

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**

“INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y  
EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LOS CAMBIOS DE LA  
COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO HUAYHUASH  
DURANTE EL PERIODO INTERANUAL 1988-2022,  
ANCASH”

Tesis para optar al título profesional de:

**Ingeniera Ambiental**

**Autor:**

Aurora Shessira Hoyos Garcia

**Asesor:**

M.Sc. Haniel Josue Torres Joaquin  
<https://orcid.org/0000-0001-9659-4250>

Lima – Perú

## JURADO EVALUADOR

|               |                                    |                 |
|---------------|------------------------------------|-----------------|
| Jurado 1      | <b>Carlos Alberto Alva Huapaya</b> | <b>06672420</b> |
| Presidente(a) | Nombre y Apellidos                 | N.º DNI         |

|          |                                      |                 |
|----------|--------------------------------------|-----------------|
| Jurado 2 | <b>Denisse Milagros Alva Mendoza</b> | <b>45535817</b> |
|          | Nombre y Apellidos                   | N.º DNI         |

|          |   |                 |
|----------|---|-----------------|
| Jurado 3 | <b>Marieta Eliana Cervantes Peralta</b> | <b>29425048</b> |
|          | Nombre y Apellidos                      | N.º DNI         |

## INFORME DE SIMILITUD

### INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LOS CAMBIOS DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO HUAYHUASH DURANTE EL PERIODO INTERANUAL 1988-2022, ANCASH"

#### INFORME DE ORIGINALIDAD

**4%**

INDICE DE SIMILITUD

**4%**

FUENTES DE INTERNET

**0%**

PUBLICACIONES

**0%**

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

#### ENCONTRAR COINCIDENCIAS CON TODAS LAS FUENTES (SOLO SE IMPRIMIRÁ LA FUENTE SELECCIONADA)

6%

★ [hdl.handle.net](https://hdl.handle.net)

Fuente de Internet

Excluir citas  Activo

Excluir bibliografía  Activo

Excluir coincidencias  < 1%

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a toda mi familia. Principalmente, a mi papá y mamá Lola que  
me apoyaron y creyeron todo el tiempo en mí.

Gracias por estar a mi lado, acompañándome en este largo camino.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por permitirme lograr mi más grande objetivo, a la Universidad Privada del Norte y a los docentes por las enseñanzas brindadas; a mi mamá Lola por darme sus consejos para seguir con mi meta trazada y por confiar en mí en todo momento.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| JURADO EVALUADOR   | 2  |
| INFORME DE SIMILITUD                                     | 3  |
| DEDICATORIA  | 4  |
| AGRADECIMIENTOS  | 5  |
| ÍNDICE DE CONTENIDO                                      | 6  |
| ÍNDICE DE TABLA  | 9  |
| ÍNDICE DE FIGURAS  | 10 |
| ÍNDICES DE ANEXOS  | 11 |
| RESUMEN  | 12 |
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN                                 | 13 |
| 1.1. Realidad Problemática                               | 13 |
| 1.2. Antecedentes:                                       | 16 |
| 1.3. Marco Teórico                                       | 22 |
| 1.3.1 Unidades glaciológicas y características           | 22 |
| a) Componentes de un glaciar                             | 22 |
| b) Balance de masa glaciar                               | 24 |
| c) Formación y dinámica de los glaciares                 | 24 |
| 1.3.2 Glaciares Tropicales                               | 25 |
| a) Importancia de glaciar tropical                       | 26 |
| b) Los factores que modifican el balance de masa         | 27 |
| c) Impactos del Cambio Climático en Glaciares Tropicales | 28 |
| d) Riesgos asociados al retroceso de los glaciares       | 29 |
| 1.3.3 Elementos Climáticos                               | 29 |
| a) Factores que condicionan el clima                     | 31 |
| 1.3.4 Teledetección y características                    | 32 |
| b) FIRMA ESPECTRAL                                       | 33 |
| c) Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI)        | 34 |
| 1.4. Marco Conceptual                                    | 35 |
| 1.4.1 Superficie glaciar                                 | 35 |
| 1.4.2 Cambio climático                                   | 35 |

|                          |   |    |
|--------------------------|---|----|
| 1.4.3                    | Información climática PISCO “ <i>Peruvian Interpolated data of the SENAMHI’s Climatological and hydrological Observations</i> ” | 36 |
| 1.4.4                    | Deglaciación  | 36 |
| 1.4.5                    | La imagen satelital   | 36 |
| 1.5.                     | Formulación de Problema   | 37 |
| 1.6.                     | Justificación   | 38 |
| 1.7.                     | Objetivos   | 39 |
| 1.8.                     | Hipótesis   | 40 |
| CAPÍTULO II. METODOLOGÍA |   | 41 |
| 2.1                      | Tipo de investigación   | 41 |
| 2.2                      | Población y muestra   | 41 |
| 2.3                      | Inclusión y Exclusión:  | 42 |
| 2.4                      | Técnicas e instrumentos de recolección de datos   | 43 |
| 2.5                      | Procedimientos:   | 44 |
| 2.5.1                    | Recolección de Imágenes Satelitales e Información Cartográfica  | 44 |
| 2.5.2                    | Preprocesamiento de imágenes Landsat  | 46 |
| 2.5.3                    | Determinación de la cobertura glaciar mediante el NDSI  | 46 |
| 2.5.4                    | Valores climáticos promedios a nivel de superficie  | 50 |
| 2.6                      | Análisis de datos   | 53 |
| 2.7                      | Aspectos Éticos   | 54 |
| CAPÍTULO III. RESULTADOS |   | 55 |
| 3.1                      | Dinámica espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2022:                            | 55 |
| 3.1.1                    | Análisis del cambio superficial de cobertura glaciar:   | 55 |
| 3.1.2                    | Análisis cartográfico del cambio superficial del nevado Huayhuash:  | 56 |
| 3.1.3                    | Estimación a futuro de la cobertura glaciar del nevado Huayhuash:   | 59 |
| 3.2                      | Comportamiento de los elementos climáticos en el nevado Huayhuash:  | 60 |
| 3.2.1                    | Precipitación ambiental en el nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2022:  | 60 |
| 3.2.2                    | Temperatura máxima, mínima y promedio en el nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2016:                                      | 61 |
| 3.2.3                    | Evapotranspiración potencial en el nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2016:   | 62 |
| 3.3                      | Análisis estadísticos de la cobertura glaciar, precipitación, temperatura y evapotranspiración:                                 | 63 |
| 3.3.1                    | Análisis estadístico descriptivo  | 63 |
| 3.3.2                    | Análisis inferencial  | 64 |
| A.                       | Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks   | 64 |

|   |    |
|---|----|
| B. Prueba de ANOVA y Regresión Lineal Simple-Múltiple | 64 |
| CAPÍTULO IV. DISCUSIONES                              | 69 |
| CAPÍTULO V. CONCLUSIONES                              | 78 |
| BIBLIOGRAFIA  | 80 |
| ANEXOS  | 93 |



## ÍNDICE DE TABLA

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Características de las misiones Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI.....      | 45 |
| Tabla 2. Escenas consideradas para el estudio .....                             | 45 |
| Tabla 3. Resumen del Modelo de Regresión Simple.....                            | 59 |
| Tabla 4. Coeficientes del modelo de regresión lineal Simple .....               | 59 |
| Tabla 5. Resultados del análisis descriptivo de las variables .....             | 63 |
| Tabla 6. Resultados de la prueba de normalidad .....                            | 64 |
| Tabla 7. Prueba ANOVA para precipitación.....                                   | 65 |
| Tabla 8. Prueba ANOVA para determinar influencia de temperatura máxima.....     | 65 |
| Tabla 9. Prueba ANOVA para determinar influencia de temperatura mínima .....    | 65 |
| Tabla 10. Prueba ANOVA para determinar influencia de temperatura promedio ..... | 65 |
| Tabla 11. Prueba ANOVA para determinar influencia de evapotranspiración .....   | 66 |
| Tabla 12. Prueba de autocorrelación .....                                       | 66 |
| Tabla 13. Resumen de Modelo de Regresión Lineal Simple .....                    | 67 |
| Tabla 14. Resumen de Modelo de Regresión Lineal Múltiple .....                  | 68 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Componentes de un glaciar .....   | 23 |
| <b>Figura 2.</b> Distribución de los Glaciares en los Trópicos .....                         | 25 |
| <b>Figura 3.</b> Regímenes de los Glaciares Tropicales exteriores.....                       | 26 |
| <b>Figura 4.</b> Firma Espectral de la nieve y el agua .....                                 | 34 |
| <b>Figura 5.</b> Frecuencia de valores del índice NDSI y punto de quiebre .....              | 35 |
| <b>Figura 6.</b> Mapa de ubicación del nevado en estudio .....                               | 43 |
| <b>Figura 7.</b> Imágenes Landsat de la plataforma USGS .....                                | 46 |
| <b>Figura 8.</b> Índice NDSI y combinación de banda falso color .....                        | 47 |
| <b>Figura 9.</b> Umbral de quiebre del NDSI .....  | 48 |
| <b>Figura 10.</b> Cobertura glaciar en formato GRID.....                                     | 48 |
| <b>Figura 11.</b> Cobertura glaciar en formado vectorial .....                               | 49 |
| <b>Figura 12.</b> Edición vectorial de la cobertura glaciar.....                             | 49 |
| <b>Figura 13.</b> Geometría superficial de la cobertura glaciar .....                        | 50 |
| <b>Figura 14.</b> Panorama del programa R y Rstudio .....                                    | 51 |
| <b>Figura 15.</b> Script para información climática a nivel de superficie.....               | 51 |
| <b>Figura 16.</b> Diagrama de flujo de los procedimientos .....                              | 52 |
| <b>Figura 17.</b> Cambio superficial del nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2022 ..... | 55 |
| <b>Figura 18.</b> Mapa temporal de la cobertura glaciar (hielo y nieve) .....                | 57 |
| <b>Figura 19.</b> Mapa temporal de la cobertura glaciar (hielo y nieve) .....                | 58 |
| <b>Figura 20.</b> Variación temporal de la precipitación .....                               | 60 |
| <b>Figura 21.</b> Variación temporal de la temperatura máxima, mínima y promedio .....       | 61 |
| <b>Figura 22.</b> Variación temporal de la temperatura máxima, mínima y promedio .....       | 62 |

## ÍNDICES DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| Anexo 1. Ficha de Registro de cobertura glaciar.....                           | 93  |
| Anexo 2. Registro de precipitación superficial y temperatura superficial ..... | 94  |
| Anexo 3. Matriz de Operacionalización de Variables (MOV).....                  | 101 |

## RESUMEN

El propósito de la investigación actual fue analizar cómo la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración influyen en los cambios de la cobertura glaciar del nevado Huayhuash en Ancash durante el período comprendido entre 1988 y 2022. Para ello, se marcó un estudio de tipo aplicado, con nivel explicativo y diseño longitudinal no experimental, pues se dio análisis temporal de 1988 a 2022. La técnica aplicada fue la teledetección y el uso del índice NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve), para el reconocimiento del glaciar se consideró la fragmentación de barras y la edición manual. La información climática de precipitación (1988-2022), temperatura y evapotranspiración (1988-2016) fue adquirida del producto grillado PISCO-SENAMHI. Los resultados demostraron un descenso de cobertura glaciar a ritmo de 0.74 km<sup>2</sup>/año. En cuando el análisis estadístico de ANOVA y regresión, se pudo reflejar que la temperatura es el único factor influyente en los cambios de cobertura glaciar, esto de forma estadística; porque, la precipitación y la evapotranspiración si forman parte dentro del sistema del balance glaciológico, pero sus influencias no son significativas en los cambios superficiales del nevado Huayhuash. En cuanto a la variabilidad climática, se evidencia que la precipitación como la evapotranspiración muestran comportamientos muy variados, sin embargo, la temperatura muestra un comportamiento homogéneo.

