar desde 1990 y la aceleración de la pérdida de superficie entre 2010 y 2024 sugieren que el glaciar ha superado umbrales críticos de estabilidad, coherente con lo descrito para otros glaciares tropicales de baja latitud, donde la elevación de la temperatura del aire se reconoce como el principal forzante del balance de masa negativo (; Rounce et al., 2023). La aparente linealidad de la tendencia de reducción de área (R^2 elevado) oculta una dinámica intrínsecamente no lineal: a medida que el glaciar

pierde espesor y la línea de equilibrio se eleva, se intensifican los procesos de ablación y disminuye la capacidad de mantener zonas de acumulación persistentes, un comportamiento similar al proyectado para macizos glaciares en Himalaya oriental (Das et al., 2025) y otros glaciares tropicales que podrían aproximarse al colapso en las próximas décadas (Rounce et al., 2023).

Los resultados climáticos de la estación Ananea para el periodo 1990–2024 describen un régimen aparentemente contraintuitivo: se observa un enfriamiento estadísticamente significativo de la temperatura media ($-0.018\text{ }^{\circ}\text{C/año}$) acompañado por un aumento significativo de la precipitación mensual ($+0.71\text{ mm/año}$). La relación inversa entre temperatura y precipitación, corroborada por el diagrama de dispersión, es consistente con la climatología del altiplano andino, donde los años más húmedos tienden a asociarse con mayor nubosidad, reducción de la radiación incidente y temperaturas superficiales más bajas. Este patrón puede interpretarse como la expresión local de forzantes de gran escala, particularmente la variabilidad asociada al ENOS y a la intensificación del Monzón Sudamericano (SAMS). Estudios recientes señalan que, bajo un clima en calentamiento, han aumentado la frecuencia y persistencia de eventos La Niña y la complejidad de la señal ENSO, con una mayor relevancia de estados centrales y mixtos (Geng et al., 2022). Este reacomodo de la variabilidad oceánico–atmosférica favorece el transporte de humedad hacia Sudamérica tropical y fortalece el flujo de vapor hacia los Andes, lo que coincide con la tendencia positiva de la precipitación estimada en Ananea. En paralelo, se ha demostrado que durante episodios La Niña se intensifica el SAMS, reforzando la convección y el transporte de humedad desde la Amazonía hacia la sierra sur del Perú (Tedeschi et al., 2016; Silva et al., 2023). Este acoplamiento entre ENOS, SAMS y humedad amazónica proporciona un marco físico robusto para interpretar el enfriamiento concomitante al incremento de lluvias: la mayor nubosidad limita el forzamiento radiativo positivo, atenuando la temperatura del aire aun en un contexto de calentamiento global.

Desde la perspectiva glaciológica, el patrón descrito sugiere que, en el corto plazo, la intensificación de la precipitación sólida y de la nubosidad en sectores de alta montaña puede

ejercer un efecto amortiguador sobre la ablación. Incrementos en la nieve reciente elevan el albedo, reducen la energía disponible en la superficie y contribuyen a un balance de masa menos negativo, como se ha documentado en glaciares de otras regiones de alta montaña. Sin embargo, múltiples estudios advierten que estos efectos moduladores asociados a la variabilidad interna del sistema climático no compensan las pérdidas acumuladas inducidas por el incremento sostenido de la temperatura a escala multidecadal (Rounce et al., 2023). En este sentido, los resultados obtenidos para Apolobamba deben interpretarse como una respuesta transitoria superpuesta a una tendencia estructural de calentamiento y pérdida de hielo. La señal isotópica en nieve y precipitación, analizada en otras regiones criosféricas como la Antártida oriental, muestra que los cambios en la circulación atmosférica y las fuentes de humedad pueden reconfigurar el régimen de acumulación sin necesariamente revertir las tendencias de largo plazo en masa glaciar (Li et al., 2021), lo que refuerza la idea de que aumentos recientes de humedad en los Andes no implican una recuperación del sistema glaciar, sino una reorganización de los mecanismos de aporte.

