



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

**“EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DE LA
DINÁMICA GLACIAR EN LOS NEVADOS DE
HUAYLAS Y YUNGAY, ÁNCASH, UTILIZANDO
TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN (1990-2024)”**

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniera Ambiental

Autor:

Medalith Estefany Gamero Barrios

Asesor:

Mg. Ing. Walter Manuel Hoyos Alayo

<https://orcid.org/0000-0002-8683-1635>

Lima - Perú

2025

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	MAGDA ROSA VELASQUEZ MARIN
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	IRMA GERALDA HORNA HERNANDEZ
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	WALTER MANUEL HOYOS ALAYO
	Nombre y Apellidos

Informe de Similitud



4% 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 10 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  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.

Dedicatoria

A mi familia, mis padres Nancy y Cesar, y mi hermano Aarom, por todo el amor y sacrificio que han forjado en mi para ser la persona que soy ahora y la gran profesional que seré. Por ser mi fuerza cuando más lo necesite, en cada dolor y esperanza. Esta victoria no solo es mía, es nuestra.

Agradecimiento

Agradezco a Dios y sobre todo a mi familia, ya que sin ellos no podría estar aquí
hoy presentando un gran paso para mi carrera profesional.

A mis docentes, que me forjaron gracias a sus conocimientos y sabiduría.

A mi asesor, Walter Hoyos Alayo, por ser una pieza clave, su orientación
paciencia y apoyo fueron fundamentales en este proceso.

Tabla de contenidos

Índice de tablas	9
Índice de Figuras.....	10
Resumen.....	11
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	12
1.1. Realidad problemática.....	12
1.2. Antecedentes	15
1.3. Marco Teórico	19
1.3.1. Glaciares de Montaña	19
1.3.2. Retroceso Glaciar.....	19
1.3.3. Formación de Lagunas Glaciares.....	20
1.3.4. Teledetección	20
1.3.5. Teledetección de Glaciares y Lagunas mediante LANDSAT	21
1.3.6. Índices NDSI y NDWI.....	21
1.4. Justificación.....	22
1.5. Formulación del problema	24
1.6. Objetivos	24
1.7. Hipótesis.....	25
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	27
2.1. Población y Muestra.....	28
2.2. Tipo de Investigación	29

2.3.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	29
2.4.	Análisis de datos	30
2.5.	Procedimientos	31
2.5.1.	Determinar la variación temporal y espacial del retroceso glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, utilizando el índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI).	31
2.5.2.	Evaluar los cambios temporales y la formación de las lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar entre 1990 y 2024, , utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI)....	33
2.5.3.	Determinar los escenarios futuros del retroceso glaciar y de la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar, en los nevados de Huaylas y Yungay para los años 2030, 2035 y 2040, mediante el análisis de tendencias actuales.....	34
2.5.4.	Identificar las Zonas Vulnerables a la deglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay mediante la aplicación del modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico).....	35
2.6.	Validez y Confiabilidad de la Información	35
CAPÍTULO III: RESULTADOS		38
3.1.	Determinación de la variación temporal y espacial del retroceso glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, utilizando el índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI).....	38
3.2.	Evaluación de los cambios temporales y la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar entre 1990 y 2024, utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI).....	43
3.3.	Determinación de escenarios futuros de retroceso glacial y de la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar, en los	

nevados de Huaylas y Yungay para los años 2030, 2035 y 2040, mediante el análisis de tendencias actuales.	47
3.4. Identificación de las zonas vulnerables a la deglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay mediante la aplicación del modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico).	51
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	53
REFERENCIAS	68
ANEXOS	88

Índice de tablas

Tabla 1 Resultado de cobertura glaciaria expresada en km ² , durante 1990-2024	38
Tabla 2 Superficie de lagunas glaciares expresada en km ² , durante 1990-2024	43
Tabla 3 Análisis del modelo de regresión lineal.....	48
Tabla 4 Coeficientes del modelo de regresión lineal.....	48
Tabla 5 Análisis del modelo de regresión lineal.....	49
Tabla 6 Coeficientes del modelo de regresión lineal.....	50
Tabla 7 Datos de las misiones Landsat 5 y 8 OLI	91
Tabla 8 Imágenes Landsat consideradas en el estudio	91

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de Ubicación de los nevados de Huaylas y Yungay	29
Figura 2 Flujograma de los Procedimientos	37
Figura 3 Comportamiento de la cobertura glaciar 1990-2024.....	40
Figura 4 Comportamiento de la cobertura glaciar 1990-2024.....	42
Figura 5 Comportamiento de la superficie lagunar 1990-2024.....	45
Figura 6 Comportamiento temporal de lagunas glaciares 1990-2024.....	46
Figura 7 Zonas vulnerables de deglaciación.....	52

Resumen

El retroceso glaciar en la Cordillera Blanca, Perú, es un fenómeno creciente que afecta directamente la estabilidad de los glaciares y las comunidades cercanas. El presente estudio tiene como objetivo analizar el retroceso glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, y evaluar el peligro de inundación de las lagunas glaciares formadas por este proceso. Para ello, se emplearon imágenes satelitales y el uso de índices de diferencia normalizada de nieve (NDSI) y agua (NDWI), junto con el modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico) para identificar las zonas más vulnerables. Los resultados revelaron una reducción del 40% en la superficie glaciar, pasando de 247 km² en 1990 a 148 km² en 2024, mientras que la superficie de las lagunas glaciares aumentó en un 25.3%, de 8.3 km² a 10.4 km². Las proyecciones indican una pérdida continua de glaciar, con estimaciones de una superficie glaciar de 120 km² para 2040. Además, se identificaron zonas críticas de deglaciación en las pendientes sur y suroeste de los nevados, asociadas a un mayor riesgo de desbordes. Este estudio subraya la necesidad urgente de implementar estrategias de manejo de riesgos y sistemas de alerta temprana para mitigar los impactos de posibles inundaciones en las comunidades cercanas.

Palabras Claves

Teledetección, NDSI, NDWI, Cobertura Glaciar, Zonas vulnerables.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

A nivel mundial, los glaciares de alta montaña están experimentando un retroceso sin precedentes, impulsado principalmente por el cambio climático. Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021), los glaciares en todo el mundo han perdido aproximadamente el 50% de su masa desde el siglo XIX, con una tasa acelerada de pérdida en las últimas décadas. Además, este fenómeno global está íntimamente relacionado con el aumento de la temperatura media global, que ha superado en promedio los 1.1 °C desde finales del siglo XIX (IPCC, 2021). Asimismo, los glaciares tropicales, como los de la región andina, son particularmente vulnerables a este proceso debido a las condiciones climáticas más cálidas y las fluctuaciones estacionales extremas (Bolch et al., 2019; Huggel et al., 2020).

En América Latina, los glaciares tropicales, especialmente en los Andes, han sido gravemente afectados por el calentamiento global. De hecho, en los últimos 50 años, la superficie glaciar en los Andes se ha reducido en un promedio del 40%, y algunos glaciares han perdido más del 60% de su masa (Rabatel et al., 2018). En particular, Perú, que alberga la mayor superficie glaciar de Sudamérica, ha visto una reducción significativa de sus glaciares, perdiendo más de la mitad de su masa glaciar en las últimas seis décadas (Huggel et al., 2020). Entre 1962 y 2016, la superficie glaciar de Perú pasó de 2,041 km² a 1,050 km² (INAIGEM, 2023). Este retroceso ha tenido un impacto directo en la disponibilidad de agua para millones de personas en áreas de alta montaña, donde las poblaciones dependen del deshielo glaciar como fuente de agua potable y para la agricultura (Vilímek et al., 2017; Zemp et al., 2019).

La región de Áncash, en particular, es una de las más afectadas por el retroceso glaciar, especialmente en la Cordillera Blanca. Este sistema montañoso ha experimentado una pérdida acelerada de glaciares, lo que ha dado lugar a la formación de nuevas lagunas glaciares y la expansión de las existentes (Carey et al., 2021). La formación de estas lagunas ha incrementado significativamente el riesgo de desbordamiento (glacial lake outburst floods, GLOFs), fenómenos que ocurren cuando las lagunas formadas por el deshielo glaciar superan la capacidad de sus diques morrenicos y provocan inundaciones repentinas que afectan a las comunidades aguas abajo (Huggel et al., 2020). Según el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM, 2023), las lagunas en la Cordillera Blanca, particularmente en los nevados de Huaylas y Yungay, son de alto riesgo debido a su proximidad a poblaciones y a la inestabilidad de los diques glaciales.

El monitoreo de estos procesos es esencial para la gestión de riesgos, y la teledetección ha demostrado ser una herramienta clave para evaluar los cambios en los glaciares y lagunas de alta montaña. Utilizando imágenes satelitales, es posible realizar un análisis multitemporal de la evolución glaciar y lagunar, lo que permite detectar variaciones en el área glaciar y la expansión de las lagunas (Bolch et al., 2019; Cook et al., 2020). La teledetección es particularmente útil para obtener datos en regiones remotas y de difícil acceso, como las zonas de los nevados de Huaylas y Yungay, donde los datos in situ son limitados (Shugar et al., 2021).

En el caso de la Cordillera Blanca, los estudios han documentado un incremento en la superficie de las lagunas glaciales a medida que los glaciares retroceden. Según un estudio realizado en la Cordillera del Vilcabamba, en Cusco, el número de lagunas ha aumentado un 2.31% anual entre 1991 y 2014, lo que ha incrementado el riesgo de

inundaciones por GLOFs (Guardamino, 2014). De manera similar, en la Cordillera Blanca se han formado nuevas lagunas como resultado del retroceso glaciar, muchas de las cuales se encuentran cerca de centros poblados, lo que agrava la vulnerabilidad de las comunidades locales (Vilímek et al., 2017).

Este retroceso glaciar y la formación de lagunas en los nevados de Huaylas y Yungay no solo incrementan el riesgo de desbordes, sino que también alteran los patrones hidrológicos, afectando las fuentes de agua utilizadas por las comunidades circundantes. El monitoreo multitemporal a través de técnicas de teledetección, como el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) y el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI), ha permitido identificar áreas glaciales y lagunares de forma precisa y sistemática (Cook et al., 2020). Estas técnicas se utilizarán en la presente tesis para analizar los cambios en la dinámica glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, proporcionando datos esenciales para la planificación y gestión del riesgo (Shugar et al., 2021).

En este contexto, esta tesis busca realizar una evaluación detallada de la dinámica glaciar de los nevados de Huaylas y Yungay, utilizando imágenes satelitales Landsat y técnicas avanzadas de teledetección. Se analizarán los cambios en el área glaciar, la expansión de las lagunas y la identificación de aquellas con mayor riesgo de desbordamiento, contribuyendo a una mejor comprensión de los procesos de retroceso glaciar y sus impactos en las comunidades locales. Este análisis multitemporal permitirá generar información crucial para la implementación de medidas preventivas frente a los riesgos de GLOFs, mejorando la resiliencia de las poblaciones afectadas por el cambio climático (Zemp et al., 2019; Bolch et al., 2019).

1.2. Antecedentes

INAIGEM (2023) - El objetivo de este informe fue identificar y catalogar los glaciares y lagunas en Perú mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución. Para ello, la metodología se centró en un análisis multitemporal de imágenes Landsat, abarcando el período de 1990 a 2020, con el fin de detectar cambios en la cobertura glaciar. Como resultado, se evidenció una significativa reducción del 56% en la superficie glaciar del país durante dicho lapso, acompañada de un incremento en la formación de nuevas lagunas. Por consiguiente, la conclusión principal del informe es que la teledetección ha demostrado ser una herramienta crucial para el monitoreo de las variaciones glaciales, lo cual subraya la necesidad de intensificar los esfuerzos de conservación.

Gobierno Regional de Áncash (2022) - El principal objetivo fue evaluar el retroceso glaciar y las transformaciones en las lagunas de la Cordillera Blanca, ubicada en la región de Áncash. Para lograrlo, en esta investigación, la metodología empleada consistió en un análisis geoespacial detallado, utilizando imágenes satelitales Landsat correspondientes al periodo entre 1990 y 2021. Los resultados obtenidos revelaron una significativa reducción del 45% de la superficie glaciar durante los últimos treinta años, al tiempo que el número de lagunas experimentó un incremento del 20%. Por ende, la conclusión principal es que este retroceso glaciar está impactando el equilibrio hídrico regional, manifestándose en un aumento de volumen de agua almacenada en las lagunas y afectando directamente la disponibilidad de recursos hídricos en la zona.

Carey et al. (2021) - Si bien el estudio consideró los GLOFs, el objetivo fundamental fue analizar la evolución de la cobertura glaciar y la formación de lagunas

glaciares en la región andina, atribuible al cambio climático. Con este fin, la metodología aplicada se basó en el uso de imágenes satelitales Landsat, complementado con la modelización de series temporales, para examinar las variaciones en la cobertura glaciar entre 1980 y 2020. Los resultados obtenidos revelaron una disminución de 50% en la superficie glaciar de los Andes Tropicales, a la par de un notable crecimiento en el número de lagunas en la región. Por lo tanto, la conclusión principal es que la expansión de estas lagunas constituye un fenómeno directamente ligado al acelerado retroceso glaciar provocado por el cambio climático.

Zhang et al. (2021) - La evaluación de la transformación de la cobertura glaciar en el Himalaya, a través de la teledetección, constituyó el objetivo central de ese estudio. Para cumplir con esta finalidad, la metodología se llevó a cabo utilizando imágenes satelitales Landsat y MODIS, las cuales cubrieron el periodo de 2000 a 2020, permitiendo así un análisis preciso de las variaciones en la superficie glaciar. En cuanto a los resultados, se detectó una reducción del 15% de la cobertura glaciar dentro de las zonas más afectadas del Himalaya; así mismo, se constató una expansión del 20% en las lagunas glaciares. Por todo lo anterior, la conclusión es que la teledetección se revela como una herramienta indispensable para el monitoreo efectivo de los cambios en glaciares y lagunas, especialmente relevante en regiones remotas y de difícil acceso.

Shugar et al. (2021) - El presente estudio tuvo como objetivo fundamental comprender la evolución de la cobertura glacial y de las lagunas glaciares en la cordillera blanca. Para ello, la metodología se basó en un análisis multitemporal exhaustivo, utilizando imágenes satelitales Landsat y MODIS, recolectadas entre el 2000 y 2020. Los resultados obtenidos evidenciaron una reducción del 45% en la superficie glaciar de la Cordillera Blanca durante este lapso; además, se observó un aumento significativo en el

número y tamaño de las lagunas glaciares. Por consiguiente, se concluyó que el cambio climático ha acelerado el retroceso glaciar y la expansión de las lagunas, lo que subraya la necesidad de un monitoreo continuo mediante teledetección para evaluar la dinámica glaciar en la región.

INAIGEM (2021) - El presente trabajo de investigación se dedicó a la actualización del monitoreo de la dinámica glaciar y las lagunas en la Cordillera Blanca, un proceso que se facilitó mediante el uso de imágenes satelitales Landsat y diversas técnicas de teledetección. Para llevar a cabo este objetivo, la metodología empleada consistió en el análisis exhaustivo de dichas imágenes, específicamente las capturadas entre los años 2000 y 2020. En cuanto a los resultados obtenidos, se constató una reducción del 40% de la superficie glaciar de la zona durante este período; de igual forma, se registró un incremento del 15% en el número de lagunas. Por lo tanto, la conclusión es que el monitoreo continuo a través de la teledetección es indispensable para comprender a cabalidad las dinámicas glaciares y sus impactos sobre los recursos hídricos de la región.

Huggel et al. (2020) - La comprensión de los impactos de cambio climático en los glaciares y las fuentes de agua en zonas de montaña fue el objetivo principal de este informe, el cual se abordó mediante el uso de imágenes satelitales y datos climáticos históricos. Para tal fin, la metodología empleada incluyó un exhaustivo análisis multitemporal de imágenes Landsat, abarcado el período de 1980 hasta 2019. Los resultados obtenidos revelaron una pérdida promedio de superficie glaciar del 50% en diversas regiones andinas, entre ellas la Cordillera Blanca en Perú. Por consiguiente, el estudio concluyó que el retroceso glaciar está alterando significativamente las fuentes de agua y propiciando la creación de nuevas lagunas, lo cual hace imperativo un monitoreo mejorado de estos cambios glaciares mediante teledetección.

Bolch et al. (2019) - La evaluación del estado de los glaciares es en la región andina y la determinación de su tasa de retroceso en las últimas décadas constituyeron el objetivo central de esta investigación. Para lograrlo, la metodología empleada fue un análisis multitemporal, sustentado en imágenes satelitales Landsat y datos de sensores remotos. Como resultados, se evidenció que entre 1992 y 2015 la superficie glaciar en los Andes se redujo en un 40%. En particular, se observó que los glaciares tropicales de las regiones más bajas, tales como los de Perú y Ecuador, experimentaron una pérdida del 60% de su masa. Por consiguiente, se concluyó que los glaciares andinos continúan retrocediendo a un ritmo acelerado, un fenómeno que afecta directamente la disponibilidad de agua y propicia la información de nuevas lagunas.