**Palabras claves:** Temperatura, precipitación, evapotranspiración potencial, cobertura glaciar y teledetección.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad Problemática

La Autoridad Nacional del Agua (2014) ha señalado que los glaciares tropicales son buenos indicadores de los cambios climáticos. En los Andes peruanos, que están ubicados en los trópicos externos, se pueden identificar dos temporadas: la temporada de precipitaciones (de diciembre a marzo) y la temporada seca (de abril a noviembre). Ambas tienen un impacto en la ablación, que ocurre durante todo el año, y en la acumulación, que se produce durante la temporada de precipitaciones. Sin embargo, las proporciones del impacto de cada temporada varían según las condiciones climáticas (Kaser et al., 2002). En este contexto, los glaciares funcionan como reservas de agua que regulan el caudal durante todo el año y almacenan agua durante la temporada húmeda para liberarla durante la temporada seca (Vignon, 2002).

Debido a que la ablación ocurre durante todo el año en los glaciares tropicales, estos son especialmente susceptibles a los cambios en las condiciones atmosféricas y terrestres, como las variaciones en la temperatura del aire, precipitaciones, humedad y nubosidad. Esto se debe a que se encuentran en los trópicos (Vuille et al., 2008). Por lo tanto, los glaciares tropicales son excelentes indicadores de los procesos climáticos (Francou, 2015).

El calentamiento global, que se ha intensificado debido a la actividad humana, comenzó a mediados del siglo XIX (Oerlemans, 2005). Durante el siglo XXI, este calentamiento se ha reflejado en variaciones atmosféricas como la precipitación, la temperatura y la evaporación, según Polk et al. (2017). La consecuencia más perceptible por las variabilidades atmosféricas son los cambios superficiales y volumétricos de los glaciares ubicadas en zonas de montaña (Lundgren et al., 2015). Según López (2021), el análisis de imágenes satelitales ha

demostrado que los glaciares de todo el mundo perdieron alrededor de 267 gigatoneladas de masa glaciaria anualmente durante el período de 2000 a 2019.

Las unidades glaciológicas de montaña son ecosistemas fríos que están muy expuestos a la variabilidad climática, lo que los convierte en una herramienta adecuada para evaluar el cambio climático (Autoridad Nacional del Agua, 2014). El área de ablación es la zona más impactada en una unidad de glaciología, debido a que es la más sensible al aumento de la temperatura ambiental (Kaser y Osmaston, 2002). Estos cambios en los glaciares tienen graves consecuencias, como el desequilibrio en el balance hidrológico en un sistema de red de drenaje (Vignon, 2002), pues la mayor deglaciación provocaría mayor entrada hídrica por escorrentía y su pérdida por escorrentía (Vaughan, et al., 2013). La pérdida de estas reservas hídricas, también provocan una disminución en las cantidades de agua dulce (IPCC [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático], 2014).

Debido a su ubicación por encima de los 4000 msnm, los glaciares de montaña son los más afectados por las variables climáticas, como la temperatura, los cambios en las precipitaciones y la radiación (ANA [Autoridad Nacional del Agua], 2014; Reinthaler et al., 2019). La reducción de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas son las situaciones más desfavorables para los glaciares, ya que provocan una mayor aceleración en su retroceso y la desaparición irreversible de su masa glaciaria (Franco, 2015). Esto coincide con la aceleración del retroceso glaciario, lo que genera una pérdida irreversible de masa glaciaria sin posibilidad de recuperación (Mardones et al., 2018).

De acuerdo con Arroyo y Gurmendi (2011), el 70% de los glaciares tropicales del mundo se encuentran en el territorio peruano, mientras que el resto se ubica en áreas de Sudamérica, principalmente en la cordillera de los Andes. En Perú, los glaciares están divididos en tres sectores: norte, centro y sur, siendo la zona central donde se concentra la mayor cantidad de

ellos (ANA, 2012). Actualmente, los glaciares altoandinos peruanos representan una importante fuente de entrada de agua para las cuencas hidrográficas (Autoridad Nacional del Agua, 2012). Por lo tanto, es fundamental contar con conocimientos precisos sobre la cantidad, distribución y dinámica de los glaciares, ya que son componentes clave para el desarrollo de los ecosistemas y la disponibilidad de agua (Lopez, 2021).

De acuerdo con Reintaler (2019), en Perú la temperatura ha aumentado en 0.75 °C durante los últimos 100 años, lo que sugiere que el país es uno de los más afectados por el cambio climático. Este incremento ha provocado la completa pérdida de la cobertura glaciar de la cordillera Barroso en la zona altoandina de Tacna, según el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM [Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña], 2010). Asimismo, en las últimas cuatro décadas, Perú ha perdido 750 km<sup>2</sup> de área glaciar, lo que equivale a una disminución del 42.52% de la masa glaciar (Gonzales, 2015). La disminución de las masas glaciares altoandinas en el territorio peruano conduce a la pérdida de una fuente de agua que beneficia directamente a las actividades agropecuarias y otras actividades productivas, así como a las poblaciones rurales (INAIGEM, 2016). Además, el retroceso glaciar puede dar lugar a una mayor formación de lagunas glaciares y aumentar el riesgo de inundaciones, como ocurrió en el callejón de Huaylas (TUNUPA, 2010).

La cobertura glaciar del nevado Huayhuash no es ajeno ante los problemas mencionados, pues se localiza en la parte norte de los nevados del Perú, dentro del departamento de Ancash a una altitud de 4150 msnm. (INAIGEM, 2016). Este nevado en estudio es proveedor hídrico principal de los centros poblados Huallapa, Huramasa, Llamac y Llaclla (Gonzales, 2012). Asimismo, el glaciar alimenta a quebradas, manantiales y acuíferos, permitiendo el

desarrollo de actividades productivas de la población rural (MINAM [Ministerio del Ambiente], 2019).

En este estudio se ha tomado en cuenta el uso de información satelital debido a su eficacia y facilidad tecnológica para detectar y medir cambios temporales en la cobertura glaciar (Ding et al., 2019). Este enfoque representa una alternativa de bajo costo para evaluar los cambios y monitorear el retroceso glaciar de Huayhuash (Pasapera, 2009).

## **1.2. Antecedentes:**

El estudio "Factores ambientales de temperatura y precipitación que afectan la dinámica del glaciar de montaña Pastoruri" fue realizado por Castillo (2017), con el objetivo de determinar cómo los factores climáticos de precipitación y temperatura se relacionan con los cambios en la cobertura glaciar del nevado Pastoruri. Este estudio tuvo un diseño correlacional y no experimental, ya que se utilizó un análisis de correlación para examinar los datos. Para identificar la cobertura glaciar, se utilizó la teledetección con el índice NDSI, que permitió detectar la superficie glaciar. En el estudio, se consideró que el valor óptimo para identificar la cobertura glaciar fue de valores superiores a 0.42. El periodo de análisis es desde 1997 a 2016. El registro climático fue adquirido del producto grillado PISCO-SENAMHI. Los resultados indican una pérdida de cobertura glaciar de 51.7 ha en un periodo de 19 años. Los registros de temperatura se encuentran en descenso a una magnitud de 0.025°C/año y la precipitación muestra un incremento ligero de 0.71 mm/año. El análisis de correlación reflejó una asociación significativa inversa de 0.75 entre la temperatura y la cobertura glaciar, situación que no fue reflejada entre la asociación de precipitación y cobertura glaciar. Por tanto, la temperatura es la que más afecta un glaciar, debido a que afecta la estructura física.



El estudio de Mardones y sus colaboradores (2017), llamado "Retrosceso glacial reciente en el Campo de Hielo Norte, región de Aysén, Chile: relación con variaciones climáticas", tuvo como objetivo investigar las fluctuaciones temporales de la cobertura glacial y analizar la relación entre las variaciones climáticas y la cobertura glacial. El enfoque metodológico utilizado en el estudio fue correlacional, ya que se buscó establecer una asociación lineal entre las variaciones climáticas y la cobertura glacial. Los factores climáticos que se consideraron en el estudio incluyeron la precipitación, la temperatura máxima y la temperatura mínima de las estaciones meteorológicas en Aysén y Balmaceda, proporcionadas por el Instituto Meteorológico de Chile. Los resultados revelaron una reducción de cobertura glacial de 12 km<sup>2</sup> durante el período 1990-2018. El análisis estadístico reflejó una correlación inversa alta entre la temperatura máxima y la cobertura glacial de 0.78, esto indica que los cambios de la cobertura glacial son explicados en 78% por el incremento de la temperatura máxima. La precipitación no mostró asociación estadística con los cambios de la cobertura glacial, sin embargo, esto no indica que las precipitaciones no son factores primordiales para la formación glacial, puesto que es necesario para la formación de nieve y hielo.

El estudio "Evolución de la cobertura glacial del nevado Coropuna y su relación con el entorno climático" fue llevado a cabo por Ramos (2018), con el propósito de examinar la cobertura glacial durante el periodo 1987 y 2015 y su relación con las condiciones climáticas. La investigación se basa en un enfoque correlacional, en el que se utiliza la prueba estadística de Pearson para determinar la asociación entre las variables. Para evaluar la cobertura glacial, se empleó el Índice Normalizado de Diferenciación de Nieve (NDSI), con valor de quiebre de 0.35, para la obtención de solo la cobertura glacial. Los datos climáticos fueron obtenidos del registro climático del SENAMHI. Los resultados demostraron una reducción superficial de 19.4 % lo que es aproximadamente 10.4 km<sup>2</sup>. La

dinámica de la precipitación mostró que no hay variabilidad significativa, el cual fue diferente a la temperatura, puesto que tiene incrementos significativos de  $0.025^{\circ}\text{C}/\text{año}$ . El análisis estadístico de correlación Pearson indicó que hay una asociación de 0.6 entre la temperatura y la cobertura glaciar, esto quiere decir que los cambios ocurridos en el glaciar durante el periodo de 28 años, es a causa en un 60% por el incremento de la temperatura evidenciado.

En su investigación titulada "Evolución de la Cobertura Glaciar del Nevado Ananea entre 1985-2018", Cuadros-Amanqui (2019) tuvo como objetivo examinar la variación de la cobertura glaciar en el tiempo. Para lograr esto, se llevó a cabo un análisis evolutivo mediante una metodología descriptiva-inferencial, y se empleó un análisis estadístico de regresión para hacer una proyección de la cobertura glaciar en el futuro. El estudio se basó en el uso del índice NDSI, que es un índice normalizado para nieve, con valores mayores a 0.35 que indican la existencia de cobertura glaciar. Los resultados indicaron una reducción acumulada de  $8.02 \text{ km}^2$ , el cual se vio reflejado en un incremento superficial de lagunas de  $0.75 \text{ km}^2$ . El análisis de regresión para estimación futura, refleja que para el año 2030 la cobertura glaciar tendría un descenso acumulativo de  $14.72 \text{ km}^2$ , lo que indicaría una reducción del 60% en comparación al periodo 1985.