El análisis del albedo en Apolobamba confirma su papel como Variable Climática Esencial, reflejando tanto la variabilidad interanual como la tendencia de fondo hacia el oscurecimiento superficial. Aunque los años con mayores aportes nivales como 2015 se traducen en incrementos temporales del albedo, coherentes con una cobertura de nieve más extensa y reciente, la serie multitemporal muestra una trayectoria netamente descendente en la reflectancia. Este comportamiento coincide con lo observado en otros glaciares tropicales, donde la disminución del albedo se asocia a la reducción de nieve estacional, la expansión de detritos y la exposición de hielo sucio (Shaw et al., 2022). La disminución del albedo hacia 2020, pese a registrarse uno de los máximos de precipitación, sugiere que la mayor humedad ya no se traduce en una acumulación persistente suficiente para regenerar de manera duradera la superficie nival. Desde el punto de vista físico, este desacople implica que el sistema ha entrado en una fase en la que el forzante térmico y la ablación superan la capacidad de la nieve estacional para reponer la reflectancia, reforzando el ciclo de retroalimentación positiva entre oscurecimiento y derretimiento.

Este patrón de fluctuaciones interanuales sobre una tendencia dominante de oscurecimiento coincide con estudios recientes en glaciares tropicales que describen pérdidas sostenidas de albedo asociadas a reducción de nieve estacional, incremento de detritos y mayor exposición de hielo sucio (Shaw et al., 2022). En conjunto, la evolución observada sugiere que, aunque existen años de mayor acumulación que elevan temporalmente el albedo, el sistema mantiene una trayectoria neta hacia la disminución de la reflectancia superficial, compatible con el retroceso glaciar documentado en la cordillera Apolobamba.

La solidez de estas inferencias se apoya en el uso combinado de productos satelitales de alta resolución y estrategias de calibración radiométrica que han transformado el monitoreo de la criósfera. En particular, la integración de series Landsat y Sentinel-2 permite caracterizar con mayor detalle los patrones espaciales de nieve, hielo y depósitos superficiales en ambientes de alta montaña, superando las limitaciones de productos de resolución más gruesa como MODIS o VIIRS (Gascoin et al., 2019). La disponibilidad de colecciones corregidas radiométricamente, como las actualizaciones de Landsat Collection descritas por Micijevic et al. (2016), reduce sesgos sistemáticos y mejora la comparabilidad temporal, aspecto crucial para detectar tendencias sutiles en albedo y extensión glaciar. De forma complementaria, el desarrollo de algoritmos avanzados —por ejemplo, enfoques de aprendizaje automático como bosques aleatorios para la discriminación de nieve (He et al., 2023) o modelos conjuntos escasos y de bajo rango para detección de blancos en hiperspectral (Wu et al., 2019)— abre la posibilidad de refinar aún más la clasificación de cubiertas nivales y criosféricas, especialmente en regiones con topografía compleja y condiciones atmosféricas cambiantes.

Las proyecciones realizadas para la Cordillera Apolobamba —que estiman reducciones a 18.9 km² en 2030, 9.4 km² en 2040 y una aproximación al colapso hacia 2050— se sitúan dentro del rango de escenarios propuestos para otros glaciares tropicales de los Andes y para sistemas de alta montaña a nivel global (Das et al., 2025; Rounce et al., 2023). Estudios regionales y globales han mostrado que incrementos de la isoterma 0 °C entre 200

y 800 m bajo distintos escenarios de emisiones limitan drásticamente la extensión de las zonas de acumulación, forzando a los glaciares a un régimen dominado por la ablación (Rounce et al., 2023). En Apolobamba, la combinación de adelgazamiento acelerado, aumento de superficies oscuras y disminución sostenida del albedo sugiere que el sistema se aproxima a un punto de no retorno, en el cual pequeños incrementos adicionales de temperatura “every increase in temperature matters” se traducen en pérdidas desproporcionadas de hielo.

Finalmente, la trayectoria proyectada para Apolobamba no solo tiene implicancias hidrológicas y ecológicas, sino también socioeconómicas y de gobernanza del riesgo. La literatura reciente subraya que los cambios hidroclimáticos de largo plazo pueden interactuar con vulnerabilidades sociales y políticas, configurando nuevos escenarios de conflicto y disputa por recursos hídricos. En regiones andinas donde los glaciares sostienen caudales bases críticos para el abastecimiento urbano, la agricultura y la generación hidroeléctrica, la convergencia entre pérdida acelerada de hielo, variabilidad climática intensificada y presiones sociales emergentes podría dar lugar a conflictos subestimados en las proyecciones tradicionales de riesgo. En este contexto, el caso de la Cordillera Apolobamba aporta evidencia empírica valiosa para alimentar tanto las discusiones sobre impactos físicos del cambio climático en glaciares tropicales como los debates más amplios sobre seguridad hídrica y estabilidad territorial en escenarios de calentamiento sostenido.