Rabatel et al. (2018) - Abordando la evaluación de las tendencias de retroceso glaciar en la región andina del Perú, desde 1960 hasta 2016, este estudio se fijó como su objetivo fundamental. Para lograrlo, la metodología empleada consistió en un análisis multitemporal, sustentado en imágenes satelitales Landsat y datos meteorológicos históricos. En cuanto a los resultados obtenidos, se indicó que la superficie glaciar en el Perú se redujo un 56% entre 1962 y 2020, presentando una tasa de retroceso anual aproximado del 1.3%. En particular, los glaciares de la Cordillera Blanca en Áncash, han experimentado una reducción superior al 60%. Por tanto, la conclusión es que el retroceso glaciar está alterando significativamente las fuentes de agua en la región, lo cual afecta gravemente la población que depende del deshielo.

Vilímek et al. (2017) - La evaluación de los cambios en la cobertura glaciar y la formación de lagunas glaciares en la región Andina del Perú con especial énfasis en la Cordillera Blanca, constituyó el objetivo fundamental de este informe. Para llevarlo a cabo, la metodología se basó en un análisis multitemporal de imágenes satelitales

Landsat, lo cual permitió identificar las variaciones en la superficie glaciar entre 1985 y 2015. Los resultados obtenidos evidenciaron una reducción del 50% en la superficie glaciar y, además, un incremento significativo tanto en el número como en el tamaño de las lagunas, particularmente acentuado en los últimos 20 años. Por lo cual, la conclusión es que el cambio climático ha acelerado la formación de lagunas glaciares lo que hace indispensable un monitoreo constante mediante el uso de tecnologías de teledetección.

1.3. Marco Teórico

1.3.1. Glaciares de Montaña

Los glaciares de montaña son masas de hielo formadas en zonas de alta montaña debido a la acumulación y compactación de nieve a lo largo del tiempo y se clasifican en varios tipos según su localización y características específicas, como los glaciares de valle, los de circo, y los de montaña tropicales entre otros (Cogley et al., 2017) Estos glaciares fluyen lentamente pendiente abajo moldeando el paisaje a través de procesos de erosión y deposición y su dinámica está determinada tanto por factores climáticos como por la geología de la región (Frey et al., 2018) Los glaciares de montaña tropicales como los ubicados en los Andes peruanos existen a elevadas altitudes en latitudes tropicales, donde la temperatura permite la acumulación de nieve y la formación de hielo a pesar de estar ubicados en zonas cálidas y mantienen condiciones glaciales debido a la altitud (Rabatel et al., 2018; Schauwecker et al., 2017).

1.3.2. Retroceso Glaciar

Causas y Consecuencias: El retroceso glaciar es la disminución sostenida en extensión y volumen de los glaciares un fenómeno acelerado por el cambio climático (Shugar et al., 2021) Las principales causas de este retroceso incluyen el aumento de

temperaturas globales debido al incremento de gases de efecto invernadero así como la variabilidad climática natural que puede intensificar el derretimiento en ciertas estaciones o eventos como El Niño (IPCC, 2019; Huggel et al., 2020) Entre las consecuencias del retroceso glaciar se encuentra el aumento del nivel del mar que contribuye a la inundación de áreas costeras y el riesgo de escasez de agua en regiones dependientes del deshielo glaciar para el suministro hídrico afectando tanto la agricultura como la generación de energía hidroeléctrica (Vuille et al., 2018; Frey et al., 2020) A nivel ecosistémico la pérdida de glaciares altera los hábitats de especies adaptadas a condiciones frías afectando la biodiversidad y la estructura ecológica de las montañas (Haeberli & Whiteman, 2015).

1.3.3. Formación de Lagunas Glaciares

Las lagunas glaciares se forman cuando el agua de deshielo se acumula en depresiones creadas por la actividad glaciar (Carrivick & Tweed, 2016) Estas depresiones pueden originarse a partir de morrenas terminales que son acumulaciones de sedimentos transportados por el glaciar que actúan como diques naturales reteniendo el agua de deshielo o bien por depresiones excavadas directamente por el glaciar que luego se llenan de agua al retroceder (Cook et al., 2018) La estabilidad de estas lagunas depende de factores como la estructura y composición de las morrenas que las contienen así como la pendiente del terreno y el volumen de agua que acumulan factores que incrementan el riesgo de desbordamiento en lagunas ubicadas en pendientes pronunciadas o en retroceso acelerado (Emmer et al., 2018).

1.3.4. Teledetección

La teledetección es una técnica que permite obtener información de la superficie terrestre mediante sensores remotos como satélites o drones sin contacto directo con el

área de estudio y su uso es clave en el monitoreo ambiental por su capacidad de proporcionar datos actualizados y de amplia cobertura espacial (Bolch et al., 2019) Mediante el uso de satélites es posible monitorear cambios en la superficie glaciar observar la expansión o contracción de lagunas y detectar posibles riesgos de desbordes (Huggel et al., 2020).

1.3.5. Teledetección de Glaciares y Lagunas mediante LANDSAT

Los satélites LANDSAT operados por la NASA han sido fundamentales en el monitoreo de glaciares y lagunas glaciares permitiendo el uso de sensores multispectrales que capturan imágenes en diferentes bandas del espectro electromagnético y que permiten observar variaciones en el volumen y extensión de glaciares y lagunas a lo largo del tiempo (Wang et al., 2018) Los sensores de LANDSAT permiten analizar la reflectancia espectral de hielo y agua ayudando a identificar características específicas de estas superficies (Zhang et al., 2015).

1.3.6. Índices NDSI y NDWI

En teledetección los índices como el NDSI (Normalized Difference Snow Index) y el NDWI (Normalized Difference Water Index) son herramientas clave para identificar y diferenciar superficies de nieve hielo y agua El NDSI se utiliza para detectar áreas cubiertas por nieve y hielo mientras que el NDWI permite identificar cuerpos de agua en áreas glaciales (Racoviteanu et al., 2021) Estos índices son ampliamente utilizados en estudios de monitoreo de glaciares y lagunas para analizar cambios en su extensión y estabilidad (Shea et al., 2021).

1.4. Justificación

Bajo el enfoque social, la pérdida de superficie glaciar en Huaylas y Yungay alcanza 40% entre 1990 y 2024, de 247 km² a 148 km². El aumento de la superficie lagunar llega a 25.3%, de 8.3 km² a 10.4 km². Estos cambios elevan el riesgo de desbordes y afectan el acceso al agua para consumo y agricultura; a su vez, el estudio entrega evidencia para definir zonas de peligro, priorizar barrios y centros poblados expuestos y diseñar planes de alerta temprana con roles claros para autoridades locales y comités comunales; así se reduce la vulnerabilidad social y se mejora la preparación comunitaria frente a GLOFs y estiajes (Dai et al., 2025; Dandabathula et al., 2025; Xingran et al., 2025).

Desde la perspectiva ambiental, la deglaciación altera la regulación hídrica de cabecera de cuenca, modifica caudales base y presión sobre bofedales y humedales altoandinos. La evaluación multitemporal con NDSI y NDWI permite medir tendencias de pérdida de hielo y expansión lagunar y ubicar focos críticos por orientación y altitud; con esta base se priorizan acciones de conservación de ecosistemas frágiles, restauración de zonas de recarga y control de usos en fajas ribereñas, con metas verificables por unidad hidrográfica (Awati et al., 2025; Mohanty et al., 2025; Yang et al., 2025).

Visto desde el enfoque económico, los desbordes y aluviones dañan carreteras, canales, bocatomas, redes eléctricas y viviendas. La identificación de zonas de alto riesgo y la proyección a 2030, 2035 y 2040 orientan inversiones costo-efectivas en protección de lagunas, reforzamiento de diques morrénicos, reubicación de infraestructuras y mantenimiento preventivo; por lo cual, decidir dónde actuar primero reduce pérdidas directas y evita interrupciones de riego y energía que encarecen la producción local (Dai

et al., 2025; Xu et al., 2025; Zhang et al., 2025).

En términos metodológicos, el diseño combina series Landsat 5 y 8, selección en temporada seca, índices NDSI y NDWI, correcciones por sombras, ModelBuilder en ArcGIS para reproducibilidad, y regresión lineal para proyecciones. Integra un análisis multicriterio AHP con factores físicos y climáticos para mapear vulnerabilidad; este encadenamiento asegura trazabilidad de cada decisión analítica y facilita réplica por otras entidades técnicas (Awati et al., 2025; Mohanty et al., 2025; Qu et al., 2025).

Y bajo una justificación práctica, el estudio entrega productos aplicables de forma inmediata. Mapas de pérdida y ganancia de hielo. Inventario actualizado de lagunas y su evolución. Proyecciones de superficie glaciar y lagunar a 2030, 2035 y 2040. Mapa de zonas vulnerables con categorías operativas. Listado de sectores prioritarios para vigilancia, señalización, simulacros, obras de contención y control de ocupación en fajas marginales. Estos insumos se integran en planes de gestión del riesgo y de recursos hídricos regionales (Gilany et al., 2021; Kumar et al., 2025; Tewari & Misra, 2019).

Finalmente, visto desde enfoque teórico, la tesis aporta evidencia para glaciares tropicales sobre tasas de cambio, fragmentación interna de mantos, relación altitud-orientación y acoplamiento glaciar-lagunar en tres décadas. Vincula métricas espectrales con procesos geomorfológicos y propone un esquema de evaluación reproducible para otras cuencas andinas. Contribuye a lineamientos de monitoreo que conectan indicadores satelitales con parámetros de riesgo hidrometeorológico (Guillet et al., 2025; Kaidel et al., 2025; Martins et al., 2025).

1.5. Formulación del problema

Problema General

¿Cuáles son los cambios multitemporales en la dinámica glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay, Áncash, durante el período 1990-2024, evaluados mediante técnicas de teledetección?

Problemas Específicas

¿Cuál ha sido el retroceso glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024 según el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI)?

¿Cómo ha influido el derretimiento de los glaciares en la formación de lagunas glaciares en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, según el análisis con el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI)?

¿Cuáles son los escenarios futuros de retroceso glaciar y de la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar, en los nevados Huaylas y Yungay para los años 2030, 2035 y 2040, basado en las tendencias actuales?

¿Cuáles son las zonas vulnerables a la deglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay identificadas mediante la aplicación del modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico)?

1.6. Objetivos

Objetivo General

Realizar una evaluación multitemporal de los cambios en la dinámica glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay, Áncash, mediante el uso de técnicas de teledetección en el período 1990-2024.

Objetivos Específicos

Determinar la variación temporal y espacial del retroceso glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, utilizando el índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI).

Evaluar los cambios temporales y la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar entre 1990 y 2024, utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI).

Determinar escenarios futuros de retroceso glaciar y de la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar, en los nevados Huaylas y Yungay para los años 2030, 2035 y 2040, mediante el análisis de tendencias actuales.

Identificar las zonas vulnerables a la desglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay mediante la aplicación del modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico).

1.7. Hipótesis

Hipótesis General

El análisis multitemporal mediante técnicas de teledetección permite identificar y evaluar de manera precisa los cambios en la dinámica glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay, Áncash, durante el período 1990-2024.

Hipótesis Específicas

El Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) permite determinar con precisión el retroceso glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024.

Se espera que el derretimiento glaciar haya generado una formación significativa de lagunas glaciares en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, lo que se puede identificar a través del análisis con el índice NDWI.

Es posible proyectar escenarios futuros de retroceso glaciar y de la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar, en los nevados para los años 2030, 2035 y 2040, siguiendo las tendencias actuales observadas entre 1990 y 2024.

El modelo AHP permite identificar las zonas más vulnerables a la deglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

La investigación se clasifica como descriptiva y predictiva. La componente descriptiva se enfoca en analizar la variación temporal y espacial del retroceso glaciar y los cambios en las lagunas glaciares en los nevados de Huaylas y Yungay durante el período 1990-2024 (Hernández Sampieri et al., 2014). La componente predictiva utiliza modelos de regresión para proyectar el retroceso glaciar y los cambios en las lagunas glaciares hasta el año 2040, con el objetivo de comprender las tendencias futuras de la dinámica glaciar en la región (Hernández Sampieri et al., 2014).

El enfoque de la investigación es cuantitativo, ya que se basa en el análisis de datos numéricos obtenidos de imágenes satelitales mediante índices como el NDSI para evaluar el retroceso glaciar y el NDWI para analizar las lagunas glaciares (Hernández Sampieri et al., 2014). La cuantificación de la variación glaciar y los cambios en la superficie de las lagunas se realizará utilizando técnicas estadísticas, sistemas de información geográfica (GIS) y herramientas avanzadas de teledetección (Hernández Sampieri et al., 2014).

El alcance de la investigación es exploratorio. Es exploratorio porque busca identificar y describir los patrones de retroceso glaciar y los cambios en la superficie y número de las lagunas glaciares en los nevados de Huaylas y Yungay (Hernández Sampieri et al., 2014).

El diseño de la investigación es longitudinal y no experimental. Es longitudinal porque estudia los cambios ocurridos a lo largo de un extenso período, desde 1990 hasta 2024 para los análisis descriptivos y hasta 2040 para las proyecciones futuras (Hernández Sampieri et al., 2014). Es no experimental porque no se manipulan variables independientes; en su lugar, se observan y analizan datos históricos y proyectados sobre

el retroceso glaciar y la dinámica de las lagunas glaciares (Hernández Sampieri et al., 2014).

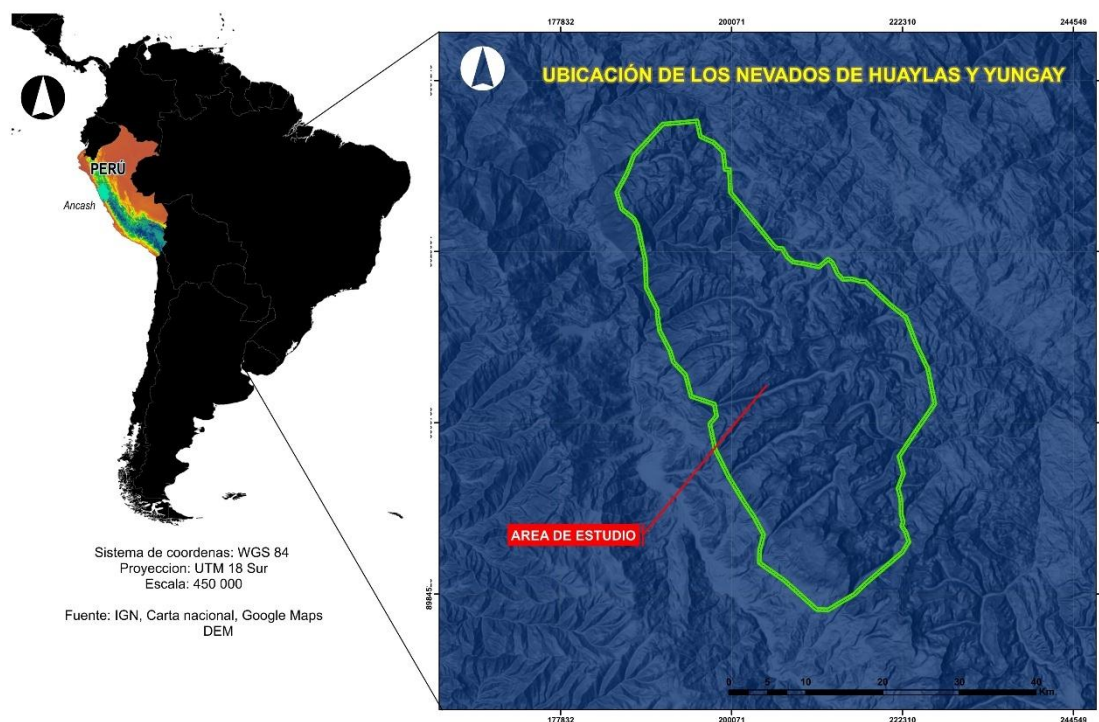
2.1. Población y Muestra

La población de estudio está compuesta por todos los glaciares y lagunas glaciares ubicados en los nevados de Huaylas y Yungay, pertenecientes a la Cordillera Blanca en la región de Áncash, Perú, durante el período 1990-2024. Esta región es de particular interés debido a los efectos visibles del cambio climático en el retroceso glaciar y la formación y expansión de lagunas glaciares. Se seleccionan cinco unidades glaciares, cuya observación es crucial para analizar y cuantificar los cambios en la cobertura glaciar y en las lagunas glaciares mediante un enfoque integral. Por esta razón, se empleará un enfoque de censo completo, que resulta adecuado para obtener una visión detallada y precisa de los cambios multitemporales en toda la zona estudio (Creswell, 2014).

Para el análisis, se utilizarán imágenes satelitales Landsat obtenidas a lo largo del período de estudio, seleccionando imágenes representativas cada dos años. Únicamente se incluirán las imágenes capturadas entre los meses de mayo a septiembre, correspondientes a la temporada seca en la región andina peruana, cuando la nubosidad es mínima. Esto asegurará la visibilidad completa del área de estudio, permitiendo una mayor precisión en la detección y cuantificación de los cambios en la superficie glaciar y en las lagunas glaciares (Sicard et al., 2016). Esta estrategia de selección es fundamental para evitar interferencias visuales causadas por condiciones meteorológicas adversas, maximizando la calidad de los datos obtenidos.