Xiang et al. (2018) llevaron a cabo una investigación titulada "Características del cambio climático y sus efectos sobre el derretimiento de la nieve glaciar en Xinjiang, China", con el objetivo de analizar la cobertura glaciar espacial y temporal del nevado Tianshan desde 1961 hasta 2016. El estudio se basó en una metodología descriptiva longitudinal, que se centró en describir los cambios ocurridos en la cobertura glaciar y en los elementos climáticos de precipitación, temperatura mínima y máxima. Para medir la cobertura glaciar, se utilizó la teledetección para digitalizar y poligonizar los cambios en la cobertura glaciar. Por otro lado,

los datos climáticos se obtuvieron de información local de la región de Xinjiang. Los resultados del estudio indicaron una reducción del 70% en la cobertura glaciaria en un período de 55 años. La temperatura fue el factor climático que mostró la mayor variación, con un aumento de 1°C, mientras que la precipitación tuvo una variabilidad múltiple, lo que dificulta su predicción. En comparación, la temperatura tuvo un mayor efecto en los cambios de la cobertura glaciaria, ya que cuando superaba los 13°C, se producía una disminución significativa en la cobertura glaciaria debido a que la formación de nieve y hielo depende de la temperatura ambiente.

En su investigación titulada "Análisis multitemporal del retroceso glaciario en la sierra nevada de Santa Marta - Colombia para los años 1986, 1996, 2007 y 2014", Páez y García (2016) se propusieron evaluar el retroceso del glaciario de la Sierra Nevada de Santa Marta en diferentes momentos del tiempo. La metodología utilizada fue de tipo descriptiva, ya que el objetivo principal era conocer la disminución de la cobertura glaciaria en distintos períodos. Para llevar a cabo la medición de la cobertura glaciaria, se utilizaron imágenes satelitales Landsat y se aplicó el índice NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve) como técnica de medición, a este último se aplicó la clasificación supervisada con 40 unidades de entrenamiento para la obtención única de cobertura glaciaria. Los resultados indicaron mayor pérdida de cobertura en el tramo 1996 -2014 con 48% de descenso, en comparación al tramo 1986-1996 el cual solo tuvo una pérdida de 20%. La investigación concluye que este descenso acelerado puede ser a causa del calentamiento global planetario y de factores locales.

En su estudio "Evolución temporal de la cobertura glaciaria en función de la variabilidad climática en glaciares de Los Andes semiáridos, zona Central de Chile", Ulloa (2020) se propuso relacionar la cobertura glaciaria con los elementos climáticos de precipitación y

temperatura mediante periodo de 30 años. El objetivo del estudio fue identificar la asociación lineal temporal entre la cobertura glaciar y los elementos climáticos mencionados anteriormente. La investigación se enmarca dentro del tipo correlacional, ya que se busca conocer la relación numérica entre la cobertura glaciar y los elementos climáticos mencionados. Para la medición de la cobertura glaciar se dio uso de las imágenes Landsat con una periodicidad de 1989 a 2019. Los elementos climáticos fueron adquiridos de la plataforma digital de meteorología de Chile. Los resultados reflejaron una reducción de 47% de cobertura glaciar en 30 años. La precipitación muestra un descenso lineal de 3 mm/año; y la temperatura media reflejó un incremento de 0.0067°C/año. El estadístico de Pearson reflejó que la temperatura se relaciona en 0.68 con la cobertura glaciar, de forma significativa con un p.value menor a 0.05. Esta situación no fue reflejada en la relación con la precipitación, pues resultó poco significativa con un R de 0.25. En conclusión, la temperatura es el elemento de mayor repercusión en los cambios glaciares, debido a la alteración de la composición física del cristal de hielo.

Flores (2022) llevó a cabo una investigación titulada "Análisis cuantitativo de variabilidad climática en relación a la pérdida de nevados peruanos 2010-2020", en la que se propuso examinar cómo la variabilidad climática afecta la cobertura glaciar en un período de 10 años. El objetivo principal del estudio fue analizar la relación entre los datos de temperatura y precipitación y la cobertura glaciar, utilizando la regresión múltiple para evaluar la magnitud de la influencia de estos factores. La metodología utilizada en el estudio es descriptiva, ya que se centra en analizar los datos climáticos y su impacto en la cobertura glaciar. Los nevados en estudio fueron el Verónica y el Huaytapallana. Los resultados reflejaron que no hubo influencia de precipitación y temperatura en los cambios de cobertura glaciar del nevado Verónica, puesto que mostraron p.values superiores a 0.05. Esto se debió a que se encuentra ubicado en una zona fría del centro del Perú. situación que fue contraria al nevado

Huaytapallana, donde el análisis de regresión múltiple reflejó que la temperatura tuvo influencia con un p-value inferior a 0.05. Esto se debió a que la temperatura ambiental mostró mayor ascenso en comparación al nevado Veronica, superando en 0.002 °C. Finalmente se concluye, que una variabilidad climática alta de la temperatura provocó una respuesta clara en los cambios de la cobertura glaciar.

Ortega (2021) realizó un estudio titulado "La relación entre el comportamiento dinámico de la región glaciar del Nevado Santocoronado y los cambios en el clima circundante, Moquegua 2019", con el objetivo de determinar la relación entre la cobertura glaciar y los elementos climáticos precipitación y temperatura. El nivel investigativo es esencial para el proyecto no experimental, ya que intenta determinar las relaciones numéricas temporales entre los elementos climáticos y el comportamiento de la cubierta glaciar. Para ello se utilizó información meteorológica de cinco estaciones cercanas al nevado San Coronado. Se utilizó el NDSI (Índice de nieve de diferencia normalizada) aplicado a imágenes Landsat de 1990 a 2018 para identificar la cubierta glaciar. Los resultados muestran un ligero aumento de la precipitación de 1,02 mm/año y un aumento de la temperatura media de 0,1 °C/año. Sin embargo, el área cubierta por glaciares ha disminuido un 55%, de 9,6 kilómetros cuadrados en 1990 a 4,06 kilómetros cuadrados en 2018. Una prueba de correlación de Pearson mostró una relación significativa entre la temperatura y la cobertura glaciar con un valor r de -0.607 y un valor p menor a 0.05, lo que indica que un aumento en la temperatura afecta la cobertura glaciar, causando que el estado físico del hielo cambie. cambiar de sólido a flotante, y en el peor de los casos la situación se evapora.

Peña et al. (2020), realizó un estudio titulado "Impactos del Cambio Climático en los Glaciares del Complejo Volcánico Nevados de Chillán" para investigar los cambios en la cobertura glaciar y su relación con elementos climáticos como la temperatura y la

precipitación. El estudio utiliza un tipo apropiado de enfoque longitudinal, centrándose en el período de análisis de 1999 a 2019. Para determinar la cobertura glaciar se utilizó el índice NDSI, que se refiere a valores entre 0,5 y 0,7 para la identificación de superficies glaciares. Datos climáticos del CR2 Climate Sounder en Chile. Los resultados mostraron que el glaciar se contrajo un 78,6% entre 1999 y 2000 y un 84,6% entre 2000 y 2019. Además, la temperatura ha disminuido de 15°C a 13,5°C en los últimos 20 años, y la precipitación ha disminuido significativamente de 220 mm de columna de agua a 62 mm. Los resultados de la correlación de Pearson muestran una correlación significativa entre el retroceso de los glaciares y la reducción de las precipitaciones con un valor  $r$  de 0,67. Esto sugiere que una reducción significativa en la precipitación tuvo un impacto significativo en la pérdida de la cubierta glaciar, lo que condujo a una pérdida significativa del balance de masa del glaciar, ya que la precipitación es la única entrada de agua que forma la nieve y el hielo.

### **1.3. Marco Teórico**

#### **1.3.1 Unidades glaciológicas y características**

Son masas de hielo conformadas de nieve escarchada, granizo o hielo sólido (IPCC, 2014). Y vuelve a estado líquido por acción de evaporación o sublimación, también es amenazado por deformación interna, provocando deslizamientos (INAIGEM, 2017). Los glaciares presentan dos zonas importantes, la acumulación y zona de ablación, ambas con características individuales y distintas. La línea que separa estas dos zonas es conocida como la línea de equilibrio ELA (Bórquez, 2007).

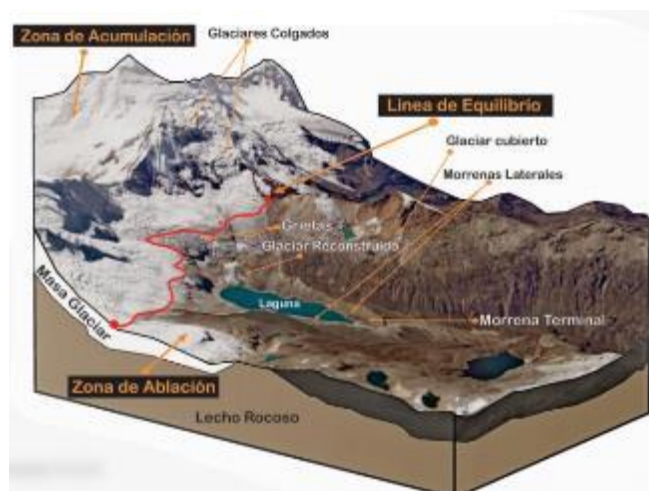
##### **a) Componentes de un glaciar**

- Zona de acumulación: zona caracterizada por acumular la nieve y su posterior formación a hielo, por su depresión y forma del relieve, es la zona presta a recibir las precipitaciones y no ser pérdidas por escorrentía (Francou et al., 2014).

- **Zona de Ablación:** Una zona de ablación es una región de un glaciar donde la pérdida de hielo es mayor que la acumulación de nieve y hielo fresco. En esta zona, el hielo se derrite o sublima más rápidamente que lo que se acumula, lo que resulta en una disminución de la masa glaciaria. La zona de ablación puede variar en tamaño y ubicación según el clima y las condiciones topográficas de la región (Francou et al., 2014).
- **Altitud de la línea de equilibrio (ELA):** La Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA, por sus siglas en inglés) es una medida que se utiliza en glaciología para describir la altitud de la superficie de un glaciar donde la acumulación de nieve es igual a la pérdida de hielo por fusión y/o sublimación (Knight, 1999). Es decir, la ELA representa el límite entre la zona de acumulación, donde se produce la acumulación de hielo, y la zona de ablación, donde se produce la pérdida de hielo. La ELA se utiliza comúnmente como una medida de referencia para describir los cambios en los glaciares a lo largo del tiempo y en diferentes regiones geográficas (Francou et al., 2014).