5. CONCLUSIÓN

El análisis multitemporal evidencia que el retroceso glaciar en la Cordillera Apolobamba es rápido, sostenido y responde a un forzante climático persistente, con una pérdida acumulada del 58.23 % entre 1990 y 2024 y una tendencia lineal altamente significativa. Paralelamente, el albedo superficial muestra un progresivo oscurecimiento, reflejado en la expansión de áreas de baja reflectancia y la reducción de superficies de nieve limpia, reforzando mecanismos de retroalimentación que aceleran la ablación. Aunque la precipitación muestra incrementos y la temperatura registra una ligera disminución en la

estación Ananea, estas variaciones no compensan la intensificación del derretimiento, indicando que el sistema glaciar se encuentra en avanzado desequilibrio energético. Las proyecciones lineales estiman que la superficie glaciar podría reducirse a 18.9 km² en 2030, 9.4 km² en 2040 y aproximarse al colapso hacia 2050, comportamiento coherente con la dinámica observada en otros glaciares tropicales de alta vulnerabilidad. La evidencia sugiere que varios cuerpos glaciares podrían haber superado su peak water, generando riesgos hidrológicos, geomorfológicos y ecosistémicos en las cuencas dependientes. Estos resultados subrayan la necesidad urgente de fortalecer los programas de monitoreo criosférico, mejorar los modelos climáticos–glaciológicos regionales y diseñar estrategias de adaptación orientadas a la seguridad hídrica y la gestión de riesgos en Apolobamba.

6. REFERENCIAS

- Amir Reza Shahtahmassebi, A., Li, C., Fan, Y., Wu, Y., Lin, Y., Gan, M., Wang, K., Malik, A., & Blackburn, G. A. (2021). Remote sensing of urban green spaces: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126946. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126946>
- Aybar, C., Ysuhuaylas, L., Loja, J., et al. (2022). CloudSEN12, a global dataset for semantic understanding of cloud and cloud shadow in Sentinel-2. *Scientific Data*, 9, 782. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01878-2>
- Brooks, W. E., Boersma, J., Paprocki, N., Wimberger, P., & Hotaling, S. (2023). Community science for enigmatic ecosystems: Using eBird to assess avian biodiversity on glaciers and snowfields. *Journal of Field Ornithology*, 94(1), 6. <https://doi.org/10.5751/JFO-00218-940106>
- Cereceda-Balic, F., Ruggeri, M. F., & Vidal, V. (2020). Glacier retreat differences in Chilean Central Andes and their relation with anthropogenic black carbon pollution. In *IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)* (pp. 434–440). <https://doi.org/10.1109/LAGIRS48042.2020.9165676>
- Cereceda-Balic, F., Ruggeri, M. F., Vidal, V., Ruiz, L., & Fu, J. S. (2022). Understanding the role of anthropogenic emissions in glacier retreat in the central Andes of Chile. *Environmental Research*, 214(1), 113756. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113756>
- Cheng, X., et al. (2021). [Información del artículo].
- Das, P., Ghosh, S., Reddy, N. G., et al. (2025). Evolution of glacier mass balance and surface velocity in response to climate change in Eastern Himalaya using Landsat imageries. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, 397. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05609-6>
- de Bruin, S. P., Hoch, J. M., von Uexkull, N., Buhaug, H., Demmers, J., Visser, H., & Wanders, N. (2022). Projecting long-term armed conflict risk: An underappreciated field of inquiry? *Global Environmental Change*, 72, 102423. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102423>
- Duguay, C. et al. (2020). [Información del artículo].
- Ermida, S. L., et al. (2020). Validation of global surface reflectance products for terrestrial applications. *Remote Sensing*, 12, 1471. <https://doi.org/10.3390/rs12091471>
- Gascoin, S., Grizonnet, M., Bouchet, M., Salgues, G., & Hagolle, O. (2019). Theia Snow collection: High-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*, 11, 493–514. <https://doi.org/10.5194/essd-11-493-2019>
- Geng, T., Cai, W., Wu, L., et al. (2022). Emergence of changing Central-Pacific and Eastern-Pacific El Niño–Southern Oscillation in a warming climate. *Nature Communications*, 13, 6616. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33930-5>
- He, R., Qin, Y., Zhao, Q., Chang, Y., & Jin, Z. (2023). Effective improvement of the accuracy of snow cover discrimination using a random forests algorithm considering multiple factors: A case study of the Three-Rivers Headwater Region, Tibet Plateau. *Remote Sensing*, 15, 4644. <https://doi.org/10.3390/rs15194644>
- Hugonnet, R., et al. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592, 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Jasrotia, N. S., Kumar, A., Singh, S. K., Singh, A., & Ahmed, P. (2023). Long-term geospatial observations of the Drang Drung and Pensilungpa glaciers (1976–2020). *Sustainability*,