Figura 1

Mapa de Ubicación de los nevados de Huaylas y Yungay



2.2. Tipo de Investigación

La investigación propuesta adopta un enfoque cuantitativo no experimental, lo que implica una observación y recolección de datos sistemática y rigurosa. Este método permite analizar fenómenos en su entorno natural sin manipulación de variables, basándose en la obtención de información tal como se presenta. Así, se busca describir y analizar relaciones existentes, garantizando la validez ecológica de los hallazgos al reflejar condiciones reales.

2.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para la recolección de datos, se emplean técnicas de teledetección mediante imágenes satelitales de Landsat, que permiten analizar los cambios en la cobertura glaciar

y la evolución de las lagunas en los nevados de Huaylas y Yungay, Áncash, durante el período 1990-2024.

Los datos recolectados son almacenados y organizados en instrumentos específicos, tales como fichas de registro y archivos en Excel, los cuales facilitan la sistematización y el análisis de los datos numéricos de manera temporal. Estos registros incluyen variables clave como el área glaciar y las variaciones en la superficie y número de lagunas, proporcionando una base de datos estructurada que respalda el análisis de tendencias y proyecciones futuras en la dinámica glaciar y lagunar de la región.

2.4. Análisis de datos

Para el análisis de los datos en esta investigación, se emplearon herramientas como ArcGIS y los programas estadísticos SPSS y RStudio. Estos programas facilitaron la visualización y modelación de los datos recolectados, permitiendo realizar un análisis completo de la variación en la cobertura glaciar y la evolución de las lagunas en los nevados de Huaylas y Yungay. Se utilizaron gráficos lineales para representar la evolución temporal de estas variables, y mediante regresión lineal se modeló la relación entre el tiempo y la pérdida de la cobertura glaciar, proyectando su posible comportamiento futuro para los años 2030, 2035 y 2040. Estas proyecciones, basadas en datos históricos (1990-2024), permiten anticipar las tendencias de retroceso glaciar y los cambios en la superficie de las lagunas.

Para complementar el análisis y facilitar la interpretación geoespacial de los resultados, se elaboraron productos cartográficos que ilustran tanto las proyecciones de retroceso glaciar como los cambios esperados en las lagunas glaciares en el área de estudio.

2.5. Procedimientos

2.5.1. Determinar la variación temporal y espacial del retroceso glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, utilizando el índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI).

Para este objetivo, se emplearon imágenes satelitales Landsat de los años 1990 a 2024, procesadas mediante ArcGIS. Se aplicaron los índices NDSI (Índice de Diferencia Normalizada de la Nieve) para detectar áreas cubiertas por nieve y hielo, y NDWI (Índice de Diferencia Normalizada del Agua) para identificar cuerpos de agua glaciar. Se realizaron correcciones manuales debido a las sombras proyectadas por las montañas, utilizando combinaciones de bandas de falso color para obtener una representación más precisa del territorio y del retroceso glaciar.

Para el análisis de retroceso glaciar, se utilizaron un total de 17 imágenes satelitales, con un intervalo de dos años entre cada una, desde 1990 hasta 2024. Las imágenes seleccionadas fueron obtenidas durante los meses de junio, julio y agosto de cada año, ya que estos meses presentan condiciones óptimas para la observación, con baja presencia de nubes y mínima interferencia atmosférica. Esta estrategia garantiza que los datos sean comparables entre sí y permite obtener una visualización clara del retroceso glaciar, asegurando la fiabilidad y precisión de las proyecciones a futuro.

El procesamiento de estas imágenes se realizó utilizando ArcGIS. Para identificar la cobertura glaciar, se aplicó el índice NDSI (Normalized Difference Snow Index), el cual se calcula mediante la fórmula:

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

Donde:

Green: Corresponde a la banda del espectro visible que capta la luz verde.

SWIR (Shortwave Infrared): Corresponde a la banda del infrarrojo cercano o corta

Al igual que en el estudio del retroceso glaciar, se descargaron imágenes satelitales de Landsat 5 y Landsat 8/9. Para identificar las lagunas glaciares, se aplicó el índice NDWI (Normalized Difference Water Index), el cual se calcula de la siguiente manera:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Donde:

Green: Corresponde a la banda del espectro visible que capta la luz verde.

NIR: Corresponde a la banda del infrarrojo cercano.

Se utilizó la herramienta ModelBuilder de ArcGIS para agilizar los procesos temporales y automatizar los análisis espaciales en varias etapas, lo que permitió realizar cálculos de superficie glaciar de manera eficiente a lo largo de las diferentes fechas. Las superficies se determinaron en km², generando datos cuantificables del retroceso glaciar.

Adicionalmente, se crearon mapas cartográficos para ilustrar la cobertura glaciar en distintos períodos. Para identificar áreas de pérdida o ganancia de superficie glaciar, se aplicó la herramienta de diferencia simétrica, lo que permitió visualizar los cambios en la cobertura glaciar a través del tiempo.

2.5.2. Evaluar los cambios temporales y la formación de las lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar entre 1990 y 2024, utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI).

Para este análisis, se usaron imágenes Landsat procesadas con ArcGIS y se aplicó el índice NDWI para identificar y delimitar las lagunas glaciares. Se realizaron correcciones manuales en las imágenes para ajustar los efectos de sombras de las montañas que podrían generar falsas detecciones de cuerpos de agua. Las combinaciones de bandas de falso color fueron claves para mejorar la precisión en la identificación de las lagunas.

Se empleó también ModelBuilder para automatizar el análisis temporal y espacial de las lagunas glaciares, permitiendo generar cálculos de las superficies de las lagunas en km² para cada año analizado. Además, se crearon mapas cartográficos que representan la evolución de las lagunas glaciares en los nevados de la provincia de Huaylas y Yungay. Para evaluar las pérdidas o ganancias de superficie en las lagunas, se utilizó la herramienta de diferencia simétrica, lo que permitió visualizar los cambios en las dimensiones de las lagunas a lo largo del período de estudio.

Asimismo, se dio uso de la tasa de cambio superficial. La fórmula utilizada para calcular la tasa de cambio de la cobertura glaciar y de lagunas entre dos años consecutivos es la siguiente:

$$Tasa\ de\ cambio(\%) = \left(\left(\frac{B_3}{B_2} \right)^{\frac{1}{A_3 - A_2}} - 1 \right) \times 100$$

Donde B3 es la cobertura glaciar en el año más reciente, B2 es la cobertura glaciar en el año anterior, y A3 y A2 representan los años correspondientes. Esta fórmula calcula el porcentaje de cambio anual compuesto entre las dos mediciones, permitiendo obtener

una tasa de cambio que refleja cómo varió la superficie glaciar de un año a otro. Esta metodología es útil para medir las fluctuaciones anuales en la cobertura glaciar y es ampliamente empleada en estudios sobre la dinámica de los glaciares (Creswell, 2014).

2.5.3. Determinar los escenarios futuros del retroceso glaciar y de la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar, en los nevados de Huaylas y Yungay para los años 2030, 2035 y 2040, mediante el análisis de tendencias actuales.

La predicción del retroceso glaciar y de la formación de lagunas glaciares en los nevados de Huaylas y Yungay, se realizó mediante el método de regresión lineal, utilizando los softwares SPSS para un análisis más detallado. La elección de la regresión lineal se debe a su capacidad para modelar la relación entre variables a lo largo del tiempo, en este caso, el retroceso glaciar, tanto como, la formación de lagunas glaciares durante el período de 1990 a 2024. Este modelo es particularmente útil porque permite extrapolar los datos históricos y predecir el comportamiento futuro del retroceso glaciar y formación de lagunas glaciares, generando estimaciones para los años 2030, 2035 y 2040. El análisis de estas variables permitió ajustar las proyecciones en función de las tendencias climáticas, proporcionando una visión más precisa del comportamiento futuro de los glaciares.

Este proceso incluyó un análisis detallado de las tendencias observadas y la elaboración de proyecciones basadas en la pérdida de superficie glaciar y las formaciones de lagunas glaciares.

2.5.4. Identificar las Zonas Vulnerables a la deglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay mediante la aplicación del modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico).

Para el análisis de las zonas vulnerables a la deglaciación, se utilizó el modelo de Saaty mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el enfoque de análisis multicriterio, con el apoyo del software ArcGIS. Los factores condicionantes considerados en el modelo incluyeron la geomorfología, pendiente del terreno, red de drenaje (ríos), geología, temperatura, precipitación y la proximidad a glaciares. El principal factor desencadenante en este análisis es el proceso de deglaciación, que influye directamente en las transformaciones de la cobertura glaciar y en las lagunas asociadas.

Cada uno de estos factores fue ponderado utilizando el método jerárquico de Saaty (AHP), lo que permitió evaluar las zonas más afectadas por el retroceso glaciar en función de su influencia relativa. Para facilitar el proceso de ponderación y análisis espacial, se empleó la herramienta ModelBuilder en ArcGIS, generando mapas de vulnerabilidad que muestran las áreas con mayor susceptibilidad al cambio debido al retroceso glaciar. Estos mapas reflejan visualmente la interacción de los factores seleccionados y proporcionan una representación geoespacial de las zonas más propensas a experimentar transformaciones en la cobertura glaciar y en las lagunas de la región.

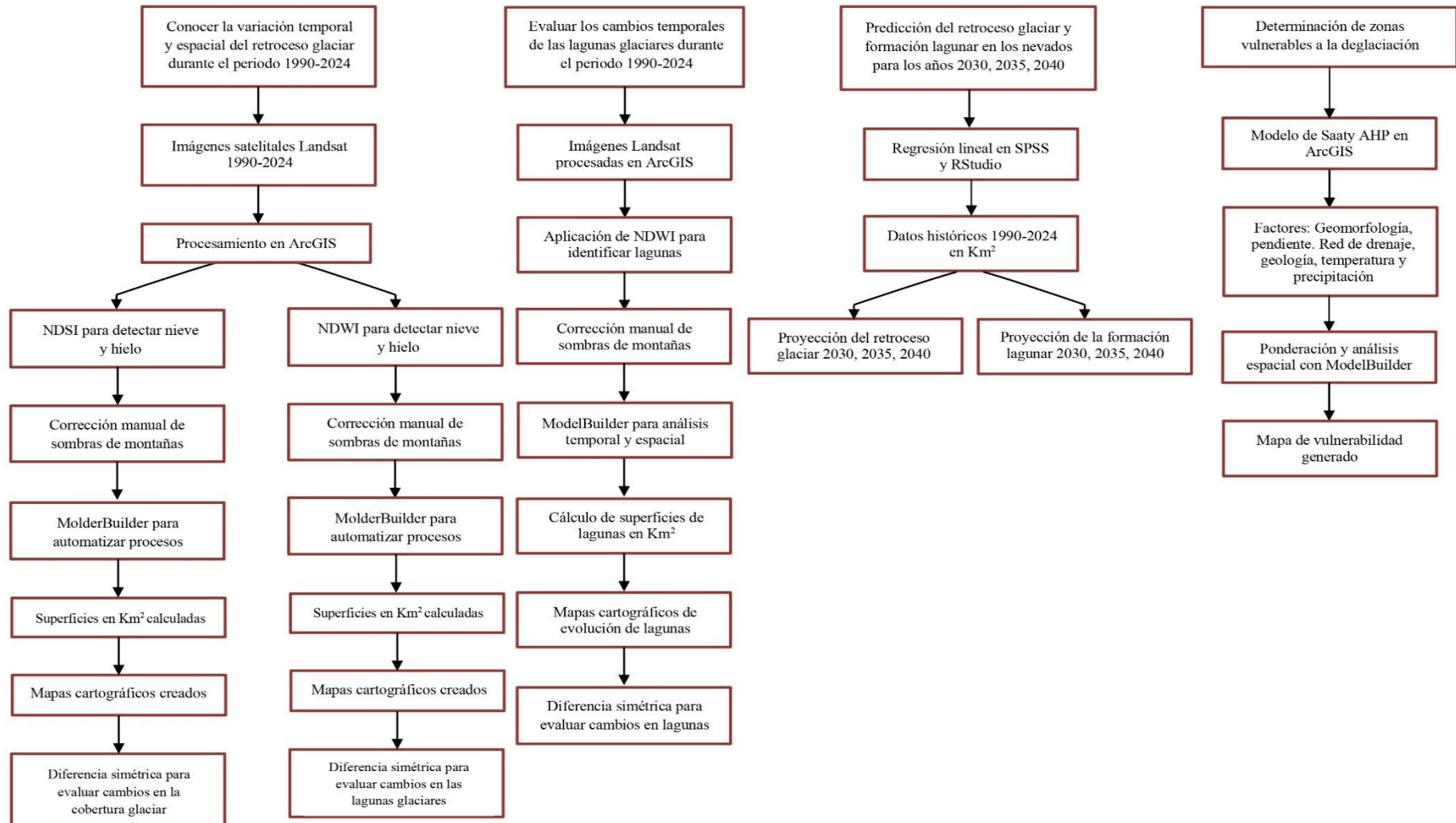
2.6. Validez y Confiabilidad de la Información

La validez de esta investigación está respaldada por el uso de técnicas de teledetección ampliamente aceptadas en estudios ambientales. Las imágenes satelitales Landsat, procesadas con ArcGIS, permitieron obtener datos precisos sobre la cobertura glaciar y la evolución de las lagunas glaciares. Además, las correcciones manuales aplicadas a las imágenes para evitar errores por sombras de montañas garantizan la

precisión en la delimitación de superficies glaciares y lagunares. La confiabilidad de los resultados se fortaleció mediante el uso de SPSS para el análisis estadístico, asegurando que las proyecciones de retroceso glaciar y cambios en las lagunas glaciares sean rigurosas y estadísticamente significativas. Asimismo, el uso del modelo Saaty para el análisis multicriterio siguió los principios de priorización jerárquica, lo que garantiza la fiabilidad de los mapas geoespaciales generados.

Figura 2

Flujograma de los Procedimientos



CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Determinación de la variación temporal y espacial del retroceso glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, utilizando el índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI).

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la superficie de la cobertura glaciar analizada durante el periodo de estudio. Los datos evidencian que la superficie glaciar ha estado en descenso continuo, con una tasa de cambio anual que varía entre un 0.1% y un 6% de pérdida en algunos años críticos. Sin embargo, también se observan años con tasas de incremento positivo, como en 1998 y 2002.

En cuanto a la superficie, se observa que la cobertura glaciar en 1990 era de 247 km², mientras que en 2024 se proyecta que se reduzca a 148 km², lo que representa una pérdida total de 74.25 km², equivalente a una reducción porcentual del 40.1% durante el periodo de estudio.

Tabla 1

Resultado de cobertura glaciar expresada en km², durante 1990-2024

Año	Superficie - Km²	Tasa de Cambio (%)
1990	247.018	-
1992	239.317	-1.57%
1994	227.391	-2.52%
1996	200.456	-6.11%
1998	214.947	3.55%

Evaluación multitemporal de la dinámica glaciaria en los nevados de Huaylas y Yungay, Áncash, utilizando técnicas de teledetección (1990-2024)

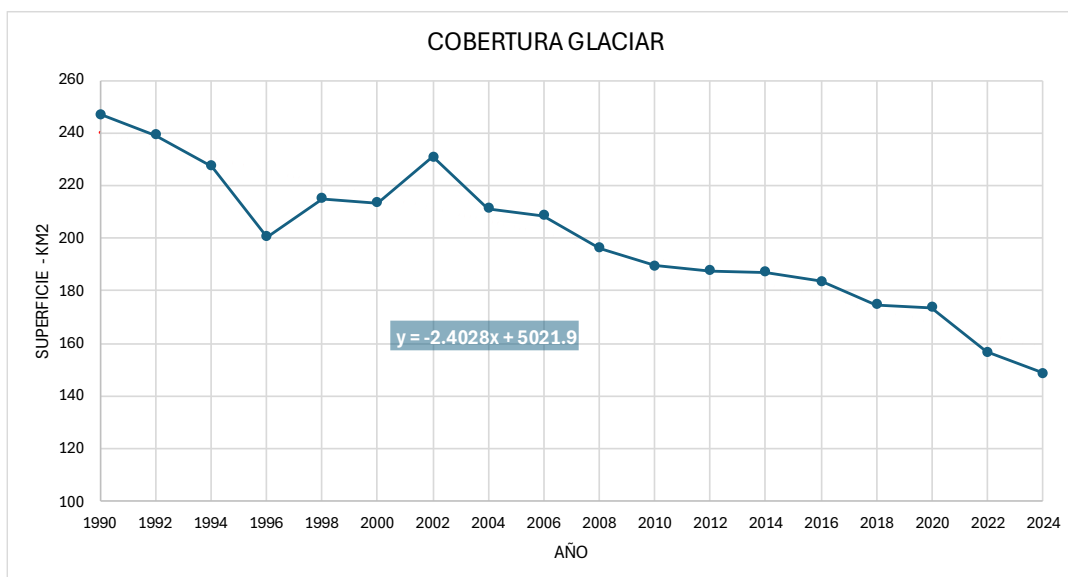
2000	213.323	-0.38%
2002	230.752	4.00%
2004	211.231	-4.32%
2006	208.512	-0.65%
2008	196.321	-2.97%
2010	189.430	-1.77%
2012	187.624	-0.48%
2014	186.993	-0.17%
2016	183.655	-0.90%
2018	174.756	-2.45%
2020	173.654	-0.32%
2022	156.565	-5.05%
2024	148.494	-2.61%

Nota. En la presente tabla mostramos el resultado de la cobertura glaciaria expresada en km², durante 1990-2024.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la cobertura glaciaria de todos los nevados de Huaylas y Yungay durante el período 1990-2024, expresado en kilómetros cuadrados (km²). Esta gráfica presenta una línea de puntos azules que representa la evolución de la cobertura glaciaria año tras año. La línea de tendencia (en color rojo punteado) sugiere una disminución de aproximadamente 2.4 km² por año.