### **Figura 1.**

#### *Componentes de un glaciar*



Fuente: (INAIGEM, 2017 pág. 25)

**b) Balance de masa glaciar**

El balance glaciológico se debe a las dinámicas de pérdida y ganancia (Huddart & Stott, 2010), donde la ganancia hace referencia a la acumulación generada y las pérdidas hacen referencias a las ablaciones (UNEP, 2007). En un balance de masa glaciar, no solo se evalúa las ganancias y pérdidas, también se ven involucradas alteraciones superficiales, volúmenes y forma (Cuffey & Paterson, 2010, p. 91). Estos cambios permiten comprender los procesos involucrados en el dinamismo de un glaciar.

Si durante un año, la cantidad de nieve acumulada en un glaciar es mayor que la cantidad de hielo que se pierde por fusión y sublimación, se producirá un aumento en la masa del glaciar, lo que se reflejará en una expansión de su cobertura glaciar (Úbeda, 2010); caso contrario se evidenciará una disminución en la cobertura glaciar (Huddart y Stott, 2010). Asimismo, cuando hay mayor ablación, la línea ELA asciende por encima de la montaña, esto indica que las zonas de acumulación se ubicaran en las cumbres (Benn y Lehmkuhl, 2000).

**c) Formación y dinámica de los glaciares**

La formación glaciológica es gracias a la nieve proveniente de las precipitaciones sólidas, estas luego se transforman en hielo, perdiendo los poros de nieve y quedando como un cristal sólido y esférico (Tarbuck et al., 2005). Una vez conformada el hielo en su estructura cristalina, su permanencia depende de la temperatura ambiental y del intercambio de calor superficie-atmósfera (Geoestudios, 2008). Estas masas frías no son estáticas, pues se encuentran en constante movimiento por acción de la gravedad, ante su inestabilidad. La dirección de la dinámica es en dirección pendiente a bajo (Tarbuck & Lutgens, 2005).

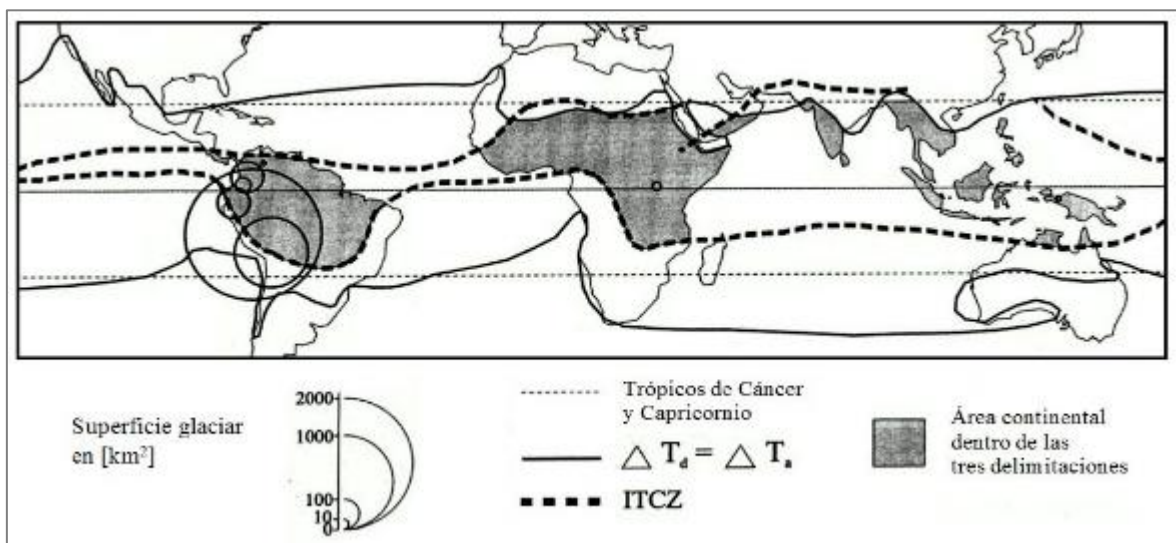


### 1.3.2 Glaciares Tropicales

Los glaciares tropicales son masas de hielo que se encuentran en regiones tropicales o cercanas a la línea ecuatorial, donde las temperaturas son relativamente cálidas en comparación con las regiones polares donde se encuentran la mayoría de los glaciares. Estos glaciares se encuentran en altitudes elevadas, generalmente a más de 4.500 metros sobre el nivel del mar, donde las temperaturas son lo suficientemente frías como para permitir la acumulación de nieve y hielo durante todo el año (Kaser & Osmaston, 2002). Los glaciares tropicales son importantes fuentes de agua dulce y reguladores del clima en las regiones donde se encuentran, y sus fluctuaciones pueden tener impactos significativos en las comunidades locales que dependen del agua de deshielo para la agricultura, el consumo humano y la generación de energía hidroeléctrica. Debido al cambio climático, los glaciares tropicales están experimentando una rápida disminución y algunos se están reduciendo a un ritmo acelerado, lo que tiene consecuencias significativas para las comunidades y ecosistemas que dependen de ellos (Huddart & Stott, 2010).

#### Figura 2.

*Distribución de los Glaciares en los Trópicos*

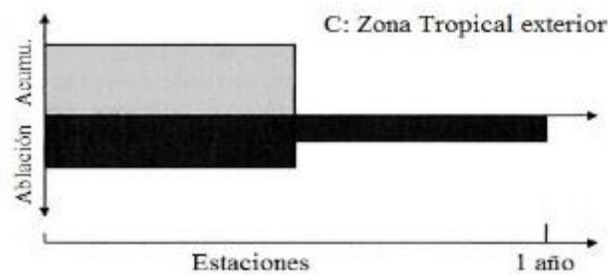


Fuente: (Kaser & Osmaston, 2002)

Hay dos períodos distintos: un período húmedo con una gran acumulación de hielo en relación con la pérdida, y un período seco con poca pérdida de hielo y sin acumulación (ver Figura 3) (Kaser, 1999). En los trópicos exteriores, la estación húmeda dura de noviembre a abril, donde el clima es tropical, mientras que la estación seca dura de mayo a octubre (Garreaud, 2009; Rabatel et al., 2013).

### Figura 3.

*Regímenes por estación de los Glaciares Tropicales*



Fuente: (Kaser & Osmaston, 2002)

#### a) **Importancia de glaciar tropical**

Los glaciares tropicales son importantes por varias razones:

- Fuentes de agua dulce: Los glaciares tropicales son una importante fuente de agua dulce para las comunidades locales que dependen del agua de deshielo para la agricultura, el consumo humano y la generación de energía hidroeléctrica (Painter, 2007).
- Reguladores del clima: Los glaciares tropicales regulan el clima local y regional al reflejar la radiación solar y al liberar agua dulce al ambiente (Bradley et al., 2006).
- Biodiversidad: Los glaciares tropicales son ecosistemas únicos y albergan una gran biodiversidad de flora y fauna adaptada a las condiciones de frío y humedad (Brown, 2013).

- Investigación científica: Los glaciares tropicales son importantes para la investigación científica debido a que proporcionan información sobre la historia climática y geológica de la región y pueden ayudar a predecir los efectos del cambio climático en los ecosistemas locales (Vuille et al., 2008).
- Turismo y recreación: Los glaciares tropicales son atractivos turísticos y ofrecen oportunidades para actividades recreativas como el senderismo y el esquí (Bradley et al., 2006).

**b) Los factores que modifican el balance de masa**

El balance de masa de un glaciar se refiere a la diferencia entre la cantidad de nieve acumulada y la cantidad de hielo que se pierde por fusión y/o sublimación. Varios factores pueden influir en el balance de masa de un glaciar, incluyendo (Asenjo, 2009):

- Temperatura: Las temperaturas más cálidas pueden aumentar la tasa de fusión del hielo, lo que reducirá el balance de masa del glaciar.
- Precipitación: La cantidad de nieve que cae en un glaciar puede influir en el balance de masa. Si hay una cantidad suficiente de nieve, puede haber un aumento en la cantidad de nieve acumulada, lo que aumentará el balance de masa.
- Altitud: La altitud del glaciar, y por lo tanto su temperatura, puede influir en el balance de masa. Los glaciares a mayor altitud pueden tener temperaturas más frías y, por lo tanto, experimentar menos fusión, lo que puede aumentar el balance de masa.
- Exposición al sol: La exposición al sol puede influir en la temperatura del hielo y, por lo tanto, en la tasa de fusión. Los glaciares que están expuestos al sol durante más tiempo pueden experimentar una mayor fusión, lo que disminuirá el balance de masa.

- **Topografía:** La topografía del glaciar puede influir en la cantidad de nieve que se acumula y la cantidad de hielo que se pierde. Por ejemplo, los glaciares en zonas con pendientes empinadas pueden experimentar una mayor pérdida de hielo debido a la gravedad.
- **Cambio climático:** El cambio climático puede influir en el balance de masa de los glaciares. El calentamiento global puede aumentar la tasa de fusión del hielo, lo que reducirá el balance de masa del glaciar y, en última instancia, puede llevar a la desaparición del glaciar (Knight, 1999; Huddart y Stott, 2010).

### c) **Impactos del Cambio Climático en Glaciares Tropicales**

Según el IPCC (2013), las variaciones en los elementos climáticos a nivel global son una señal del impacto del cambio climático. Asimismo, para ser atribuido al cambio climático y no una modificación de factores locales, se debe considerar decenios, siglos o milenios de la variabilidad en las magnitudes de los elementos climáticos (IPCC, 2014). Las fluctuaciones en la temperatura ambiental, que se han visto favorecidas por las variaciones climáticas, están afectando a los ecosistemas acuáticos, como la reducción del hielo en la criosfera, según lo señalado por Vaughan et al. (2013).

Según el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC (2013), la mayoría de los glaciares del mundo han disminuido en tamaño y masa, como lo confirman numerosas mediciones glaciológicas in situ y técnicas de teledetección. Drenhan et al. (2015) enfatizan que esta afirmación tiene un alto grado de credibilidad debido al creciente número de registros de cambio de glaciares.

Pronósticos indican que glaciares pequeños con dimensiones superficiales inferiores a 1 km<sup>2</sup> y con altitudes inferiores a 5400 msnm. dejarán de existir en una o dos décadas (Rabatel, et al., 2013).

#### **d) Riesgos asociados al retroceso de los glaciares**

Los riesgos asociados al derretimiento glaciar son el incremento de nivel de agua de los mares, con su posterior inundación (IPCC, 2013); asimismo, el derretimiento acelerado provoca el aumento de nivel de agua de las lagunas adyacentes y la formación de nuevas lagunas (Coudrain, et al., 2005), estas consecuencias provocan un peligro por desborde de fluido y su posterior deslizamiento de masas en forma de fluido (Casassa, et al., 2007).

El riesgo ante este evento de pérdida de cobertura glaciar, también se refleja en la afectación social de forma permanente (UNEP, 2013), pues la disminución de oferta hídrica en los territorios de montaña provoca alteraciones en la productividad agropecuaria (Rabatel et al., 2013). Por otro lado, la pérdida de cobertura glaciar afecta el valor paisajístico de un territorio, lo que es reflejado en sus entradas económicas (Chisolm et al., 2012).