- 15(20), 15067. <https://doi.org/10.3390/su152015067>
- Jiang, Y., Chen, L., Wang, S., & Zhang, X. (2020). A dynamic programming approach to integrate gene expression data and network information for pathway model generation. *Bioinformatics*, 36(1), 169–176. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz498>
- Laqui, W., Zubieta, R., Laqui-Vilca, Y., Calizaya, E., & Laqui-Vilca, C. (2023). Temporal dynamics of glacier retreat and its relationship with local climate in Cordillera Apolobamba, Peru. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10, 1647–1656. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01865-5>
- Lewandowski, J., Arnon, S., Banks, E., Batelaan, O., Betterle, A., Broecker, T., ... & Wu, L. (2019). Is the hyporheic zone relevant beyond the scientific community? *Water*, 11(11), 2230. <https://doi.org/10.3390/w11112230>
- Li, C., Ren, J., Shi, G., et al. (2021). Spatial and temporal variations of stable isotope fractionation in East Antarctic snow. *Journal of Glaciology*, 67(263), 523–532. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.5>
- Li, Z., Shen, H., Weng, Q., Zhang, Y., Dou, P., & Zhang, L. (2022). Cloud and cloud shadow detection for optical satellite imagery: Features, algorithms, validation, and prospects. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 188, 89–108. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.020>
- Liang, S. (2001). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: I. Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 213–238. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4)
- Lizama, E., Gómez, J., & Torres, R. (2025). Role of mountain glaciers in the hydrological dynamics of headwater basins in the Wet Andes. *Journal of Hydrology*, 630(4), 112–128. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.131234>
- Mackay, J. D., Barrand, N. E., Hannah, D. M., Potter, E., Montoya, N., & Buytaert, W. (2025). Physically based modelling of glacier evolution under climate change in the tropical Andes. *The Cryosphere*, 19, 685–712. <https://doi.org/10.5194/tc-19-685-2025>
- Micijevic, E., Haque, M. O., & Mishra, N. (2016). Radiometric calibration updates to the Landsat collection. *SPIE Proceedings*, 9972, 99720D. <https://doi.org/10.1117/12.2239426>
- Mishra, N., Haque, M. O., Leigh, L., Aaron, D., Helder, D., & Markham, B. (2014). Radiometric cross-calibration of Landsat 8 OLI and Landsat 7 ETM+. *Remote Sensing*, 6(12), 12619–12638. <https://doi.org/10.3390/rs61212619>
- Naegeli, K., et al. (2021). [Información del artículo].
- Rounce, D. R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., ... & McNabb, R. W. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science*, 379, 78–83. <https://doi.org/10.1126/science.abo1324>
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016. *The Cryosphere*, 13, 2537–2556. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>
- Shaw, J. K., McGraw, Z., Bruno, O., Storelmo, T., & Hofer, S. (2022). Using satellite observations to evaluate model microphysical representation of Arctic mixed-phase clouds. *Geophysical Research Letters*, 49(3), e2021GL096191. <https://doi.org/10.1029/2021GL096191>
- Shugar, D. H., et al. (2020). A massive rock and ice avalanche caused the 2019 disaster at