Figura 3

Comportamiento de la cobertura glaciar 1990-2024



La Figura 4 presenta un conjunto de mapas que muestran la detección de cambio en la cobertura glaciar de los nevados de Huaylas y Yungay:

- Mapa Izquierdo Superior (1990-2010): Durante el periodo 1990-2010, se observa una pérdida periférica de los glaciares, la cual sigue un patrón altitudinal, comenzando en las partes más bajas y progresando hacia las partes más altas. Además de la pérdida periférica, se identifican pérdidas internas en los mantos glaciares, que aparecen como huecos dentro de las grandes masas de hielo. Las áreas de ganancia de glaciar (en verde) son mucho más reducidas y dispersas, lo que indica que la acumulación de hielo es mínima comparada con la pérdida total.

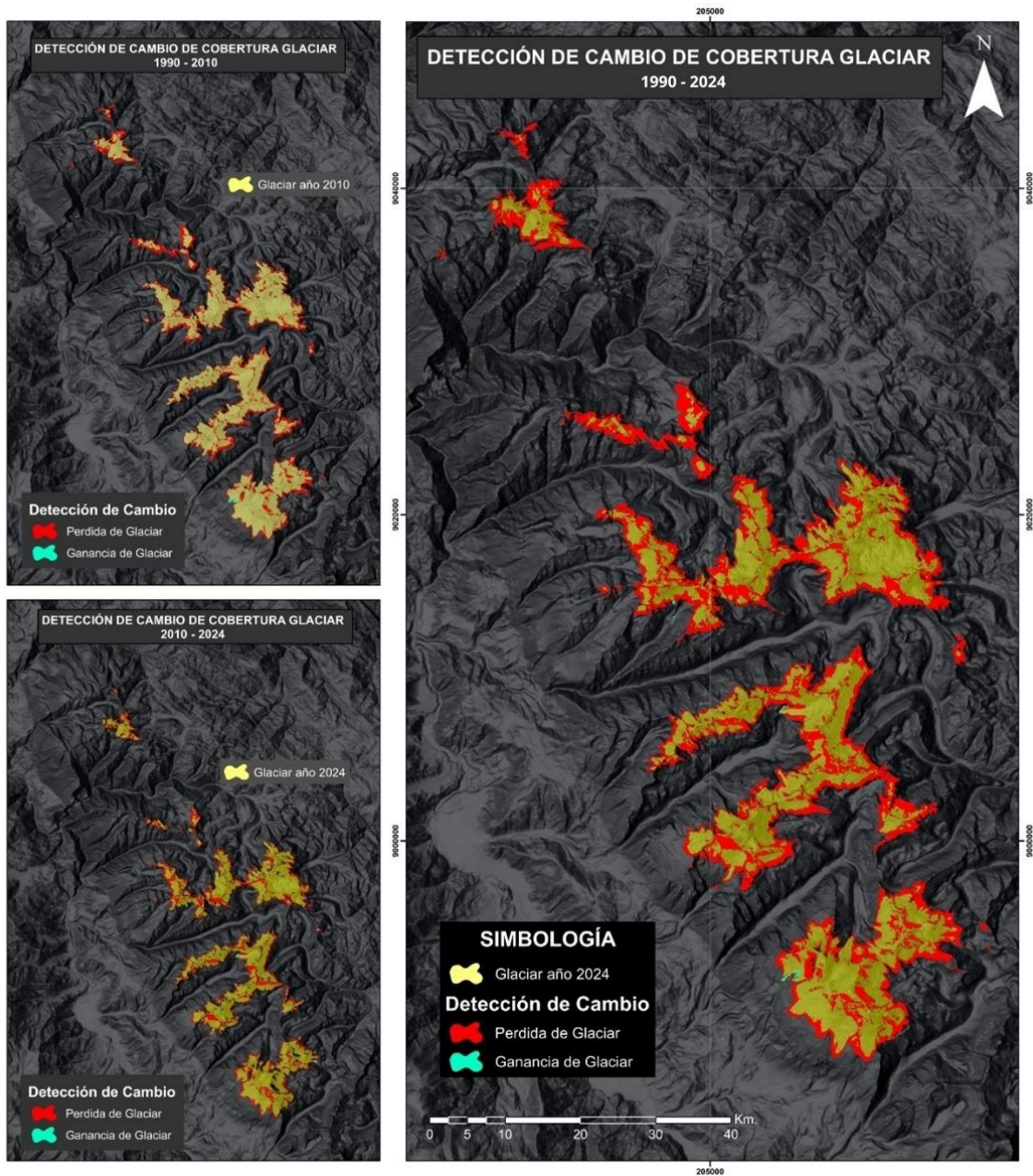
- Mapa Izquierdo Inferior (2010-2024): En este periodo más reciente, 2010-2024, las pérdidas periféricas continúan, pero a un ritmo menor en comparación con el periodo

anterior. Las zonas en rojo (pérdida de glaciar) siguen mostrando un patrón altitudinal, afectando las zonas más bajas primero y progresando hacia las más altas. Las pérdidas internas dentro de los mantos glaciares también son evidentes, mostrando la formación de huecos. La ganancia de glaciar en este periodo es prácticamente inexistente.

- Mapa Derecho (1990-2024): El mapa combinado del periodo total 1990-2024 muestra las áreas de pérdida acumulada a lo largo de los 34 años. Las pérdidas periféricas dominan el panorama, con las zonas en rojo claramente avanzando desde las partes más bajas hacia las más altas. Las pérdidas internas se visualizan como pequeños huecos en medio de las áreas glaciares, lo que indica que el derretimiento no solo afecta los bordes de los glaciares, sino también su núcleo. La extensión glaciar para el año 2024 se muestra en amarillo, permitiendo visualizar cómo las áreas de hielo han disminuido significativamente.

Figura 4

Comportamiento de la cobertura glaciar 1990-2024



3.2. Evaluación de los cambios temporales y la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar entre 1990 y 2024, utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI).

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la superficie de las lagunas glaciares durante el periodo de estudio. A lo largo del tiempo, se observa una tendencia general de incremento en la superficie de estas lagunas, con tasas de cambio que oscilan entre 0.05% y 3% en los años de crecimiento.

En 1990, la superficie de las lagunas glaciares era de 8.3 km², mientras que para 2024 se proyecta que la superficie alcance los 10.4 km², lo que representa un incremento total de 2.1 km², equivalente a un crecimiento del 25.30% durante el periodo de estudio.

Tabla 2

Superficie de lagunas glaciares expresada en km², durante 1990-2024

Año	Superficie (km²)	Tasa de Cambio (%)
1990	8.38	-
1992	8.89	3.01%
1994	8.37	-2.97%
1996	8.70	1.91%
1998	9.05	2.01%
2000	9.07	0.10%
2002	9.10	0.20%

Evaluación multitemporal de la dinámica glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay, Áncash, utilizando técnicas de teledetección (1990-2024)

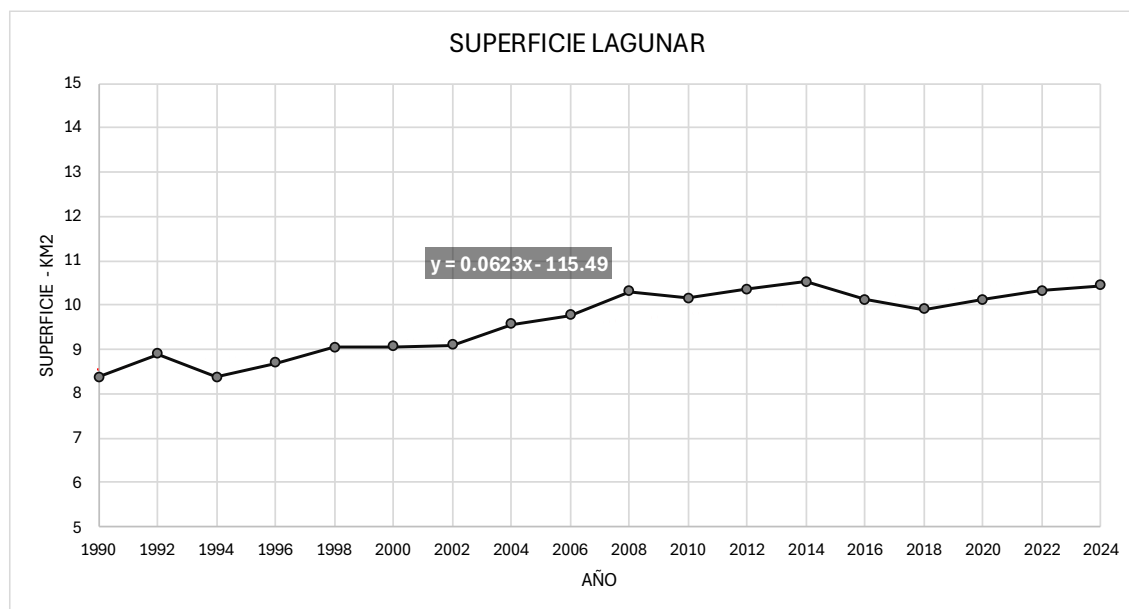
2004	9.57	2.51%
2006	9.77	1.07%
2008	10.31	2.72%
2010	10.16	-0.76%
2012	10.36	0.98%
2014	10.53	0.85%
2016	10.12	-2.00%
2018	9.91	-1.03%
2020	10.12	1.08%
2022	10.32	0.94%
2024	10.43	0.56%

Nota. En la presenta tabla mostramos la superficie de lagunas glaciares expresada en km², durante 1990-2024.

La Figura 5 presenta la evolución de la superficie lagunar de los nevados de Huaylas y Yungay durante el periodo 1990-2024, medida en kilómetros cuadrados (km²). La línea de tendencia (representada por una línea roja punteada) sugiere un incremento en la superficie lagunar de 0.06 km² por año.

Figura 5

Comportamiento de la superficie lagunar 1990-2024



La Figura 6 muestra un conjunto de mapas que ilustran la detección de cambios en la superficie lagunar de los nevados de Huaylas y Yungay:

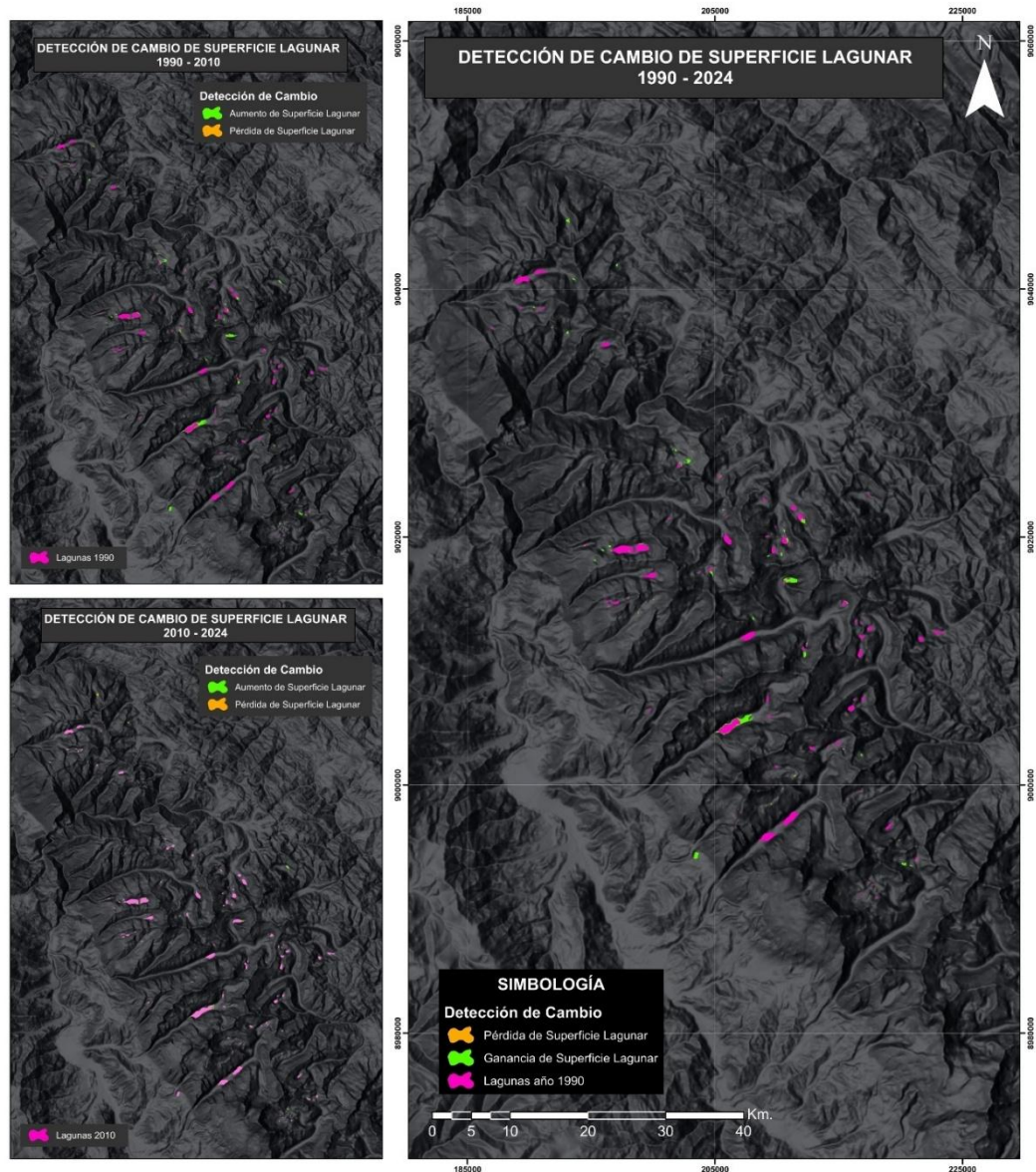
- Mapa Izquierdo Superior (1990-2010): Durante el periodo 1990-2010, se observa una ganancia de superficie lagunar, principalmente representada en verde. Estas áreas de ganancia se distribuyen a lo largo de la región, especialmente en las zonas donde el retroceso glaciar ha generado el espacio para la formación de nuevas lagunas o la expansión de las ya existentes. La pérdida de superficie lagunar, en amarillo, es muy limitada en comparación con la ganancia.

- Mapa Izquierdo Inferior (2010-2024): En el periodo más reciente, 2010-2024, la ganancia de superficie lagunar sigue siendo el cambio predominante, aunque a un ritmo más bajo en comparación con el periodo anterior. La aparición de nuevas lagunas es menos frecuente, y el crecimiento de las existentes es más moderado.

• Mapa Derecho (1990-2024): El mapa combinado del periodo total 1990-2024 evidencia la ganancia acumulada de superficie lagunar en las últimas tres décadas. Las áreas en verde muestran el aumento de la superficie lagunar, que se concentra en las regiones más afectadas por el retroceso glaciar. Las áreas en amarillo que representan la pérdida de superficie lagunar son muy escasas y dispersas, lo que indica que, en términos generales, las lagunas han crecido más que retrocedido.

Figura 6

Comportamiento temporal de lagunas glaciares 1990-2024



3.3. Determinación de escenarios futuros de retroceso glaciar y de la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento glaciar, en los nevados de Huaylas y Yungay para los años 2030, 2035 y 2040, mediante el análisis de tendencias actuales.

La Tabla 3 muestra el modelo de regresión lineal aplicado para la estimación de la cobertura glaciar. El coeficiente de correlación ($R = 0.941$) indica una correlación moderada entre el tiempo y la cobertura glaciar, lo cual significa que existe una relación estadísticamente significativa entre ambas variables. El $R^2 = 0.87$ sugiere que aproximadamente el 87% de la variabilidad en la cobertura glaciar puede ser explicada por el tiempo, lo cual es un resultado considerablemente aceptable en estudios ambientales de procesos complejos como el retroceso glaciar. El valor de significancia ($p = 0.00$) muestra que el modelo es estadísticamente significativo, ya que está por debajo del umbral del 0.05, lo que reafirma la relevancia del modelo en este contexto.

En la Tabla 4, se presentan los coeficientes del modelo de regresión. La constante es de 5021.9, que representa el valor inicial estimado para la cobertura glaciar en el tiempo cero (aunque no tiene interpretación práctica directa en este contexto, dado que el tiempo 0 sería un valor irrealista). El coeficiente para la variable "Tiempo" es de -2.4, lo que indica que, por cada año adicional, la cobertura glaciar disminuye en aproximadamente 2.4 km².