#### **1.3.3 Elementos Climáticos**

La temperatura es una medida climática de lo caliente o fría que está la atmósfera, expresada en grados Celsius °C. (de Finn y Ravelo, 1983). Se espera que las temperaturas aumenten en los Andes durante las estaciones seca y húmeda. En el hemisferio sur, las temperaturas han aumentado 0,26 °C en los últimos 10 años, en comparación con una temperatura media anual de 13,4 °C en los últimos 30 años (Drenkhan et al., 2015). La interacción de la temperatura en los glaciares en mediante una pérdida de masa (Pizarro-Tapia et al., 2011), pues un incremento en la variabilidad provoca mayor punto de fusión del estado sólido a líquido (Zeballos et al., 2014), sobre todo las zonas de ablación, las cuales se ubican por lo general en zonas bajas de las montañas y estas tienen menor temperatura que las coberturas glaciares de la zona de acumulación (Rivera et al., 2000; Kozhikkodan et al., 2016; Zalazar et al., 2018).

La precipitación se genera cuando las partículas de agua presentes en la masa de aire saturada, comienzan a adquirir peso mediante la adhesión, para luego ser precipitada por acción de la gravedad (Aparicio, 2003). En el ciclo hidrológico las precipitaciones son el componente de entrada hídrica en un territorio altoandino, seguido se tiene a los glaciares como entrada hídrica anual (Castillo, 1996). Los cambios en la precipitación a lo largo del tiempo y en diferentes lugares pueden estar relacionados con eventos naturales extremos y el cambio climático. Sin embargo, Peixoto y Ort (1992) argumentaron que estas diferencias en la precipitación se deben más a factores locales dentro de áreas geográficas que principalmente a la circulación global. La interacción de la precipitación en las coberturas glaciares es de forma positiva (Hoffmann, 2015), estos procesos provocan la creación de nieve, la cual se acumula en las zonas de alta montaña y en las zonas de pérdida de hielo, de acuerdo con Groeber (2021) y Arroyo et al. (2015).. Otras precipitaciones son pérdidas por escorrentías, debido a que en las montañas muestras pendientes accidentadas, por lo cual es rápido el flujo de escorrentía (Brenning, 2003; Pouyaud et al., 1998)

De acuerdo con Sánchez et al. (2006), la evapotranspiración potencial (ETP) se refiere a la cantidad máxima de agua que se puede evaporar en un lugar y clima específico. Esta medida se expresa en milímetros de agua y tiene en cuenta la evaporación de la superficie compuesta por agua, vegetación y suelo. López et al. (2015) también señalan que la ETP se mide en milímetros de agua y se relaciona con la evaporación de la superficie suelo-vegetación-agua. La evapotranspiración potencial está influenciada por varios factores, como la radiación solar y terrestre, la temperatura ambiente, la humedad relativa, la presión atmosférica, la velocidad del viento, entre otros. Debido a la dificultad para medir esta variable, generalmente se calcula por medio de ecuaciones calibradas (Batra et al., 2005). La interacción de la evapotranspiración en la cobertura glaciaria, es negativa, pues esta genera la pérdida de cobertura glaciaria en estado de vapor (Melissa, 2022), estas se sitúan con mayor

presencia en las zonas de ablación, y en las nieves de zonas de baja altitud (Huayaney et al., 2018).

Según Obregón (2020), las condiciones climáticas en los Andes están determinadas por varios factores, entre ellos la altitud y las corrientes oceánicas, como El Niño en las fases cálidas y La Niña en las fases frías. Como señalaron Saavedra et al., estos factores climáticos, junto con los mencionados anteriormente, como la cobertura y la topografía de los glaciares, influyen en la masa y el movimiento de los glaciares andinos. (2011) e INAIGEM (2017).

#### **a) Factores que condicionan el clima**

Las características climáticas de un territorio son el resultado de diversos factores que alteran su estado natural, como la latitud geográfica, la altitud del terreno, la presencia de cordilleras montañosas, la vegetación, la distancia al océano, las corrientes marinas y los vientos, tal como lo señala INAMHI (2001). Los factores que condicionan el clima de un lugar son varios, incluyendo:

- **Latitud geográfica:** La ubicación de un lugar en relación a la línea del Ecuador afecta la cantidad y distribución de la radiación solar que recibe, lo que a su vez influye en la temperatura.
- **Altitud:** La elevación del terreno sobre el nivel del mar puede afectar la temperatura y la cantidad y tipo de precipitación que cae.
- **Proximidad al océano:** Los cuerpos de agua tienen una gran capacidad de retener calor y regular la temperatura. Por lo tanto, los lugares cercanos al océano suelen tener temperaturas más moderadas en comparación a los lugares interiores.
- **Corrientes oceánicas:** Las corrientes oceánicas pueden transportar calor y frío, lo que puede afectar la temperatura y la cantidad de precipitación en las regiones costeras.

- **Topografía:** Las características del relieve, como la presencia de montañas, pueden afectar la cantidad y tipo de precipitación que cae en un lugar y pueden crear microclimas.
- **Vegetación:** La vegetación puede afectar la cantidad de humedad y la cantidad de energía que se absorbe y se refleja en la superficie terrestre.
- **Vientos:** La dirección y velocidad del viento pueden afectar la temperatura y la cantidad de precipitación en un lugar.

Todos estos factores interactúan entre sí para producir el clima de un lugar.

### **1.3.4 Teledetección y características**

La teledetección es un proceso remoto el cual permite adquirir información digital-espacial de la cobertura terrestre, esto se debe a la interacción energética en el medio natural, el cual puede ser captada o medida por un sensor extra espacial (Chuvienco 2002). Su totalidad en el campo geográfico es fundamental, pues permite conocer cambios espaciales, así como la muestra de identificación de alteraciones, lo que conlleva a una planificación territorial óptima o la prevención de una amenaza (Gutiérrez, 2000). Según Collet (2010), es esencial tener conocimientos sobre sistemas de información geográfica (SIG) para utilizar adecuadamente la teledetección, incluyendo la manipulación de información y programas geográficos. Los componentes básicos de un sistema de teledetección espacial son los siguientes:

- **Fuente de energía:** es la energía primordial para cubrir toda la superficie terrestre o la superficie que se busque analizar. Es así que la principal fuente es el sol y los secundarios son las energías generadas por el hombre.
- **Cubierta terrestre:** es el conjunto territorial compuesto o individual de ecosistemas como suelo, agua, infraestructuras humanas, vegetación o glaciares, que tienen por



calidad generar interacción electromagnética y pueda ser medido mediante el sensor.

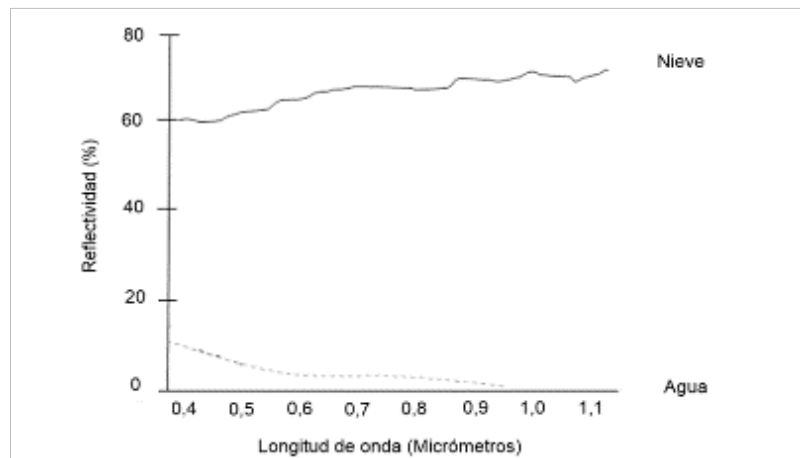
- Sistema sensor: Un sensor es un instrumento montado en una plataforma espacial cuyo propósito es detectar, codificar, registrar y transmitir la reflectividad de la superficie de la Tierra a un sistema de detección.
- Sistema de recepción y procesamiento: Es un instrumento que capta información captada por sensores de la superficie terrestre. Este dispositivo se encuentra en la Tierra y se encarga de codificar y preparar la información espacial para crear imágenes satelitales.
- Intérprete e usuario: es el personal que analiza las imágenes digitales para extraer información e idéntica los cambios presentes en la unidad territorial de estudio.

#### **b) FIRMA ESPECTRAL**

Las propiedades ópticas de un material afectan su respuesta a la radiación cuando interactúa con su superficie. Cada material tiene su propia firma espectral debido a la cantidad de reflexión, absorción y transmisión de radiación de diferentes longitudes de onda (ESA, 2014). Estas cualidades permiten diferenciar una unidad territorial y ser expresada en una firma espectral (Chuvienco, 1990). Es así que la reflectividad de un cuerpo de nieve es más intensa en el rango visible "0.4 – 0.75  $\mu\text{m}$ ", suceso contrario en el rango infrarrojo, pues la reflectividad es baja (Chuvienco, 1990). La firma espectral del agua muestra que hay una baja reflectancia en el rango visible, mientras que en el rango infrarrojo la reflectancia es alta (ver figura 4).

**Figura 4.**

*Firma Espectral de la nieve y el agua*



Fuente: Chuvieco, 1990.

**c) Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI)**

Según Sharma et al. (2016), el uso de índices espectrales permitió detectar cambios superficiales en la cubierta glaciaria con la ayuda de sensores remotos. En la región visible del espectro, es difícil distinguir entre la nieve y las nubes, mientras que en la región del infrarrojo medio, las partículas de las nubes son más pequeñas que los copos de nieve y absorben menos radiación en esta parte del espectro, lo que facilita la distinción. Además, la capa de nieve generalmente refleja más que las nubes en el rango de luz visible. Por tanto, como señala Moreno (1996), estas bandas son necesarias para calcular el índice de nieve normalizado.

**Ecuación 1.** Expresión algebraica del índice NDSI

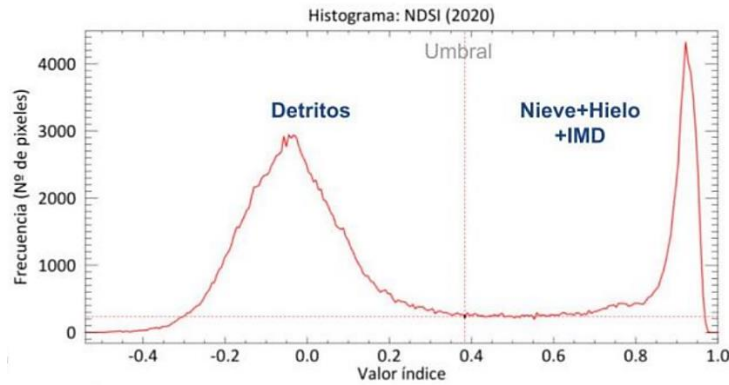
$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$$

En el caso de Landsat 5, las bandas de onda corta verde e infrarroja corresponden a la Banda 2 y la Banda 5, respectivamente. En el caso de Landsat 8, estas bandas corresponden a la Banda 3 y la Banda 6 (Gupta et al., 2005).

En la figura 5, observamos el punto de quiebre entre otras unidades territoriales, y el componente glaciar, con una proximidad de quiebre a 0.4 en la frecuencia de píxeles del NDSI.

**Figura 5.**

*Frecuencia de valores del índice NDSI y punto de quiebre*



Fuente: (Arora et al., 2011)

**1.4. Marco Conceptual**

**1.4.1 Superficie glaciar**

La superficie glaciar es la capa de nieve o hielo que se ubica sobre la tierra, esta es perceptible por la observación física, o por la fotointerpretación de imágenes satelitales (Geoestudio, 2008).