- Chamoli, Indian Himalaya. Science, 371(6530), 1119–1123.
<https://doi.org/10.1126/science.abh4455>
- Silva, V., et al. (2021). [Información del artículo].
- Subhanil Guha, S., Govil, H., Taloor, A. K., Gill, N., & Dey, A. (2022). Land surface temperature and spectral indices: A seasonal study of Raipur City. Geodesy and Geodynamics, 13(1), 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.05.002>
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 164, 152–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- Tedeschi, R. G., Cavalcanti, I. F. A., & Grimm, A. M. (2016). Influence of Central and East ENSO on precipitation and extreme events in South America. International Journal of Climatology, 36(15). <https://doi.org/10.1002/joc.4670>
- Ulloa, G. (2020). Evolución temporal de albedo en función de la variabilidad climática en glaciares de los Andes semiáridos. Universidad de Chile. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/173930/cf-ulloa_gp.pdf
- Veettil, B. K., & Kamp, U. (2019). Global disappearance of tropical mountain glaciers: Observations, causes and challenges. Geosciences, 9(5), 196. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>
- Vera Silva, et al. (2023). Pesticide residues... Environment International, 181, 108280. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108280>
- Wangmo, C., Lhaden, N., Yangden, P. S., & Pasang, S. (2025). Glacier and glacial lake dynamics in the Mo Chu Catchment, Bhutan (1992–2022). Journal of Applied Engineering, Technology and Management, 5(1), 62–75. <https://doi.org/10.54417/jaetm.v5i1.149>
- Wood, J. L., Harrison, S., Wilson, R., et al. (2021). Contemporary glacial lakes in the Peruvian Andes. Global and Planetary Change, 204, 103574. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103574>
- Wu, X., Zhang, X., Wang, N., & Cen, Y. (2019). Joint sparse and low-rank multi-task learning with extended multi-attribute profile for hyperspectral target detection. Remote Sensing, 11(2), 150. <https://doi.org/10.3390/rs11020150>
- Xue, Z., Zhao, L., Wang, J., Zheng, H., Yan, J., Jin, R., & Ren, P. (2021). Empirical models on urban surface emissivity retrieval based on different spectral response functions. Building and Environment, 197, 107882. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107882>
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., et al. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise (1961–2016). Nature, 568, 382–386. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>

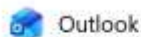
ANEXOS

Anexo 1.

Evidencia de sumision del articulo

11/2/26, 9:26 a.m.

Correo: EVO ALEJANDRO ELOY LARICO FLORES - Outlook



[IIGG] Acuse de recibo del envío

Desde Jorge Olcina <investigacionesgeograficas@ua.es>

Fecha Mar 09/12/2025 19:27

Para EVO ALEJANDRO ELOY LARICO FLORES <evo.larico@upeu.edu.pe>; abnerm <abnerm@upeu.edu.pe>; Loayda Condori <loayda.ct@upeu.edu.pe>

Hola,

Evo Alejandro Eloy Larico Flores ha enviado el manuscrito "El Análisis Multitemporal del albedo y retroceso glaciar bajo escenarios de cambio climático en la Cordillera Apolobamba" a Investigaciones Geográficas.

Si tiene cualquier pregunta no dude en ponerse en contacto con la revista a través del email investigacionesgeograficas@ua.es.

Gracias por elegir esta revista como medio para difundir su investigación.

Jorge Olcina

Investigaciones Geográficas
www.investigacionesgeograficas.com

https://outlook.office.com/mail/0/inbox/id/AAQkADN1YVWVhZDE1LWM3NWY1NDk1Ny05ZT11LTcwOGI2MjQ2NGZkHQQAITE6uAEGGxDMgD1sb... 1/1

Anexo 2.

Copia de resolución de inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo aprobado por el consejo de facultad correspondiente



"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

RESOLUCIÓN N° 1232-2024/UPeU-FLA-CF-T

Lima, Naña 17 de diciembre de 2024

VISTO:

El expediente de **Evo Alejandro Eloy Larico Flores**, identificado(a) con Código Universitario N° 202012661 y **Abner Mendoza Llacho** identificado(a) con Código Universitario N° 200611480, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Evo Alejandro Eloy Larico Flores** y **Abner Mendoza Llacho**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Análisis Multitemporal del albedo y retroceso glaciar bajo escenarios de cambio climático en la Cordillera Apolobamba" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 17 de diciembre de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Análisis Multitemporal del albedo y retroceso glaciar bajo escenarios de cambio climático en la Cordillera Apolobamba" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a la **Ing. Loayda Abigail Condori Turpo** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por el **MSc. Miguel Angel Salcedo Enriquez** y el **Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Erika Inés Acuña Salinas

Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA

cc:
-Intermedio
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo



Ph.D. Silvia Pilco Quesada

Ph.D. Silvia Pilco Quesada
SECRETARIA ACADÉMICA

Anexo 3.

Panel fotográfico de la ejecución del proyecto de investigación