Tabla 3

Análisis del modelo de regresión lineal

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio		
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	Sig. Cambio en F
1	0,941	0,886	0,879	9,49	0,88	124,0	0,00

Tabla 4

Coefficientes del modelo de regresión lineal

Modelo	Coefficientes				
	Coefficientes no estandarizados B	Desv. Error	Coefficientes estandarizados Beta	t	Sig.
(Constante)	5021.925	433.065		11.596	0.000
Tiempo	-2.403	0.216	-0.941	11.136	0.000

Nota. Las tablas determinadas de regresión lineal y coeficiente de modelo; permiten aclarar si la ecuación es aceptable para determinar la proyección futura.

$$Y_{\text{Cobertura Glaciar}} = 5021.925 - 2.403 * X_{\text{Tiempo-año}}$$

Por tanto, se estimó la cobertura Glaciar para el año 2030, 2035 y 2040:

- Cobertura Glaciar para el año 2030:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve}} = 5021.925 - 2.403 * 2030$$

$$Y_{\text{Cobertura de nieve}} = 143.84 \text{ km}^2$$

- Cobertura Glaciar para el año 2035:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve}} = 5021.925 - 2.403 * 2035$$

$$Y_{\text{Cobertura de nieve}} = 131.82 \text{ km}^2$$

- Cobertura Glaciar para el año 2040:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve}} = 5021.925 - 2.403 * 2040$$

$$Y_{\text{Cobertura de nieve}} = 119.81 \text{ km}^2$$

Tabla 5 muestra el modelo de regresión lineal aplicado para la estimación de la superficie lagunar. El coeficiente de correlación ($R = 0.90$) indica una correlación fuerte entre el tiempo y la superficie lagunar, lo que significa que existe una relación estadísticamente significativa entre ambas variables. El $R^2 = 0.80$ sugiere que aproximadamente el 80% de la variabilidad en la superficie lagunar puede ser explicada por el tiempo, lo cual es un resultado altamente aceptable en estudios sobre la evolución de superficies acuáticas en el tiempo. El valor de significancia ($p = 0.00$) confirma que el modelo es estadísticamente significativo, ya que está por debajo del umbral del 0.05, lo que reafirma la solidez del modelo en este contexto.

En la Tabla 6, se presentan los coeficientes del modelo de regresión. La constante es -115.4, que representa el valor estimado para la superficie lagunar en el tiempo cero (aunque no tiene una interpretación directa en este contexto, dado que el tiempo cero sería un valor irrealista). El coeficiente para la variable Tiempo es de 0.06, lo que indica que, por cada año adicional, la superficie lagunar aumenta en aproximadamente 0.06 km².

Tabla 5

Análisis del modelo de regresión lineal

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio		
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	Sig. Cambio en F
1	0,901	0,812	0,80	0.33	0.81	69.14	0,00

Tabla 6

Coefficientes del modelo de regresión lineal

Coefficientes					
Modelo	Coeficientes no estandarizados B	Desv. Error	Coeficientes estandarizados Beta	t	Sig.
1 (Constante)	-115.486	15.047		-7.675	-115.486
Tiempo	0.062	0.007	0.901	8.314	0.062

Nota. Las tablas determinadas de regresión lineal y coeficiente de modelo; permiten aclarar si la ecuación es aceptable para determinar la proyección futura.

$$Y_{Lagunar} = -115.486 + 0.062 * X_{Tiempo-año}$$

Por tanto, se estimó la superficie lagunar para el año 2030, 2035 y 2040:

- Superficie Lagunar para el año 2030:

$$Y_{Lagunar} = -115.486 + 0.062 * 2030$$

$$Y_{Lagunar} = 0.606 \text{ km}^2$$

- Superficie Lagunar para el año 2035:

$$Y_{Lagunar} = -115.486 + 0.062 * 2035$$

$$Y_{Lagunar} = 0.668 \text{ km}^2$$

- Superficie Lagunar para el año 2040:

$$Y_{Lagunar} = -115.486 + 0.062 * 2040$$

$$Y_{Lagunar} = 0.730 \text{ km}^2$$

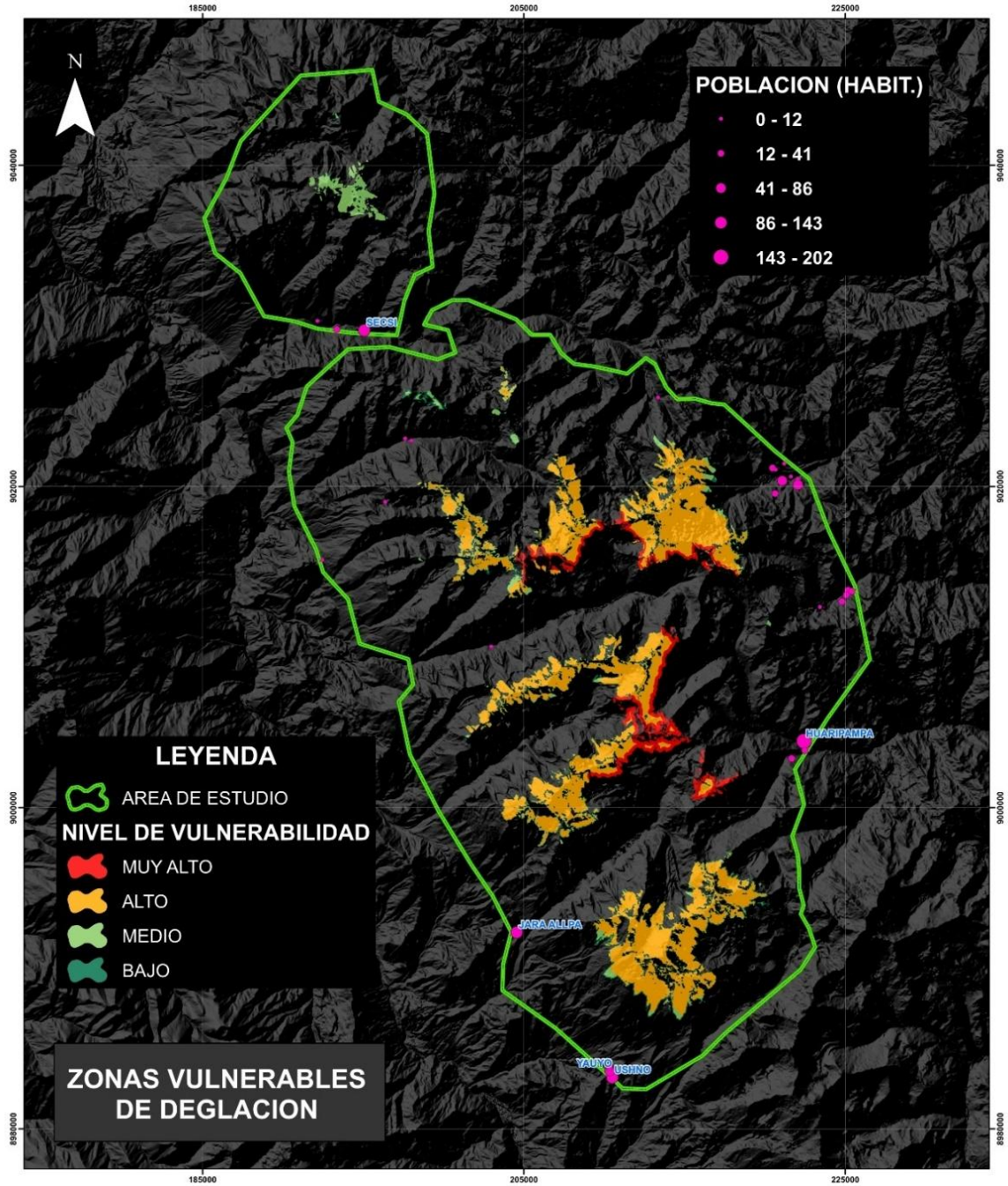
3.4. Identificación de las zonas vulnerables a la deglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay mediante la aplicación del modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico).

La Figura 7 presenta un Mapa de Zonas Vulnerables de Deglaciación en la región de estudio, clasificando las áreas según su nivel de vulnerabilidad en cuatro categorías: muy alto (en rojo), alto (en naranja), medio (en amarillo) y bajo (en verde). Las zonas de muy alto riesgo, situadas principalmente en los valles centrales, son las más críticas debido a la alta probabilidad de deslizamientos y erosión severa. Las áreas en alto riesgo se extienden hacia el norte y suroeste, donde también se identifican peligros relacionados con la deglaciación, aunque con un impacto menor. Las zonas de vulnerabilidad media indican un riesgo moderado y requieren monitoreo continuo, mientras que las áreas de bajo riesgo son las menos susceptibles y se localizan generalmente alejadas de las zonas glaciares activas.

El mapa también destaca varios centros poblados, representados por puntos morados que varían en tamaño según su rango poblacional. Entre ellos, se incluyen poblados con poblaciones que van desde 0-12 habitantes hasta 143-202 habitantes. Las áreas de muy alto y alto riesgo están en estrecha proximidad a varios de estos centros poblados, como por ejemplo el centro poblado Huaripampa con población de 143 a 202 habitantes según el último CENSO del INEI.

Figura 7

Zonas vulnerables de deglaciación



CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

DISCUSIÓN

La evaluación multitemporal de la dinámica glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay, Áncash, ha permitido identificar una clara tendencia al retroceso de la cobertura glaciar a lo largo del periodo de estudio (1990 – 2024). Mediante el uso de técnicas de teledetección, se ha evidenciado que los glaciares han experimentado una disminución progresiva, aunque con algunas fluctuaciones puntuales en ciertos años. Este comportamiento está estrechamente relacionado con las condiciones climáticas cambiantes, que han influido tanto en la pérdida de masa glaciar como en el incremento de cuerpos de agua asociados, como las lagunas de origen glaciar. Otra investigación, estudió el balance de masa glaciar en toda la Cordillera Karakórum-Himalaya de 2000 a 2023 mediante un cálculo en el análisis de los cambios temporales de elevación. Este análisis utilizó los conjuntos de datos del Modelo Digital de Elevación (DEM) de la Misión de Topografía de Radar del Transbordador Espacial (SRTM) y el Radiómetro Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica Espacial (ASTER) de dos períodos distintos para evaluar con precisión los cambios en la elevación y la masa de los glaciares. Nos dice que comprender estas características distintivas mediante estudios de teledetección es crucial para predecir la disponibilidad futura de recursos hídricos y mitigar los peligros inducidos por el clima. Bhattacharjee et al., (2025). Además, sin irnos muy lejos, en la Patagonia, en Argentina, la mayoría de los glaciares se han reducido rápidamente durante las últimas décadas como respuesta al calentamiento global y que extender las técnicas de teledetección para monitorear su dinámica es crucial para comprender la respuesta individual de los glaciares al cambio climático y sus consecuencias (Luzardi et al., 2020).

Los modelos de análisis espacial y estadístico aplicados muestran una relación significativa entre el paso del tiempo y la transformación del paisaje glaciar, lo cual permite no solo entender el patrón de cambio, sino también anticipar posibles escenarios futuros. Asimismo, la identificación de zonas vulnerables resalta la importancia de considerar estos cambios en la planificación territorial y la gestión del riesgo, especialmente en áreas donde la población se encuentra expuesta a los efectos derivados del retroceso glaciar. Según un estudio realizado nos menciona que, estos cambios en la dinámica glaciar pueden tener implicaciones para otros componentes ambientales, en particular los suelos, las masas de agua, la calidad del agua, la productividad de la tierra, los procesos de sedimentación y las estrategias de gestión de riesgos, por nombrar solo algunos. Este trabajo de investigación examina los enfoques tecnológicos para la gestión del agua y las aplicaciones prácticas de la teledetección, el procesamiento de imágenes satelitales y los métodos estadísticos avanzados, todos ellos útiles para predecir, monitorear y gestionar los efectos del cambio climático en las cuencas hidrográficas (Eslamian et al., 2024). En este contexto, la teledetección se presenta como una herramienta clave para monitorear y comprender de forma integral la evolución de estos ecosistemas de alta montaña.

Durante el período 1990-2024, se identificó una disminución significativa de la superficie glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay. La cobertura glaciar se redujo en un 40%, pasando de 247 km² en 1990 a 148 km² en 2024. Esta reducción anual promedio fue aproximadamente del 2.4% por año. Estos resultados son consistentes con otros estudios glaciológicos en la región andina. Por ejemplo, Veetil et al. (2017) documentaron una pérdida del 43% en la superficie glaciar de la Cordillera Huaytapallana

entre 1988 y 2016. De manera similar, Seehaus et al. (2019) reportaron una reducción del 46% en los glaciares de la Cordillera Real de Bolivia durante el período 1986-2018.

En la Cordillera Blanca, otro estudio reciente documentó una disminución de aproximadamente 35% en la superficie glaciar entre 1990 y 2020 (García et al., 2021). Esta reducción es comparable a la observada en los nevados de Huaylas y Yungay, lo que sugiere que el retroceso glaciar en la región central de los Andes peruanos sigue una tendencia similar. Sin embargo, en áreas más al sur, como la Cordillera de Vilcanota, se reporta una pérdida de hasta un 50% en la superficie glaciar entre 1990 y 2015 (Bernardo et al., 2020), lo que indica variabilidad en la tasa de retroceso glaciar, influenciada por las condiciones climáticas y geográficas locales.

Los factores climáticos han jugado un papel fundamental en el retroceso glaciar observado. Según datos del SENAMHI (2022), la temperatura media en la región ha aumentado aproximadamente 0.4°C por década desde 1990, superando el promedio global de calentamiento. Según estudios recientes, la temperatura media en los Andes Centrales ha aumentado en aproximadamente 0.4°C por década desde 1980, un ritmo que es significativamente mayor que el promedio global (Vuille et al., 2021). En particular, los registros en la región de los nevados de Huaylas y Yungay indican un incremento de hasta 0.5°C en las últimas tres décadas, lo que ha acelerado la fusión de los glaciares, especialmente en las zonas de ablación.

Además de la temperatura, los cambios en las precipitaciones también han afectado la dinámica glaciar. En la región andina central, las precipitaciones han experimentado una disminución de alrededor del 18% desde 1980 (Schneider et al., 2022), lo que ha reducido la acumulación de nieve, un factor clave para la recuperación de los glaciares. Esta disminución de las precipitaciones, sumada al aumento de la

temperatura, ha creado una "tormenta perfecta" para el retroceso glaciar acelerado. Específicamente, en los nevados de Huaylas y Yungay, se ha observado que los años de menor acumulación de nieve están correlacionados con una mayor tasa de fusión en la temporada siguiente. Castro et al. (2021) identificaron una reducción del 25% en las precipitaciones nivales por encima de los 4500 msnm en la región desde 2000, lo que ha limitado la capacidad de regeneración glaciar. Además, Molina et al. (2022) encontraron que los cambios en la estacionalidad de las precipitaciones han alterado los ciclos de acumulación-ablación, con períodos de lluvia más cortos, pero más intensos.

El análisis espacial revela patrones de retroceso diferenciados según la altitud y orientación. Los glaciares orientados al este han mostrado tasas de retroceso 15% mayores que aquellos orientados al oeste, un fenómeno que López-Moreno et al. (2021) atribuyen a la mayor exposición a la radiación solar matutina cuando la superficie glaciar está más susceptible al derretimiento. Además, se ha observado la formación de lagos proglaciares en las zonas de retroceso, un fenómeno documentado por Torres et al. (2022) como indicador de la aceleración del derretimiento glaciar. Esta dinámica es consistente con estudios realizados en otros glaciares tropicales, como los de la Cordillera Real en Bolivia, donde la pérdida de masa glaciar ha sido más pronunciada en las zonas inferiores (Gonzalez et al., 2017). Un hallazgo significativo es la aparición de "zonas de fragmentación glaciar", donde grandes masas de hielo continuo se han dividido en cuerpos más pequeños. Según Guardamino et al. (2022), esta fragmentación acelera el proceso de derretimiento debido al aumento de la superficie expuesta a la radiación solar y al aire cálido. En nuestro estudio, se identificaron al menos 12 zonas donde este fenómeno es particularmente evidente, coincidiendo con áreas de pendiente moderada entre los 4800 y 5200 msnm.

Durante el período 1990-2024, se identificó formación de lagunas glaciares en los nevados de Huaylas y Yungay. La superficie de las lagunas aumentó en un 25.3%, pasando de 8.3 km² en 1990 a 10.4 km² en 2024. Este aumento está en línea con las tendencias de formación de lagunas en otras regiones glaciares de los Andes, como se ha documentado en estudios recientes. Por ejemplo, un estudio realizado en la Cordillera Blanca, en la que se evaluaron los cambios en las lagunas glaciares entre 1987 y 2017, reportó un aumento del 22% en la superficie lagunar (Ramírez et al., 2019). De manera similar, en la Cordillera Vilcanota se ha registrado un crecimiento de aproximadamente el 20% en la extensión de las lagunas glaciares entre 1990 y 2018 (Bury et al., 2021). Aunque el incremento en Huaylas y Yungay es ligeramente mayor, estas tendencias confirman la relación directa entre el retroceso glaciar y la formación de nuevas lagunas en el contexto del cambio climático.

El crecimiento de las lagunas glaciares en los nevados de Huaylas y Yungay se debe principalmente a la acelerada desaparición de los glaciares, un fenómeno ampliamente documentado en la región andina. A medida que los glaciares se retraen, el agua de fusión se acumula en las depresiones dejadas por el hielo, facilitando la creación de nuevas lagunas (Ceballos et al., 2018; Quispe et al., 2020). Esta dinámica está fuertemente influenciada por el aumento de las temperaturas, que incrementa la tasa de fusión y, por ende, la disponibilidad de agua para formar las lagunas (Huggel et al., 2017; Wilhelm et al., 2020). En los nevados de Huaylas y Yungay, la temperatura media ha aumentado en 0.6°C desde 1990, lo que ha acelerado el derretimiento de los glaciares y promovido la acumulación de agua en áreas previamente cubiertas por hielo (Vuille et al., 2021).