**1.4.2 Cambio climático**

El cambio climático es un fenómeno global que se refiere a la alteración del clima de la Tierra a largo plazo, como resultado de la actividad humana y de factores naturales. Este cambio se manifiesta en el aumento de la temperatura global, cambios en los patrones de precipitación, aumento del nivel del mar, entre otros efectos. El cambio climático es una de las mayores preocupaciones ambientales y representa un desafío para la humanidad en términos de adaptación y mitigación de sus efectos (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992).

### **1.4.3 Información climática PISCO “*Peruvian Interpolated data of the SENAMHI’s Climatological and hydrological Observations*”**

Los datos de PISCO son información climática interpolada a partir de datos históricos recopilados de estaciones meteorológicas en Perú. Esta información ha sido generada por el equipo técnico del SENAMHI y se actualiza constantemente. Según Díaz et al. es datos de precipitación versión 2.0 e incluye información desde 1981 hasta el presente. (2015). Los datos de temperatura y evaporación son de la versión 1.0 y cubren el período 1981-2016. La información interpolada se muestra en formato NetCDF con una resolución de 5 km x 5 km, tal como lo describe Aybar et al. (2017).

### **1.4.4 Deglaciación**

La deglaciación es el proceso natural de reducción de masas de hielo en la Tierra, ya sea en glaciares, capas de hielo o icebergs. Sin embargo, en la actualidad, el término se utiliza para describir el proceso acelerado de pérdida de hielo en los polos y en las montañas a nivel mundial, debido al aumento de la temperatura global causado por la actividad humana y al cambio climático (INAIGEM, 2016).

### **1.4.5 La imagen satelital**

Una imagen satelital es una fotografía o representación visual de la superficie terrestre o de algún objeto en la atmósfera, tomada desde un satélite que orbita la Tierra. Las imágenes satelitales son una herramienta valiosa para la investigación y la toma de decisiones en muchas áreas de la vida moderna (Chuvieco Salnero, 1990).

## 1.5. Formulación de Problema

### Problema General

- ¿Cómo influye la precipitación, temperatura y evapotranspiración en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, Ancash?

### Problemas Específicos

- ¿Cuáles son los cambios superficiales del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, Ancash?
- ¿Cómo es el comportamiento de la precipitación ambiental del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, Ancash?
- ¿Cómo es el comportamiento de la temperatura máxima, mínima y promedio en el nevado Huayhuash, Ancash durante el periodo interanual 1988-2016?
- ¿Cómo es el comportamiento de la evapotranspiración potencial en el nevado Huayhuash, Ancash durante el periodo interanual 1988-2016?
- ¿Cómo influye la variabilidad de la precipitación en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, Ancash?
- ¿Cómo influye la variabilidad de la temperatura máxima, mínima y promedio en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2016, Ancash?
- ¿Cómo influye la variabilidad de la evapotranspiración potencial en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2016, Ancash?

## 1.6. Justificación

**Justificación Social:** el retroceso glaciar es una situación preocupante para la sociedad, pues se ve amenazada la reserva hídrica. No solo se ve afectada el abastecimiento hídrico de la población, sino los impactos en la producción energética, agrícola y económica. Por ello, el presente estudio busca cuantificar el retroceso glaciar del nevado Huayhuash, mediante un análisis temporal, para de esa manera predecir y garantizar el futuro hídrico de la población.

**Justificación metodológica:** analizar los cambios en la cobertura glaciar permite generar información del territorio para un posterior análisis de prevención y riesgo. Por esto, se consideró la teledetección como herramienta metodológica para identificar los cambios ocurridos en el nevado Huayhuash. Esta herramienta es accesible para cualquier usuario con manejo en sistemas de información geográfica. Asimismo, está considerado la evaluación de la influencia de los elementos climáticos en los cambios de la cobertura glaciar mediante un análisis de datos.

**Justificación ambiental:** el valor ambiental de los glaciares se encuentra en los servicios ecosistémicos, como la regulación del clima y proveedor de agua durante todo un periodo anual. Asimismo, son distribuidores eficaces de agua para la cuenca alta, intermedia y baja de un territorio. Por tanto, la evaluación del retroceso glaciar en las últimas décadas permitirá conocer el estado de las masas glaciares.

**Justificación práctica:** a pesar de que se cuenta con monitoreos e inventarios de glaciares en el Perú, aún no se cubre de manera específica el análisis de monitoreo de glaciar del Nevado Huayhuash, en muchos casos debido a la deficiencia a la accesibilidad del lugar. Por tanto, el conocimiento del presente estudio será de importancia para la comunidad local, para estudio de conservación de ecosistemas, que son dirigidos por proyectos de organizaciones

públicas como la Autoridad Nacional del Agua, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña; y las ONGs.

## **1.7. Objetivos**

### **Objetivo General**

- Explicar la influencia de la precipitación, temperatura y evapotranspiración en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, Ancash.

### **Objetivos Específicos**

- Determinar los cambios superficiales del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, Ancash.
- Evaluar el comportamiento de la precipitación ambiental en el nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, Ancash.
- Evaluar el comportamiento de la temperatura máxima, mínima y promedio en el nevado Huayhuash, Ancash durante el periodo interanual 1988-2016.
- Evaluar el comportamiento de la evapotranspiración potencial en el nevado Huayhuash, Ancash durante el periodo interanual 1988-2016.
- Explicar la influencia de la variabilidad de la precipitación en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, Ancash.
- Explicar la influencia de la variabilidad de la temperatura máxima, mínima y promedio en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2016, Ancash.
- Explicar la influencia de la variabilidad de la evapotranspiración potencial en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2016, Ancash.

## 1.8. Hipótesis

### Hipótesis General

- Hay influencia significativa de la precipitación, temperatura y evapotranspiración en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, Ancash.

### Hipótesis Específicas

- La variación espacial del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, es decreciente en el tiempo.
- El comportamiento de la precipitación ambiental en el nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, es variable y decreciente.
- El comportamiento de la temperatura máxima, mínima y promedio en el nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2016, se encuentra en ascenso.
- El comportamiento de la evapotranspiración potencial en el nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2016, se encuentra en ascenso.
- La variabilidad de la precipitación influye significativamente en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2022, Ancash.
- La variabilidad de la temperatura máxima, mínima y promedio influye significativamente en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2016, Ancash.
- La variabilidad de la evapotranspiración potencial influye significativamente en los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash durante el periodo interanual 1988-2016, Ancash.



## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

### 2.1 Tipo de investigación

**Tipo de investigación:** es de carácter aplicado, ya que tiene como objetivo poner en práctica el conocimiento adquirido en teledetección y sistemas de información geográfica para evaluar la cobertura glaciar del nevado Huayhuash en términos espacio-temporales, según lo planteado por Valderrama (2015).

**Nivel de investigación:** el nivel es explicativo, puesto se busca dar a conocer la influencia de los elementos climáticos precipitación, temperatura y evapotranspiración, en los cambios de la cobertura glaciar (Valderrama, 2015).

**Diseño de investigación:** es longitudinal no experimental, ya que no hubo manipulación ni control de variables. En cambio, las variables fueron observadas y analizadas en función del tiempo. Además, el diseño es longitudinal debido al largo período de estudio, que abarcó desde 1988 hasta 2022, tal como lo indica Valderrama (2015).

En el estudio, las variables independientes son la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial, mientras que la variable dependiente es la cobertura glaciar.

### 2.2 Población y muestra

Según Valderrama (2015), la población en este estudio se refiere a todos los glaciares tropicales de montaña en los Andes del Perú. Los glaciares en la zona nor-centro del Perú son más fríos que los de la zona sur. Se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, en el que la muestra fue seleccionada en función de las características de la investigación y los criterios del investigador para seleccionar la unidad de estudio. Por lo tanto, la muestra de este estudio corresponde a la cobertura glaciar del nevado Huayhuash, que tiene una superficie aproximada de 98 km<sup>2</sup>.

### 2.3 Inclusión y Exclusión:

El periodo de estudio 1988 a 2022, fue lo más amplio posible en consideración a los **criterios de inclusión y exclusión**, pues este estudio trabaja con dos tipos de información temporal, el climático y el satelital, por tanto, la predisposición de ambas marca el periodo de estudio. Las imágenes Landsat en sus distintas misiones están disponibles desde 1984 hasta la actualidad. Y las dos climáticos del grillado PISCO están disponibles desde 1981 hasta el 2022, para la precipitación y hasta el 2016 para la temperatura y la evapotranspiración. Sin embargo, se consideró desde 1988, puesto que solo se aprecia imágenes reveladoras sin interferencia de nubosidad a partir desde el año 1988.

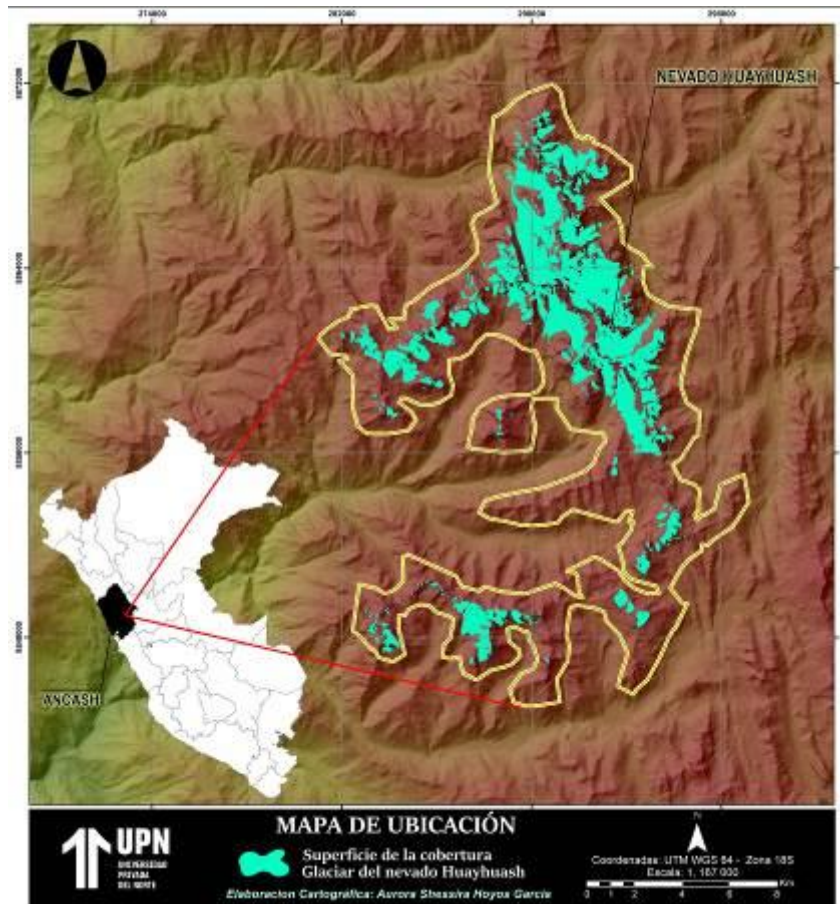
Cabe resaltar que se consideró la información climática local (Perú), con el fin de tener mayor proximidad de los valores climáticos del territorio, por ello, no se tuvo en cuenta las variables climáticas interpoladas que se tienen a nivel mundial, generada por distintas instituciones como la NASA, el cual tiene la ventaja en tener información climática hasta la actualidad, con resolución espacial muy amplia de 70 km, a diferencia del producto grillado PISCO-Perú, el cual tiene una resolución de 10 km.