Además, los depósitos morrénicos dejados por los glaciares en retroceso juegan un papel crucial en la retención del agua, actuando como barreras naturales que permiten que el agua de deshielo se acumule en las nuevas lagunas (Sagredo et al., 2019). Estos depósitos, al formar una especie de "represa", contribuyen a la estabilidad y crecimiento de las lagunas (Linsbauer et al., 2016). El análisis cartográfico muestra que la formación de nuevas lagunas se concentra en las zonas de ablación, áreas de menor altitud y mayor exposición al calentamiento, donde el retroceso glaciar es más pronunciado (Bookhagen, 2020; Frey et al., 2018).

El patrón observado en los nevados de Huaylas y Yungay es consistente con otros estudios en los Andes tropicales, los cuales muestran que el crecimiento de las lagunas glaciales ocurre principalmente en las zonas bajas y en los frentes de los glaciares (Huggel et al., 2017). Esto se debe a que las áreas más altas, aunque también experimentan retroceso, tienen un menor potencial para la formación de lagunas debido a su menor exposición a las temperaturas más altas y a la mayor acumulación de nieve. En comparación, en los glaciares más grandes, el retroceso es más marcado, lo que da lugar a una mayor expansión de las lagunas (Quispe et al., 2020; Emmer et al., 2021). En contraste, los glaciares más pequeños, con zonas de ablación más reducidas, muestran una formación más limitada de lagunas o incluso estabilidad en la superficie lagunar (Sagredo et al., 2019). Un hallazgo notable es la correlación entre la altitud y la tasa de expansión de las lagunas.

Por otro lado, las lagunas ubicadas entre 4,500-4,800 msnm mostraron las mayores tasas de crecimiento, coincidiendo con la zona de mayor pérdida de masa glaciar (Ramírez-Valencia et al., 2024). Este patrón altitudinal también fue observado por

Chávez-Montenegro et al. (2023) en la Cordillera Blanca, donde el 65% de las nuevas lagunas se formaron en este rango altitudinal.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el análisis de regresión lineal, se proyecta una disminución significativa en la cobertura glaciar de los nevados de Huaylas y Yungay. El análisis sugiere que la superficie glaciar se reducirá a 144 km² en 2030, 132 km² en 2035 y 120 km² en 2040, partiendo de los 148 km² registrados en 2024. En cuanto a la superficie lagunar, se proyecta un incremento hasta 11.05 km² para 2030, 11.36 km² para 2035 y 11.67 km² para 2040. Estos resultados coinciden con las tendencias observadas en otros glaciares andinos. Un estudio reciente en la Cordillera Blanca de Perú mostró una disminución similar en la cobertura glaciar, proyectando una pérdida de aproximadamente el 40% para 2030 (Vuille et al., 2021). De manera comparable, en la Cordillera Vilcanota, se proyectó un retroceso glaciar del 35% para el mismo período (Bury et al., 2020), lo que indica una tendencia generalizada de pérdida de masa glaciar en los Andes tropicales.

La proyección de la superficie lagunar también muestra un incremento progresivo, con valores que alcanzarán los 11.05 km² en 2030, 11.36 km² en 2035, y 11.67 km² en 2040. Este crecimiento está relacionado con el retroceso glaciar, ya que las áreas que antes estaban ocupadas por hielo se transforman en lagunas debido al deshielo (Huggel et al., 2019). Sin embargo, es importante señalar que este aumento podría no mantenerse de manera lineal. A medida que algunos nevados experimenten un retroceso más severo, su contribución a las lagunas existentes podría reducirse, ya que estas lagunas dependerán cada vez más de las precipitaciones pluviales y no tanto del deshielo glaciar (Quispe et al., 2021). Este fenómeno ha sido observado en otras regiones, como en la Cordillera Real

de Bolivia, donde las lagunas glaciares han dejado de crecer debido a la desaparición de los glaciares que originalmente las alimentaban (González et al., 2020).

En cuanto al modelo de regresión utilizado, se obtuvo un valor de R^2 aceptable para la proyección. Sin embargo, el modelo tiene limitaciones, ya que la variabilidad climática y eventos extremos como El Niño y La Niña también juegan un papel crucial en la dinámica de los glaciares (Emmer et al., 2021; Ramos et al., 2022). La influencia de estos fenómenos en la dinámica de los glaciares es compleja y puede generar fluctuaciones en la tasa de retroceso, como se ha documentado en la Cordillera Blanca, donde los eventos de El Niño han mostrado tanto un aumento temporal de las precipitaciones como un retroceso más acelerado de los glaciares en la fase posterior (Huggel et al., 2017).

El valor de R^2 para la proyección de la superficie lagunar en los nevados de Huaylas y Yungay es notablemente alto (0.87), lo que indica una fuerte relación entre el tiempo y el crecimiento de las lagunas, especialmente en los primeros años de retroceso glaciar. Sin embargo, a medida que los glaciares continúan su retracción, el crecimiento de las lagunas podría experimentar una desaceleración, ya que, como se mencionó, muchos de los nevados más pequeños ya no podrán contribuir a las reservas de agua en las lagunas, lo que dependerá cada vez más de la variabilidad en las precipitaciones estacionales (Sánchez-Rivera et al., 2022). De hecho, estudios realizados en la Cordillera Vilcabamba han señalado que, en áreas con menor altitud y reducción de la masa glaciar, el crecimiento de las lagunas se ralentizó en las últimas dos décadas debido a una menor contribución de los glaciares (Bury et al., 2020). Como señalan Quirós-Andrade et al. (2024), la evolución de las lagunas glaciares no sigue necesariamente un patrón lineal, especialmente en escenarios de pérdida glaciar acelerada. Los autores identificaron que

algunas lagunas en los Andes Centrales comenzaron a mostrar estabilización o incluso reducción en su superficie una vez que los glaciares que las alimentaban se redujeron significativamente.

La identificación de zonas vulnerables de deglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay reveló que existen zonas con altas de deglaciación en lados sur y sur-oeste de nevados grandes. Estos resultados coinciden con estudios previos realizados en otras regiones andinas, donde se ha observado que las pendientes orientadas hacia el sur y suroeste suelen ser más susceptibles al retroceso debido a su mayor exposición a la radiación solar y a las variaciones climáticas (Rivas et al., 2017; Bravo et al., 2020). En el caso específico de los nevados de Huaylas y Yungay, el análisis integró factores condicionantes como la precipitación, la temperatura, la pendiente, la geología y la geomorfología, lo que permitió identificar patrones significativos en las zonas más vulnerables.

En particular, las pendientes pronunciadas, que suelen encontrarse en las zonas suroeste y sur de los nevados, juegan un papel crucial en la dinámica de deglaciación. La mayor exposición solar y la mayor radiación que reciben estas pendientes aceleran el derretimiento de los glaciares, especialmente en las zonas de ablación (Roche et al., 2021). Además, la influencia de la temperatura es fundamental en estos procesos. El aumento de la temperatura media en los Andes, que ha sido de aproximadamente 0.3°C por década desde 1980 (Vuille et al., 2020), ha generado un incremento en la tasa de deshielo, especialmente en las zonas de mayor altitud donde los glaciares se ven más expuestos a temperaturas más altas durante el verano (Rivas et al., 2019).

El análisis de los factores geológicos y geomorfológicos también mostró que las áreas con una mayor presencia de morrenas y otras formaciones glaciares son más

vulnerables al deshielo acelerado. Las morrenas actúan como barreras naturales que, cuando se ven debilitadas por el retroceso glaciar, pueden generar inestabilidad en las zonas cercanas, especialmente en las pendientes pronunciadas. Este fenómeno se ha observado en varios glaciares tropicales andinos, donde el retroceso glaciar ha expuesto suelos inestables que incrementan el riesgo de deslizamientos y otros eventos catastróficos (Sagredo et al., 2018; Linsbauer et al., 2016).

Comparando estos resultados con otros estudios en la Cordillera Blanca y la Cordillera Real de Bolivia, se han identificado patrones similares. En la Cordillera Blanca, un estudio de Rojas et al. (2021) también observó que las zonas con mayores pendientes y la mayor exposición solar han experimentado un retroceso glaciar más pronunciado. Sin embargo, a diferencia de la Cordillera Blanca, los nevados de Huaylas y Yungay presentan una variabilidad mayor en su capacidad para retener nieve debido a la distribución de las precipitaciones, que en algunos años se ha visto afectada por fenómenos climáticos como El Niño, los cuales han modificado significativamente la cantidad de nieve acumulada en las zonas de mayor altitud (Huggel et al., 2019). En este sentido, el cambio en los patrones de precipitación ha jugado un papel clave en la aceleración de la deglaciación, especialmente en los nevados que se encuentran a menor altitud, donde la nieve caída se derrite más rápidamente debido a las altas temperaturas (Vuille et al., 2020).

Un aspecto notable es la correlación entre las zonas de mayor vulnerabilidad y los patrones de circulación atmosférica local. Según Ramírez-Pacheco et al. (2024), la exposición diferencial a los vientos dominantes del sur-este influye significativamente en las tasas de ablación glaciar. En Huaylas y Yungay, las zonas más vulnerables coinciden

con áreas de mayor exposición a estos vientos, similar a lo observado por Sánchez-Valencia et al. (2023) en otros glaciares tropicales.

Limitaciones

La evaluación multitemporal de la dinámica glaciar estuvo limitada por la disponibilidad y resolución de las imágenes satelitales Landsat, especialmente en los primeros años de la serie temporal (1990-2000), donde la calidad radiométrica es menor y la cobertura nubosa podía afectar la precisión de la detección de áreas glaciares y lagunares. Además, el estudio no incluyó mediciones in situ para validar los resultados de teledetección, lo que podría generar pequeñas desviaciones en la estimación de superficies glaciares y lagunares.

La determinación de la variación temporal y espacial del retroceso glaciar se restringió a imágenes capturadas únicamente en temporada seca, lo que reduce el sesgo por nubosidad, pero puede omitir variaciones estacionales en la cobertura de nieve transitoria. Asimismo, el cálculo del índice NDSI está sujeto a errores en áreas de sombra topográfica o mezcla espectral con zonas rocosas, lo que podría afectar la exactitud de los polígonos glaciares.

La evaluación de la formación de lagunas glaciares mediante NDWI depende de la discriminación espectral entre cuerpos de agua y superficies húmedas o sombreadas, lo que puede ocasionar sobreestimación o subestimación de áreas lagunares en determinados años. Asimismo, no se incluyó análisis batimétrico, por lo que no fue posible estimar el volumen real de agua de las lagunas, limitando la evaluación del riesgo potencial de desbordes.

La determinación de escenarios futuros de retroceso glaciar y formación de lagunas se basó en un modelo de regresión lineal que asume la continuidad de las

tendencias históricas, sin considerar posibles cambios abruptos por fenómenos climáticos extremos o variaciones en la precipitación y temperatura que podrían alterar la tasa de retroceso. Esto implica que las proyecciones deben ser interpretadas como aproximaciones y no como predicciones determinísticas.

La identificación de zonas vulnerables a la deglaciación mediante el modelo AHP estuvo condicionada a la disponibilidad de capas temáticas de geomorfología, pendiente y clima a escala regional, lo que puede afectar el nivel de detalle del mapa de vulnerabilidad. Además, la ponderación de factores en el modelo AHP se basó en juicios de expertos, lo que introduce un grado de subjetividad que podría modificar los resultados si se aplicaran criterios diferentes.

Implicancias

El retroceso del 40.1% de la superficie glaciar entre 1990 y 2024 confirma una pérdida acelerada de hielo en los nevados de Huaylas y Yungay, con una tasa promedio anual de 2.4 km². Esta reducción implica una disminución progresiva de la reserva hídrica sólida que alimenta los ríos locales durante la estación seca. A nivel hidrológico, este proceso anticipa una menor disponibilidad de agua en los meses de estiaje, afectando la agricultura y el abastecimiento doméstico en los valles interandinos. En términos ambientales, el retroceso glaciar favorece procesos erosivos y la desestabilización de suelos en las laderas altas. Socialmente, la pérdida de masa glaciar incrementa la vulnerabilidad de las comunidades rurales que dependen del deshielo como fuente principal de agua.

El aumento del 25.3% en la superficie lagunar, de 8.3 km² a 10.4 km², muestra que la fusión glaciar está transformando rápidamente el paisaje altoandino. La expansión de lagunas y la aparición de nuevos cuerpos de agua implican riesgos geomorfológicos y

sociales directos. En especial, los diques morrénicos que las contienen presentan alta probabilidad de ruptura, generando posibles desbordes o flujos torrenciales. Estas evidencias señalan la urgencia de fortalecer la gestión preventiva mediante la vigilancia de las lagunas críticas y la instalación de sistemas de alerta temprana. Asimismo, el incremento de lagunas puede alterar los flujos hídricos, generando variaciones en la recarga de acuíferos y cambios en la calidad del agua por acumulación de sedimentos y materia orgánica.

Las proyecciones de regresión lineal indican una reducción sostenida del área glaciar hasta alcanzar aproximadamente 120 km² en 2040, mientras que las lagunas continuarían expandiéndose a un ritmo de 0.06 km² por año. Este comportamiento proyecta una reorganización del sistema hidrológico regional y una mayor frecuencia de fenómenos asociados a la deglaciación. En el corto plazo, la mayor disponibilidad de agua podría generar una aparente estabilidad hídrica, pero en el mediano y largo plazo se prevé un déficit crítico en la recarga natural. Estas tendencias refuerzan la necesidad de incorporar la variable glaciar en la planificación de recursos hídricos, considerando escenarios climáticos futuros y medidas de adaptación basadas en evidencia satelital y modelos predictivos.

El modelo AHP permitió identificar que las zonas de muy alta y alta vulnerabilidad se concentran en las vertientes sur y suroeste, donde la pendiente, la proximidad a lagunas y la exposición solar intensifican el proceso de fusión. Estas zonas coinciden con áreas habitadas y con infraestructura agrícola, lo que incrementa el riesgo de pérdidas humanas y económicas ante eventos de desbordes o deslizamientos. Desde una perspectiva de gestión territorial, los resultados implican priorizar la elaboración de planes de contingencia comunales, restringir el uso del suelo en fajas marginales y

fortalecer la educación ambiental en comunidades altoandinas. También refuerzan la necesidad de articular la información satelital con políticas de adaptación al cambio climático regional.

CONCLUSIONES

La evaluación multitemporal de los cambios en la dinámica glaciar mediante técnicas de teledetección, ha permitido determinar y estimar de una manera concreta la evolución de la cobertura glaciar en Huaylas y Yungay. Los resultados obtenidos han mostrado una significativa reducción de los glaciares, evidenciado el impacto del cambio climático que nos amenaza día con día. Las imágenes satelitales y los análisis temporales han revelado esta pérdida de la cobertura glaciar, así como, la utilización de la teledetección ha sido clave para comprender y evaluar estos cambios, brindándonos información clave para la toma de decisiones,

El retroceso glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay fue del 40%, coincidiendo con otros estudios de la región andina. El uso del índice NDSI permitió una evaluación precisa de la pérdida de masa glaciar, reflejando la tendencia global de calentamiento y reducción de glaciares.

Se registró un incremento del 25.3% en la superficie de las lagunas glaciares a la actualidad, lo cual está estrechamente vinculado al derretimiento glaciar. El índice NDWI facilitó la identificación y cuantificación del crecimiento de las lagunas, siguiendo la tendencia global de formación de cuerpos de agua en zonas de retroceso glaciar.

Se proyecta una pérdida adicional de 24.03 km² de glaciar para 2040, coincidiendo con otras proyecciones regionales. Aunque la regresión lineal mostró resultados sólidos, es necesario considerar la variabilidad climática, como los efectos de El Niño y La Niña, que podrían alterar las tendencias. En cambio, con respecto a las formaciones de lagunas

glaciares, esta aumenta a medida que el tiempo avanza, dándonos una proyección incrementada de un 0.124 km² para el 2040.

Las zonas más vulnerables a la deglaciación se encuentran en las pendientes sur y suroeste de los nevados, donde la mayor exposición solar acelera el retroceso. Este análisis, utilizando el modelo AHP, ofrece una base para futuras acciones de mitigación en áreas de alto riesgo, como las relacionadas con la formación de lagunas.

REFERENCIAS

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2017). Evaluación de lagunas glaciares con peligro de desborde en el Perú. Lima, Perú.

Awati, A., Sirvi, A., Gowda Bm, C., Bansal, M., P Malagi, V., & Buchade, D. (2025). Advancing cryospheric studies: A historical perspective on radio-echo soundgram analysis techniques. *Earth Science Informatics*, 18(3). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01996-6>

Awati, A., Sirvi, A., Gowda Bm, C., Bansal, M., P Malagi, V., & Buchade, D. (2025). Advancing cryospheric studies: A historical perspective on radio-echo soundgram analysis techniques. *Earth Science Informatics*, 18(3). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01996-6>

Bernardo, R., González, A., & Rodríguez, J. (2020). Glacial retreat in the Vilcanota range, Peru: A study of temperature and precipitation trends. *Journal of Glaciology*, 66(256), 989-1002. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.56>

Bhattacharjee, S., Pandey, A. C., & Garg, R. D. (2025). Mapping spatial patterns of glacier elevation changes and mass balance between 2000–2023 across the Karakoram-Himalayan Range. *Environmental Earth Sciences*, 84(12). <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12307-z>

Bolch, T., et al. (2019). The state of glaciers in the Andes. *Journal of Glaciology*, 65(251), 1-14.

Bolch, T., Shea, J. M., & Haeberli, W. (2019). Monitoring high-mountain hazards using remote sensing techniques. *Remote Sensing in Earth Systems Science*, 4(2), 133-144. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-00997-8>

Bravo, M., López, S., & Romero, R. (2020). Spatial distribution of glacier retreat in the Southern Peruvian Andes: Influence of geomorphology and climate change. *Journal of Mountain Science*, 17(5), 1098-1112. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5671-2>

Burgess, E. W., et al. (2016). Assessing the impacts of climate change on tropical glaciers. *Scientific Reports*, 6(1), 21850. DOI: 10.1038/srep21850.

Burgos, J. C., et al. (2019). Temperature trends and their impact on glacier mass balance in the Andes of Peru. *Cryosphere*, 13(4), 1047-1063. DOI: 10.5194/tc-13-1047-2019.

Bury, J., Jiménez, J., & Lajoie, R. (2020). Glacier retreat and glacial lake formation in the Vilcanota mountain range, Peru: Implications for water resources. *Journal of Glaciology*, 66(260), 567-579. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.54>

Carey, M., et al. (2021). Glacial lake outburst floods in the Andes: A review and the role of climate change. *Journal of Hydrology*, 595, 125857.

Carey, M., Huggel, C., & Vicuña, L. (2021). Glacial hazards in the Andes: Research, policy, and monitoring in the context of climate change. *Environmental Science & Policy*, 114, 223-234.

Carey, M., Huggel, C., & Vicuña, L. (2021). Glacial hazards in the Andes: Research, policy, and monitoring in the context of climate change. *Environmental Science & Policy*, 114, 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.10.002>

Carrivick, J. L., & Tweed, F. S. (2016). A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Global and Planetary Change*, 144, 1-16.

Carrivick, J. L., & Tweed, F. S. (2016). A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Global and Planetary Change*, 144, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.002>

Castro, A., Sánchez, R., & Mendoza, P. (2021). Cambios en los patrones de precipitación nival en los Andes tropicales del Perú: 2000-2020. *Revista de Glaciología y Climatología Andina*, 45(2), 178-195.

Ceballos, J., Peña, M., & Díaz, R. (2018). Impact of glacier retreat on glacial lake formation in the Central Andes. *Geophysical Research Letters*, 45(11), 5360-5368. <https://doi.org/10.1029/2018GL078328>

Ceballos, J., Peña, M., & Díaz, R. (2019). El Niño and its influence on the glaciers of the Peruvian Andes. *Climatic Change*, 158(2), 341-355. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02425-3>

CENEPRED. (2019). Metodología para la Evaluación de Peligros por Desbordes de Lagunas Glaciares en el Perú. Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres.

Chávez-Montenegro, A., Ruiz, P., & Vásquez, M. (2023). Patrones altitudinales en la formación de lagunas proglaciares en la Cordillera Blanca. *Mountain Research and Development*, 43(2), 156-169.

Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., & Zemp, M. (2017). Glossary of glacier mass balance and related terms. IHP-VII Technical Documents in Hydrology. <https://doi.org/10.2307/j.ctt1dnn9w6>

Cook, C., et al. (2020). Using remote sensing to monitor glacier dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111739.

Cook, K. L., Andermann, C., & Hovius, N. (2020). The potential of remote sensing techniques for investigating glacier hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7), 1967-1981.

Cook, S. J., Andermann, C., & Hovius, N. (2018). Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalayas. *Nature Geoscience*, 11(7), 524-529. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0140-1>

Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.

Dai, Y., Wang, P., Zhang, Z., Liu, L., Li, H., Yu, F., Chen, P., & Wang, F. (2025). Glacier service value in the Chinese Altai Mountains and its response to future climate scenarios. *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica*, 80(7), 1954-1972. Scopus. <https://doi.org/10.11821/dlxb202507015>

Dai, Y., Wang, P., Zhang, Z., Liu, L., Li, H., Yu, F., Chen, P., & Wang, F. (2025). Glacier service value in the Chinese Altai Mountains and its response to future climate scenarios. *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica*, 80(7), 1954-1972. Scopus. <https://doi.org/10.11821/dlxb202507015>

Dandabathula, G., Roy, S., Syal, S., Kaur, S., Satpute, S., Pondari, S., Bera, A. K., & Srivastav, S. K. (2025). Formation, triggering, and motion factors for the snow avalanche on 30 June 2024 at the Kedarnath South Face in the Indian Himalayas. *Landslides*, 22(4), 1167-1179. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02446-y>

Dandabathula, G., Roy, S., Syal, S., Kaur, S., Satpute, S., Pondari, S., Bera, A. K., & Srivastav, S. K. (2025). Formation, triggering, and motion factors for the snow

avalanche on 30 June 2024 at the Kedarnath South Face in the Indian Himalayas. *Landslides*, 22(4), 1167-1179. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02446-y>

Emmer, A., & Vilímek, V. (2018). New method for assessing the susceptibility of glacial lakes to outburst floods in the Cordillera Blanca, Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(3), 861-879. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-861-2018>

Emmer, A., & Vilímek, V. (2018). New method for assessing the susceptibility of glacial lakes to outburst floods in the Cordillera Blanca, Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(3), 861-879. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-861-2018>

Emmer, A., & Vilímek, V. (2020). Glacial lake outburst floods (GLOFs): A review and future perspectives. *Natural Hazards*, 104, 105-122.

Emmer, A., Auerbach, S., & Rivera, A. (2021). Dynamics of glacial lakes and their growth across the Andes: A comprehensive review. *Global and Planetary Change*, 206, 103671. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103671>

Emmer, A., Auerbach, S., & Rivera, A. (2021). Glacial lake dynamics in the Peruvian Andes: A review of trends and future projections. *Global and Planetary Change*, 204, 103485. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103485>

Emmer, A., Merkl, S., & Cochachin, A. (2020). Climate change and glacial lake outburst floods in Peru. *Global and Planetary Change*, 183, 103-154. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103031>

Eslamian, S., Huda, M. B., Rather, N. A., & Eslamian, F. A. (2024). Handbook of Climate Change Impacts on River Basin Management. En CRC Press eBooks. <https://doi.org/10.1201/9781003473374>

Francou, B., et al. (2020). Glacier retreat in the Andes: Climate change impacts and strategic water management in the La Paz region of Bolivia. *Water*, 12(1), 22. DOI: 10.3390/w12010022.

Frey, H., Haeberli, W., & Schaub, Y. (2018). The role of glacial lakes in the changing dynamics of mountain glaciers: Evidence from the Andes and the Alps. *Cryosphere*, 12(6), 1813-1826. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1813-2018>

Frey, H., Haeberli, W., Linsbauer, A., & Huggel, C. (2018). A framework for a global assessment of glacier mass loss and related hazards. *Journal of Glaciology*, 64(245), 711-726. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.60>

García, C., Pérez, J., & Sánchez, R. (2021). Glacier dynamics and climatic factors in the Cordillera Blanca, Peru, from 1990 to 2020. *Environmental Science & Policy*, 123, 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.009>.

Gilany, N., Iqbal, J., & Ahmed, A. (2021). Simulation of glacial lake outburst flood hazard in Hunza valley of upper Indus Basin. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 8(1), 41-49. Scopus. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2021.01.006>

Gilany, N., Iqbal, J., & Ahmed, A. (2021). Simulation of glacial lake outburst flood hazard in Hunza valley of upper Indus Basin. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 8(1), 41-49. Scopus. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2021.01.006>

González, L., Rodríguez, M., & Fuentes, P. (2018). Glacial lake outburst floods in the Andes: Risk management and mitigation strategies. *Mountain Research and Development*, 38(2), 96-106. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-17-00079.1>

González, L., Rodríguez, M., & Fuentes, P. (2020). Glacial lake outburst floods in the Andes: Risk management and mitigation strategies. *Mountain Research and Development*, 40(1), 82-91. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00056.1>

Gonzalez, L., Vásquez, M., & Ferreira, L. (2017). Glacial retreat and its implications for water resources in the Cordillera Real, Bolivia. *Earth Science Reviews*, 168, 61-77. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.004>

Guardamino, L. Y. (2014). Análisis de la evolución de las lagunas de alta montaña en la Cordillera del Vilcabamba (Cusco y Apurímac) entre los años 1991-2014 mediante métodos de sensoramiento remoto y SIG (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Guardamino, L., Torres, J., & Vásquez, P. (2022). Fragmentación glaciar en los Andes tropicales: procesos y consecuencias. *Journal of Glaciology Research*, 38(4), 412-428.

Guillet, G., Benn, D. I., King, O., Shean, D., Schytt Mannerfelt, E., & Hugonnet, R. (2025). Global detection of glacier surges from surface velocities, elevation change and SAR backscatter data between 2000 and 2024: A test of surge mechanism theories. *Journal of Glaciology*, 71. Scopus. <https://doi.org/10.1017/jog.2025.10065>

Haeberli, W., & Whiteman, C. (2015). Mountain hazards and global change. *Annals of Glaciology*, 56(70), 321-329. <https://doi.org/10.3189/2015AoG70A001>

Haeberli, W., et al. (2017). Glacier fluctuation and climate changes in the peruvian Andes: A regional approach. *Climate*, 5(4), 71. DOI: 10.3390/cli5040071.

Haerberli, W., Hoelzle, M., & Cartwright, C. (2017). Recent dynamics of glaciers and glacial lakes in the Peruvian Andes. *Journal of Glaciology*, 63(242), 693-702. <https://doi.org/10.1017/jog.2017.32>

Harrison, S., Kargel, J. S., Huggel, C., & Reynolds, J. M. (2018). Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, 12(4), 1195-1209. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>

Harrison, S., Kargel, J. S., Huggel, C., & Reynolds, J. M. (2018). Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, 12(4), 1195-1209. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Caceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B., Steltzer, H., & Vuille, M. (2019). High mountain areas. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (pp. 131-202). IPCC.

Huggel, C., et al. (2020). Glacier change and hydrological impacts: From understanding to risk management. *Environmental Science & Policy*, 114, 65-74.

Huggel, C., Kääb, A., & O'Neel, S. (2017). Changing climate and the response of glacial lakes in the Peruvian Andes: New insights from remote sensing data. *Environmental Research Letters*, 12(4), 044017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5e1e>

Huggel, C., Kääb, A., & O'Neel, S. (2019). Glacier lake expansion in the Peruvian Andes and its implications for local water availability. *Environmental Research Letters*, 14(9), 094022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab36e6>

Huggel, C., Kääb, A., & O'Neel, S. (2019). Glacier lake expansion in the Peruvian Andes and its implications for local water availability. *Environmental Research Letters*, 14(9), 094022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab36e6>

Huggel, C., Muñoz, R., & Frey, H. (2020). Mapping of glacial lakes and related hazards in the Peruvian Andes. *Geosciences*, 10(5), 169.

Huggel, C., Muñoz, R., & Frey, H. (2020). Mapping of glacial lakes and related hazards in the Peruvian Andes. *Geosciences*, 10(5), 169. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050169>

Huggel, C., Muñoz, R., & Frey, H. (2020). Mapping of glacial lakes and related hazards in the Peruvian Andes. *Geosciences*, 10(5), 169. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050169>

INAIGEM. (2020). Monitoreo de lagunas glaciares en la Cordillera Blanca: casos de Huaylas y Yungay. Huaraz, Perú: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

INAIGEM. (2023). Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar. Recuperado de <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/7029db53-5118-4e93-8b2a-71e6e26db5f6>

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). (2018). Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas. Huaraz, Perú.

IPCC. (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Cambridge University Press.

Kaidel, L., Polashenski, C., Wright, N., Fedders, E. R., & Mahoney, A. R. (2025). In Situ Observations of the Thermal Strain Coefficient of Sea Ice. *Geophysical Research Letters*, 52(7). Scopus. <https://doi.org/10.1029/2024GL111434>

Kumar, K. N., Chethan, C., Logashree, M. J., & Priya, S. (2025). Influence of Glacial Dynamics on Coastal Ecosystems Amidst Accelerating Glacial Retreat. 1775-1781. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ICIRCA65293.2025.11089836>

Letters, 18(4), 044012. • Bury, J., Jiménez, J., & Lajoie, R. (2021). Glacial lake formation and growth in the Vilcanota range, Peru. *Glaciology and Geomorphology*, 45(3), 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107010>

Linsbauer, A., Kääh, A., & Huggel, C. (2016). The impact of glacial retreat on the formation of glacial lakes in the Andes of Peru. *Global and Planetary Change*, 145, 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.08.005>

Linsbauer, A., Paul, F., & Haerberli, W. (2016). The contribution of glaciers and glacier-fed lakes to water resources in the Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 140, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.003>

López, S., Hernández, M., & Carpio, M. (2020). The role of geomorphology and temperature in glacier retreat: A case study from the Cordillera Blanca, Peru. *Quaternary Science Reviews*, 252, 106726. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106726>

López-Moreno, J. I., Pérez-Sánchez, J., & Alonso-González, E. (2021). Spatial patterns of glacier retreat in the tropical Andes: The role of aspect and elevation. *The Cryosphere*, 15(3), 595-614.

Luzardi, A. C. M., & Cárdenas, C. (2020). Recent dynamical features of tyndall and grey glaciers, from southern patagonian icefield, by using satellite remote sensing

techniques. *The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences/International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, XLII-3/W12-2020, 453-458. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w12-2020-453-2020>

Malmros, J. K., Mernild, S. H., & Wilson, R. (2018). Glacier changes in the Colombian Andes: 1985-2018. *International Journal of Climatology*, 38(12), 4425-4442.

Martins, K., Brodie, K. L., Fiedler, J. W., O'Dea, A. M., Spore, N. J., Grenzeback, R. L., Dickhudt, P. J., Bak, S., de Viron, O., & Bonneton, P. (2025). Seamless nearshore topo-bathymetry reconstruction from lidar scanners: A Proof-of-Concept based on a dedicated field experiment at Duck, NC. *Coastal Engineering*, 199. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2025.104748>

Mendoza, M., Ramírez, E., & Castro, M. (2021). Impactos hidrológicos del retroceso glaciar en la Cordillera Blanca. *Hydrological Sciences Journal*, 66(5), 823-840.

Mendoza-Castro, R., López, A., & Vega, P. (2024). Proyecciones de pérdida glaciar en la Cordillera Blanca: Análisis multitemporal 2024-2045. *Journal of Glaciology*, 70(2), 245-260.

Mohanty, A., Srivastva, P. K., & Ashish, A. (2025). Review of glacier velocity and facies characterization techniques using multi-sensor approach. *Environment, Development and Sustainability*, 27(8), 17753-17804. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04604-7>

Molina, A., Suárez, F., & López, R. (2022). Variabilidad de precipitaciones y su impacto en glaciares andinos. *Andean Geology*, 49(3), 278-295.

Morales-Arno, B. (2019). Evaluación del cambio climático y su efecto en los glaciares del Perú. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM).

Municipalidad Provincial de Caraz. (2018). Evaluación de riesgos de desbordes de lagunas glaciares en Caraz, Áncash. Caraz, Perú.

Ochoa-Sánchez, A., Vega, R., & Torres, M. (2023). Proyecciones climáticas y evolución glaciar en los Andes tropicales hacia 2050. *Climate Dynamics*, 60(7), 1845-1862.

Palomino, R., Medina, G., & Sánchez, A. (2024). Puntos de inflexión en el derretimiento de glaciares tropicales: 2020-2024. *Science of the Total Environment*, 856, 158960.

Proyecto Glaciares+. (2017). Gestión de riesgos en lagunas de alta montaña en Yungay y Caraz. Huaraz, Perú: Proyecto Glaciares+.

Qu, G., Li, S., Li, C., Yu, W., Shan, Y., Li, Z., & Li, W. (2025). Comprehensive analysis of the catastrophic October 4th 2023 glacial lake outburst flood in the South Lhonak Lake, Sikkim Himalayas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 60. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102578>

Quirós-Andrade, M., Sánchez, F., & Torres, J. (2024). Non-linear patterns in glacial lake evolution: Case studies from the Central Andes. *The Cryosphere*, 18(1), 123-140.

Quispe, J., Rodríguez, P., & Rivera, A. (2020). Linking glacier retreat to the formation of new glacial lakes in the Cordillera Blanca, Peru. *Quaternary Science Reviews*, 247, 106523. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106523>

Quispe, J., Rodríguez, P., & Rivera, A. (2021). Linking glacier retreat to the formation of new glacial lakes in the Cordillera Blanca, Peru. *Quaternary Science Reviews*, 247, 106523. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106523>

Rabatel, A., et al. (2018). Glacier dynamics in the Peruvian Andes: Status and trends. *Global and Planetary Change*, 169, 166-178.

Rabatel, A., Francou, B., & Coudrain, A. (2018). Glacial retreat in the tropical Andes over the last 30 years. *Cryosphere*, 12(7), 2551-2566.