Gracias al uso de los sistemas de información geográfica y las imágenes satelitales Landsat, el estudio se centró exclusivamente en la época seca, que comprende los meses de mayo, junio, julio y agosto para el nevado Huayhuash. Debido a las características del satélite Landsat, que tiene una frecuencia de revisita de 8 y 16 días según la clase de imágenes, esto significa que el satélite vuelve al mismo punto para la toma de imágenes cada 8 o 16 días.

La zona de estudio de la investigación está ubicada en el departamento de Ancash, según el informe del SERNANP en 2010. Esta zona se encuentra a una altitud aproximada de 6635 metros sobre el nivel del mar y se considera la segunda montaña más alta del Perú después de Huascarán, que tiene una altitud de 6770 metros sobre el nivel del mar.

**Figura 6.**

*Mapa de ubicación del nevado en estudio*



Nota. Diseño cartográfico elaborado en ArcGIS Desktop

## 2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En este estudio, se utilizó una técnica de observación directa no experimental que implica el uso de los sentidos y la percepción para recopilar datos con este fin. En particular, la fotointerpretación se utiliza como método para determinar la cubierta glaciar a partir de imágenes de satélite.

El **instrumento** que acompaña a la técnica de observación no experimental / fotointerpretación, son una ficha para el almacenamiento de la información de la dimensión superficial de la cobertura glaciar, proveniente de la interpretación de imágenes satelitales (ver anexo 1). La segunda ficha es la referida al almacenamiento de información de los elementos climáticos precipitación, temperatura y evapotranspiración a nivel de superficie

promedio (ver anexo 2). Estas fichas tienen información periódica desde el año 1988 hasta 2022.

Estos instrumentos fueron validados por tres expertos en conocimiento del procesamiento de imágenes digitales y sistemas de información geográfica (ver anexo 3).

## **2.5 Procedimientos:**

En esta sección se describen los procedimientos utilizados para obtener las variables de estudio, como la cobertura glaciaria y los elementos climáticos, para el período comprendido entre 1988 y 2022.

### **2.5.1 Recolección de Imágenes Satelitales e Información Cartográfica**

Para el presente estudio se dio por usar las imágenes Landsat para el cumplimiento del periodo amplio de estudio, estas imágenes muestran una resolución espacial de 30 metros, para su descarga se consideró la plataforma oficial de geología de Estados Unidos, asimismo estas imágenes se encuentran en el rango de colección 2 level 2, esto quiere decir que las imágenes ya muestran una corrección atmosférica a nivel de superficie (Huayaney y Meléndez, 2009). Esto permitirá, restringir proceso de corrección atmosférica mediante softwares como ENVI y Qgis.

Además, se consideró las imágenes en época seca (junio -setiembre), porque la nubosidad es baja, lo que facilita la medición de la cobertura glaciaria del nevado Huayhuash. La Tabla 1 presenta las características de las misiones Landsat 5 y 8, que fueron consideradas para este estudio. Se excluyó la misión Landsat 7 debido a que presenta un error digital con vacíos del 15% (Chuvieco, 2016).

**Tabla 1.**
*Características de las misiones Landsat*

| Sensor                        | R.Espectral | R. Espacial      | R. temporal | R. Radiométrica |         |
|-------------------------------|-------------|------------------|-------------|-----------------|---------|
| <b>Landsat 5<br/>TM</b>       | 7 bandas    | Bandas 1 a 5 y 7 | 30 metros   | 16 días         | 8 bits  |
|                               |             | Banda 6          | 120 metros  |                 |         |
| <b>Landsat 8<br/>OLI-TIRS</b> | 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)

Para este estudio, se eligieron escenas de los sensores Landsat 5 para el período de 1988 a 2012, y del Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) para el período de 2014 a 2022, tal como se detalla en la Tabla 2. La selección de las escenas se realizó en los meses de julio y agosto para asegurar una baja cantidad de nubes. La Tabla 2 muestra las escenas específicas que se consideraron para este estudio.

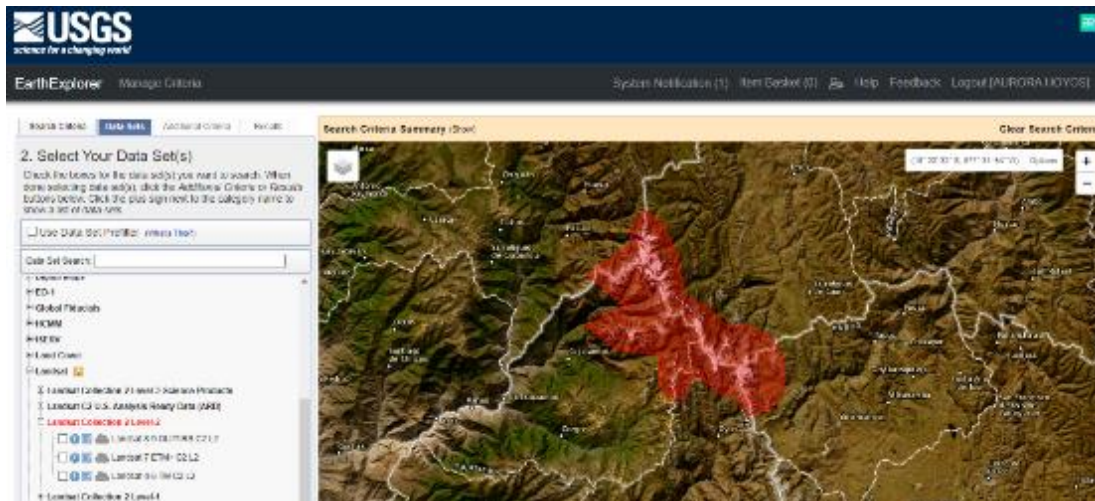
**Tabla 2.**
*Escenas consideradas para el estudio*

| Fecha      | Sensor Landsat | Código                                   | Path / Row | % nubosidad en el área de estudio |
|------------|----------------|--|------------|-----------------------------------|
| 06/07/1988 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_19880706_20200829_02_T2 | 06-68      | 0% a 2%                           |
| 07/07/1990 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_19900719_20200831_02_T2 |            |                                   |
| 07/06/1992 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_19920611_20200903_02_T2 |            |                                   |
| 08/07/1994 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_19940718_20200906_02_T2 |            |                                   |
| 08/07/1996 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_19960729_20200909_02_T2 |            |                                   |
| 09/07/1998 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_19980723_20200911_02_T2 |            |                                   |
| 09/07/2000 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_20000718_20200913_02_T2 |            |                                   |
| 10/06/2002 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_20020610_20200914_02_T2 |            |                                   |
| 10/07/2004 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_20040707_20200916_02_T2 |            |                                   |
| 11/06/2006 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_20060611_20200903_02_T2 |            |                                   |
| 11/07/2008 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_20080718_20200906_02_T2 |            |                                   |
| 12/07/2010 | 5 TM           | LT05_L2SP_003070_20100718_20200906_02_T2 |            |                                   |
| 12/07/2012 | 5 TM           | LE05_L2SP_003070_20120711_20200908_02_T2 |            |                                   |
| 13/08/2014 | 8 OLI          | LC08_L2SP_003070_20140806_20200831_02_T2 |            |                                   |
| 13/06/2016 | 8 OLI          | LC08_L2SP_003070_20160607_20200911_02_T2 |            |                                   |
| 14/08/2018 | 8 OLI          | LC08_L2SP_003070_20180806_20200831_02_T2 |            |                                   |
| 14/06/2020 | 8 OLI          | LC08_L2SP_003070_20200607_20200911_02_T2 |            |                                   |
| 15/08/2022 | 8 OLI          | LC08_L2SP_003070_20220806_20200831_02_T2 |            |                                   |

En la figura 7, se evidencia el proceso de descarga de la plataforma oficial del USGS y donde se trabaja con la versión Landsat level 2, el área de estudio enmarca al nevado Huayhuash.

**Figura 7.**

*Imágenes Landsat de la plataforma USGS*



Nota. localización del área de estudio mediante polígono cerrado de color rojo

## 2.5.2 Preprocesamiento de imágenes Landsat

Como se mencionó las imágenes Landsat ya muestran correcciones atmosféricas a nivel de superficies. Por tanto, solo requiere de la re-proyección de hemisferio norte a sur, y esto se puede solucionar con la herramienta *Project* del programa ArcGIS Desktop.

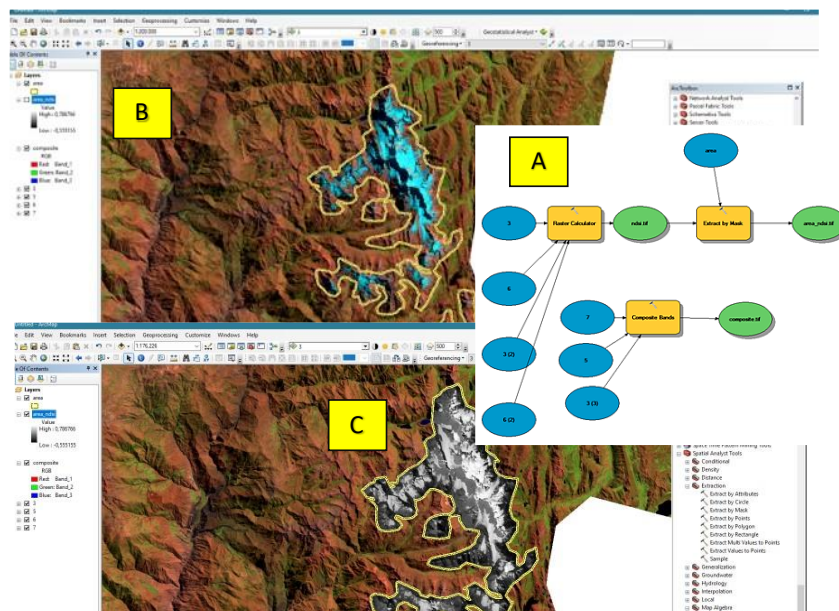
## 2.5.3 Determinación de la cobertura glaciar mediante el NDSI

En este estudio, se utilizó el índice NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve) para cuantificar la cobertura glaciar. Este índice permite identificar la presencia de superficies glaciales en un área determinada, y se calcula mediante la siguiente fórmula:  $NDSI = \frac{(Banda\ Verde) - (Banda\ Swir)}{(Banda\ Verde) + (Banda\ Swir)}$ . La banda Verde se encuentra en el rango visible, mientras que la banda Swir está en el rango infrarrojo.

Asimismo, para el reconocimiento territorial mediante una percepción de falso color, se consideró la aplicación de la combinación de banda 7-5-3 para Landsat 8 y la combinación 7-4-2 para Landsat 5. Estos dos resultados permitirán identificar con claridad la cobertura glaciar. En la figura 8, se evidencia (A) el flujo de cajas que permite agilizar los procesos en la determinación de NDSI y la combinación de bandas, seguido se tiene (B) la combinación de bandas falso color, el cual muestra los nevados de color celeste y la vegetación de color verde. Finalmente, se tiene (C) el índice NDSI el cual se encuentra en escala gris.