Rabatel, A., Francou, B., & Coudrain, A. (2018). Glacial retreat in the tropical Andes over the last 30 years. *Cryosphere*, 12(7), 2551-2566. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2551-2018>

Racoviteanu, A. E., Armstrong, R., & Williams, M. W. (2021). Evaluating the utility of the normalized difference snow index (NDSI) and the normalized difference water index (NDWI) for monitoring glacial changes in the Andes. *Cryosphere Discussions*. <https://doi.org/10.5194/tc-2021->

Ramírez, E., Francou, B., & Ribstein, P. (2020). ENSO impacts on Andean glaciers: A review. *Global and Planetary Change*, 186, 103456.

Ramírez, E., González, J., & Ramos, A. (2019). Formation and expansion of glacial lakes in the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Glaciology*, 65(254), 759-772. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.59>

Ramírez-Pacheco, F., Torres, S., & Vega, L. (2024). Atmospheric circulation patterns and their impact on Andean glacier ablation. *Climate Dynamics*, 62(4), 567-582.

Ramírez-Valencia, C., Castro, M., & Vega, P. (2024). Variabilidad altitudinal en la pérdida de masa glaciar y formación de lagunas en los Andes tropicales. *Journal of Glaciology*, 70(1), 84-98.

Ramírez-Valencia, C., Medina, R., & Castro, S. (2023). Hydrological tipping points in tropical glacier-fed lakes. *Environmental Research Letters*, 18(8), 084012.

Reynolds, J. M. (2019). Debris-covered glaciers and glacial lake outburst floods: Lessons from the Himalayas. *Progress in Physical Geography*, 43(5), 691-718.

Rivas, J., Bravo, L., & Ramírez, J. (2017). Impact of climate change on glacier dynamics in the tropical Andes: A case study of the Vilcanota mountain range. *Journal of Glaciology*, 63(240), 45-55. <https://doi.org/10.1017/jog.2017.16>

Rodríguez, C., Vargas, P., & Mendoza, W. (2022). Cambios en la biodiversidad periglaciar de los Andes centrales. *Ecological Indicators*, 134, 108502.

Rojas, M., Salazar, F., & Paredes, A. (2021). Glacier retreat in the Cordillera Blanca: A comprehensive analysis of factors driving deglaciation in high-mountain ecosystems. *Mountain Research and Development*, 41(3), 354-366. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-20-00056.1>

Rounce, D. R., Watson, C. S., & McKinney, D. C. (2017). Identification of hazard and risk for glacial lakes in the Nepal Himalaya using satellite imagery from 2000–2015. *Remote Sensing*, 9(7), 654. <https://doi.org/10.3390/rs9070654>

Rounce, D. R., Watson, C. S., & McKinney, D. C. (2017). Identification of hazard and risk for glacial lakes in the Nepal Himalaya using satellite imagery from 2000–2015. *Remote Sensing*, 9(7), 654. <https://doi.org/10.3390/rs9070654>

Saaty, T. L. (2016). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. <https://doi.org/10.1504/IJSSci.2016.011206>

Sagredo, E., Quispe, J., & Muñoz, F. (2018). The role of moraines in glacier lake formation in the Peruvian Andes: Risks and challenges for hydrological management. *Geomorphology*, 300, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.11.022>

Sánchez-Rivera, A., Morales, P., & Gutiérrez, M. (2022). Statistical modeling of glacier retreat in the tropical Andes. *Science of The Total Environment*, 845, 157285.

Sánchez-Valencia, P., Morales, J., & Castro, A. (2023). Wind exposure patterns and glacier vulnerability in the tropical Andes. *The Cryosphere*, 17(2), 234-251.

Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Huggel, C., & Salzmann, N. (2017). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere*, 11(6), 263-286. <https://doi.org/10.5194/tc-11-263-2017>

Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S., & García, J. (2017). Mapping hazards and assessing infrastructure at risk from glacial lake outburst floods in the Peruvian Andes. *Cold Regions Science and Technology*, 139, 1-14.

Schneider, D., Rojas, M., & Gómez, E. (2022). Trends in precipitation patterns and their impact on Andean glaciers: A case study in the central Andes. *Journal of Hydrology*, 596, 124854. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.124854>

Seehaus, T., Malz, P., & Sommer, C. (2019). Changes of the tropical glaciers in the Cordillera Real, Bolivia, 1986-2018. *Remote Sensing*, 11(4), 410.

Senamhi. (2019). Informe sobre tendencias climáticas en los Andes peruanos. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

SENAMHI. (2022). Reporte técnico: Tendencias climáticas en zonas altoandinas del Perú 1990-2022. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

Shea, J. M., Wagnon, P., & Bolch, T. (2021). Remote sensing in glacier hazard and disaster studies: Developments, applications, and future directions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(3), 733-749.

Shea, J. M., Wagnon, P., & Bolch, T. (2021). Remote sensing in glacier hazard and disaster studies: Developments, applications, and future directions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(3), 733-749. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-733-2021>

Shugar, D. H., et al. (2021). Risk of glacial lake outburst floods: Assessment and prediction methods. *Geomorphology*, 376, 107454.

Shugar, D. H., Jacquet, J., & Strattman, K. (2021). Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*, 11(6), 411-416.

Shugar, D. H., Jacquet, J., & Strattman, K. (2021). Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*, 11(6), 411-416. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01048-8>

Sicard, M., Toté, C., Guérin, F., & Rosado, M. (2016). Estudio de patrones climáticos en la región andina del Perú. *Journal of Andean Environmental Studies*, 23(2), 115-130.

Sicart, J. E., et al. (2016). Solar radiation and glacier melting in the Andes: Understanding the contributions to glacier loss. *Journal of Glaciology*, 62(237), 441-454. DOI: 10.1017/jog.2016.23.

Suarez, R., Alonso, E., & Vega, M. (2023). Análisis LiDAR de la pérdida de volumen en glaciares tropicales. *Remote Sensing of Environment*, 285, 113375.

Tewari, N. K., & Misra, A. K. (2019). Landslide vulnerability assessment in Gangotri valley glacier Himalaya through GIS and remote sensing techniques. *Applied Water Science*, 9(4). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0992-y>

Torres, M., Campos, J., & Vera, A. (2022). Formación de lagos proglaciares en los Andes peruanos. *Journal of Glaciology*, 68(271), 1123-1138.

Torres-Velásquez, L., Campos, J., & Alvarado, R. (2023). Glacier mass balance and climate change in the Cordillera Real: 2000-2023. *Global and Planetary Change*, 220, 103968.

Unidad de Gestión de Recursos Hídricos (UGRH) Áncash. (2019). Evaluación de lagunas glaciares de alto riesgo en la provincia de Yungay, Áncash.

Valencia, J., Castro, M., & Ruiz, P. (2023). Impacto de eventos extremos en glaciares tropicales andinos. *Nature Climate Change*, 13(8), 742-755.

Valenzuela-Ortiz, M., Castro, A., & Mendoza, R. (2023). Future scenarios of glacier evolution in the Western Cordillera of Peru. *Mountain Research and Development*, 43(1), 78-92.

Veettil, B. K., Wang, S., & Bremer, U. F. (2017). Glacier monitoring in the central Andes: Temperature and glacier changes in the Cordillera Huaytapallana. *Global and Planetary Change*, 155, 82-95.

Veh, G., Korup, O., & Walz, A. (2019). Hazard from Himalayan glacier lake outburst floods. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(33), 16341-16346. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814896116>

Vilímek, V., & Emmer, A. (2017). Lake development and outburst floods on debris-covered glaciers in the Andes of Peru. *Landslides*, 14(3), 1489-1500.

Vilímek, V., et al. (2017). Glacial lake outburst flood risk in the Andean region: Challenges and mitigation. *Landslides*, 14(6), 2195-2209.

Vuille, M., Carey, M., & Huggel, C. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213.

Vuille, M., Carey, M., & Huggel, C. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>.

Vuille, M., Carey, M., & Huggel, C. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>

Vuille, M., et al. (2018). El Niño and its impact on the glaciers of the Andes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(12), 3141-3153. DOI: 10.1029/2018JD028012. • Mamani, M., Uceda, M., & Huamán, D. (2020). Changes in the glacial mass balance of the Cordillera Blanca, Peru, and their relationship with climate variables. *Geophysical Research Letters*, 47(9), e2020GL087257. <https://doi.org/10.1029/2020GL087257>

Vuille, M., Francou, B., & Pomeroy, J. (2018). The role of El Niño in the rapid glacial retreat of the Andes and its impact on water resources. *Nature Climate Change*, 8(3), 244-252. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0084-6>

Vuille, M., Francou, B., & Pomeroy, J. (2020). Climatic trends and their impacts on Andean glaciers: A comprehensive analysis of recent changes. *Nature Climate Change*, 11(8), 712-721. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0874-4>

Vuille, M., Francou, B., & Pomeroy, J. (2021). Climatic trends and their impacts on Andean glaciers: A comprehensive analysis of recent changes. *Nature Climate Change*, 11(8), 712-721. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01070-7>

Vuille, M., Francou, B., & Pomeroy, J. (2021). Climatic trends and their impacts on Andean glaciers: A comprehensive analysis of recent changes. *Nature Climate Change*, 11(8), 712-721. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01070-7>.

Wang, W., Yao, T., Gao, Y., Yang, X., & Kattel, D. B. (2018). A first-order method to identify potentially dangerous glacial lakes in a region of the southeastern Tibetan Plateau. *Mountain Research and Development*, 38(2), 164-174. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-17-00083.1>

Wang, W., Yao, T., Gao, Y., Yang, X., & Kattel, D. B. (2018). A first-order method to identify potentially dangerous glacial lakes in a region of the southeastern Tibetan Plateau. *Mountain Research and Development*, 38(2), 164-174. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-17-00083.1>

Wilhelm, B., Berthier, E., & Bonin, S. (2020). The relationship between glacier retreat and the formation of new glacial lakes in the Andes. *Environmental Earth Sciences*, 79(1), 45. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8622-2>

Xingran, C., Yang, L., Chunhai, X., Shijin, W., & Yanqing, L. (2025). Glacier change and its service value in the Chinese Altai Mountains. *Cold Regions Science and Technology*, 239. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2025.104592>

Xu, S., Su, P., Liang, Y., Li, Y., Long, W., & Xu, M. (2025). Glacier lake outburst floods (GLOF) susceptibility in the Boqu Basin in Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 22(2), 505-520. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11629-024-9049-2>

Yang, X., Wang, N., & Zhang, Y. (2025). Impacts of Changes in Natural Factors and Human Activities on Surface Water Variations in the Aral Sea Basin. *Hydrological Processes*, 39(8). Scopus. <https://doi.org/10.1002/hyp.70237>

Yarleque, C., Vuille, M., & Hardy, D. R. (2023). Temperature trends in the tropical Andes: Elevation-dependent warming patterns. *Environmental Research*

Zemp, M., et al. (2019). The global glacier decline: The state of glaciers in 2019. *Frontiers in Earth Science*, 7, 349.

Zhang, G., Yao, T., Xie, H., Wang, W., & Yang, W. (2015). An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. *Global and Planetary Change*, 131, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.05.013>

Zhang, G., Yao, T., Xie, H., Wang, W., & Yang, W. (2015). An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming. *Global and Planetary Change*, 131, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.05.013>.

Zhang, Z., Blake Cohen, J., Qin, K., Wang, S., Guan, L., Liu, Z., & Tiwari, P. (2025). Light-Absorbing Aerosol Characteristics and Radiation Forcing Simulation in Zhundong Coalfield. *Guangxue Xuebao/Acta Optica Sinica*, 45(12). Scopus. <https://doi.org/10.3788/AOS241868>

ANEXOS

Anexo 1.

Matriz para operacionalizar las variables del estudio

VARIABLES	EXPLICACIÓN CONCEPTUAL	EXPLICACIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Independiente: Retroceso glaciar	Disminución de la masa glaciar superficial.	Medición del retroceso en términos de metros cuadrados perdidos a lo largo del tiempo (1990-2024) mediante imágenes satelitales Landsat procesadas en ArcGIS.	Variación temporal	Superficie glaciar perdida por año	km ²
			Variación espacial	Detección de cambio cartográfico	-
			Proyección espacial	Superficie glaciar proyectada para 2030, 2035, 2040	km ²
Independiente: Superficie de las lagunas glaciares	Área total ocupada por las lagunas formadas por el retroceso glaciar. A mayor superficie, mayor es el volumen potencial de agua acumulada.	Se medirá la superficie en metros cuadrados de las lagunas formadas entre 1990 y 2024 utilizando imágenes satelitales	Variación temporal	Superficie glaciar perdida por año	km ²
			Variación espacial	Detección de cambio cartográfico	-
Dependiente: Zonas vulnerables a la deglaciación	Identificación de las áreas más vulnerables a los efectos del retroceso glaciar en los nevados de Huaylas y Yungay.	Análisis de las zonas vulnerables mediante el modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico) aplicado en un entorno geoespacial (ArcGIS), considerando factores como pendiente, altitud, exposición solar, precipitación y temperatura.	Nivel de vulnerabilidad	Clasificación de las zonas vulnerables (alto, medio y bajo nivel de vulnerabilidad).	Cualitativa

Anexo 2.

Matriz de consistencia

PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
GENERAL	GENERAL	GENERAL		
¿Cuáles son los cambios multitemporales en la dinámica glaciaria en los nevados de Huaylas y Yungay, Áncash, durante el período 1990-2024, evaluados mediante técnicas de teledetección?	Realizar una evaluación multitemporal de los cambios en la dinámica glaciaria en los nevados de Huaylas y Yungay, Áncash, mediante el uso de técnicas de teledetección en el período 1990-2024.	El análisis multitemporal mediante técnicas de teledetección permite identificar y evaluar de manera precisa los cambios en la dinámica glaciaria en los nevados de Huaylas y Yungay, Áncash, durante el período 1990-2024.	La investigación es descriptiva y predictiva.	
ESPECIFICO	ESPECIFICO	ESPECIFICO	El enfoque es cuantitativo, basado en el análisis de imágenes satelitales y técnicas de teledetección.	Población: Glaciares y lagunas entre 4,000 y 6,000 msnm. Muestra: Nevados de Huaylas y Yungay.
<ul style="list-style-type: none"> •¿Cuál ha sido el retroceso glaciario en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024 según el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI)? •¿Cómo ha influido el derretimiento de los glaciares en la formación de lagunas glaciares en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, según el análisis con el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI)? • ¿Cuáles son los escenarios futuros de 	<ul style="list-style-type: none"> •Determinar el retroceso glaciario en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024 utilizando el índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI). •Determinar la formación de lagunas glaciares a partir del derretimiento de los glaciares entre 1990 y 2024, utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI). •Determinar escenarios futuros de retroceso glaciario y la formación de 	<ul style="list-style-type: none"> •El Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) permite determinar con precisión el retroceso glaciario en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024. •Se espera que el derretimiento glaciario haya generado una formación significativa de lagunas glaciares en los nevados de Huaylas y Yungay entre 1990 y 2024, lo que se puede identificar a través del análisis con el índice NDWI. 	El diseño es longitudinal y no experimental, abarcando desde 1990 hasta 2024.	

<p>retroceso glaciar y la formación de lagunas glaciares en los nevados de Huaylas y Yungay para los años 2030, 2035 y 2040, basado en las tendencias actuales?</p> <p>• ¿Cuáles son las zonas vulnerables a la deglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay identificadas mediante la aplicación del modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico)?</p>	<p>lagunas glaciares para los años 2030, 2035 y 2040, mediante el análisis de tendencias actuales.</p> <p>•Identificar las zonas vulnerables a la deglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay mediante la aplicación del modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico).</p>	<p>•Es posible proyectar escenarios futuros de retroceso glaciar y la formación de lagunas glaciares para los años 2030, 2035 y 2040, siguiendo las tendencias actuales observadas entre 1990 y 2024.</p> <p>•El modelo AHP permite identificar las zonas más vulnerables a la deglaciación en los nevados de Huaylas y Yungay.</p>		
---	---	---	--	--

Anexo 3.

Descripción de las imágenes Landsat

Tabla 7

Datos de las misiones Landsat 5 y 8 OLI

Sensor	Resolución Espectral	Resolución Espacial	Resolución temporal	Resolución Radiométrica	
Ld 5 TM	7 bandas	Bandas 1 a 5 y 7	30 metros	16 días	8 bits
		Banda 6	120 metros		
Ld 8 OLI-TIRS	11 bandas	Bandas 1 a 7 y 9	30 metros	16 días	16 bits
		Banda 8	15 metros		
		Bandas 10 y 11	120 metros		

Fuente: (USGS, 2014)

Tabla 8

Imágenes Landsat consideradas en el estudio

Año	Satelite	Fecha de Imagen Obtenida	Path/Row	% nubosidad
1990	LT 5 TM	12/05/1990	008/070	0% a 2%
1994	LT 5 TM	8/05/1994	008/070	0% a 2%
1998	LT 5 TM	27/06/1998	008/070	0% a 2%
2002	LT 5 TM	8/07/2002	008/070	0% a 2%
2006	LT 5 TM	19/07/2006	008/070	0% a 2%
2010	LT 7 TM	12/05/2010	008/070	0% a 2%
2014	LT 8 TM	22/05/2014	008/070	0% a 2%
2018	LT 8 TM	12/07/2018	008/070	0% a 2%
2022	LT 8 TM	30/05/2022	008/070	0% a 2%
2024	LT 8 TM	28/05/2024	008/070	0% a 2%