**Figura 8.**

*Índice NDSI y combinación de banda falso color*

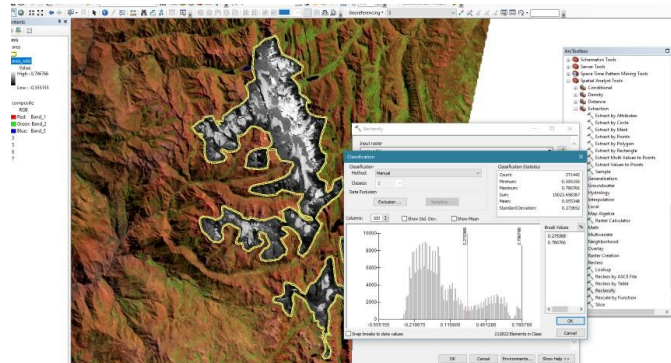


Nota. El índice NDSI, combinación de bandas y geo-procesos, fueron llevados a cabo en ArcGIS

En la Figura 9, se muestra la gráfica de frecuencias del índice NDSI, que resulta útil para identificar las unidades territoriales que presentan cobertura glaciar. En la gráfica, se puede observar que la separación de las unidades territoriales se produce en el punto de cambio de lado convexo, que se encuentra alrededor de 0.21. Por lo tanto, los valores del índice NDSI que son superiores a este umbral indican la presencia de cobertura glaciar.

**Figura 9.**

*Umbral de quiebre del NDSI*

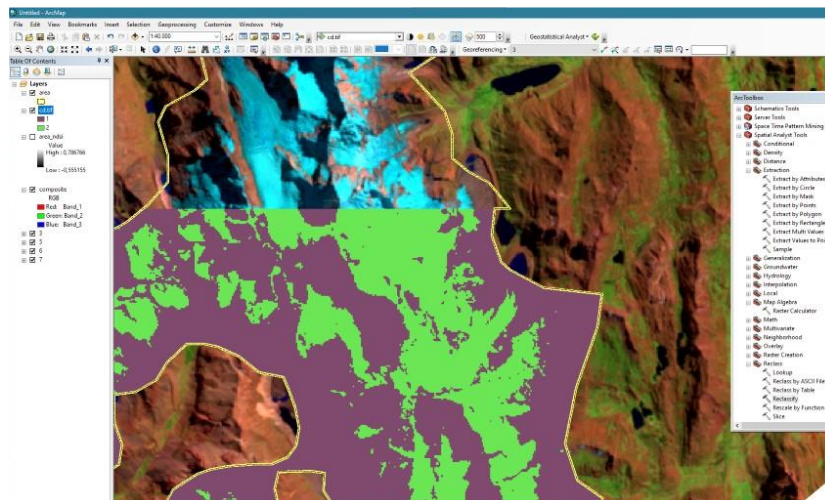


Nota. Umbral de corte determinado por la herramienta *Reclassify*

Una vez determinado la cobertura glaciar, como se observa en la figura 10, la capa de tonalidad verde es la cobertura glaciar y la tonalidad morada hace referencia a otras coberturas, sin embargo, la determinación no es óptima, por lo que requiere de la intervención mediante la digitalización con ayuda de la combinación de bandas falso color.

**Figura 10.**

*Cobertura glaciar en formato GRID*



Nota. Resultado de cobertura glaciar

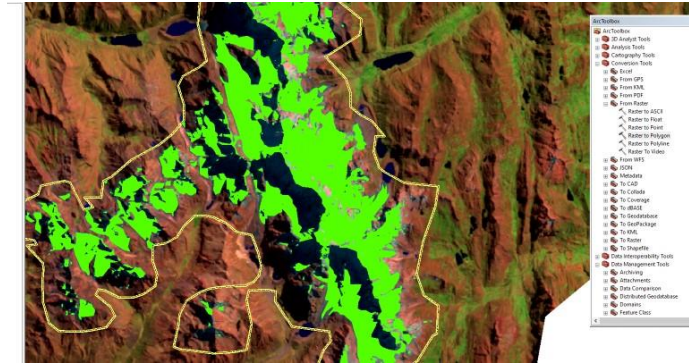
En la digitalización, es necesario contar con información en formato vectorial a partir de la información GRID. Para lograr esto, se utilizó la herramienta "Raster to Polygon" del software ArcGIS 10.8. Como se puede apreciar en la Figura 11, se requirió de edición



manual para la vectorización, ya que se eliminó parte de la cobertura glaciar que estaba oculta por sombras.

**Figura 11.**

*Cobertura glaciar en formato vectorial*

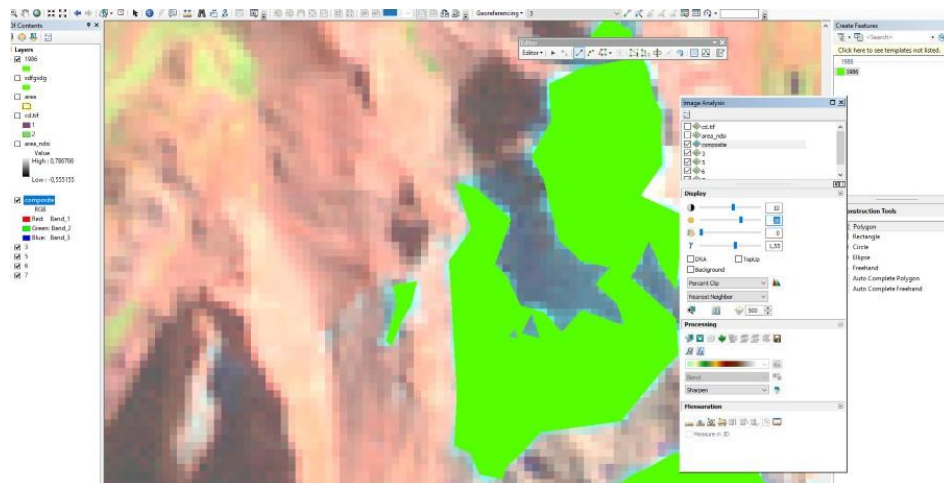


Nota. Formato GRID a formato SHP

En la figura 12, se observa la alteración en tonalidad y brillo de la combinación de bandas falso color con el fin de recuperar las superficies pertenecientes a la cobertura glaciar. La edición vectorial consistió en la adición de polígonos que hacen referencia a la cobertura glaciar.

**Figura 12.**

*Edición vectorial de la cobertura glaciar*

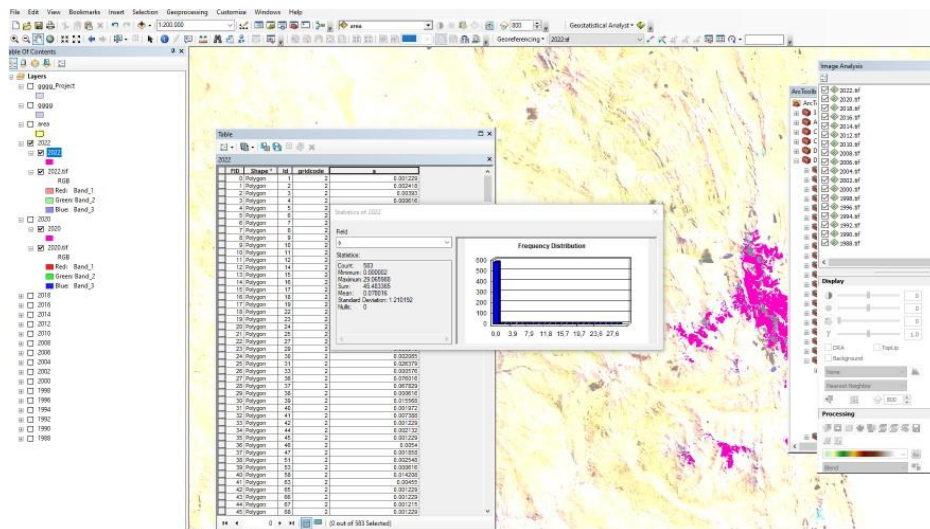


Nota. Edición vectorial mediante la herramienta *Editor*

La Figura 13 representa un ejemplo de la cobertura glaciaria final obtenida a partir de la combinación del índice NDSI y la edición vectorial manual. El siguiente paso consistió en realizar la cuantificación geométrica de la superficie total de la cobertura glaciaria.

**Figura 13.**

*Geometría superficial de la cobertura glaciaria*



Nota. Cuantificación superficial mediante tabla de atributos

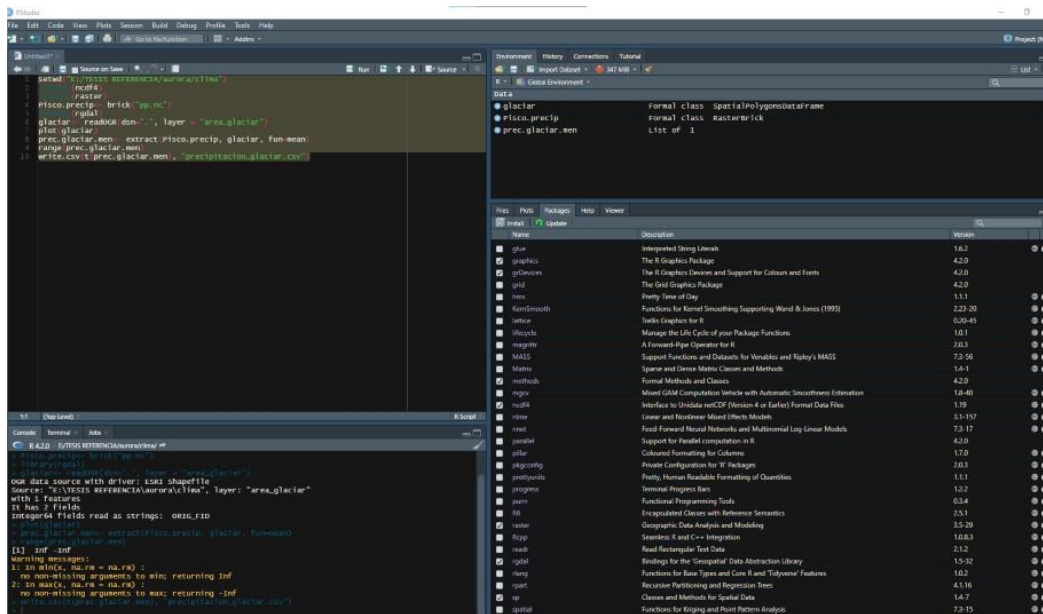
## 2.5.4 Valores climáticos promedios a nivel de superficie

La determinación de los valores de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial a nivel de superficie se realizó mediante el uso de un script en el programa R y Rstudio. Cabe destacar que la información climática utilizada fue obtenida de la librería "IRI data Library" (Hijmans et al., 2020). La Figura 14 muestra la interfaz del programa R y Rstudio, así como las distintas herramientas utilizadas, como rgdal, raster y ndcf4, que permitieron la ejecución del script.

Seguido se observa la figura 15, el script que permitirá obtener la información climática promedio a nivel de superficie. El resultado es arrojado en formato CSV.

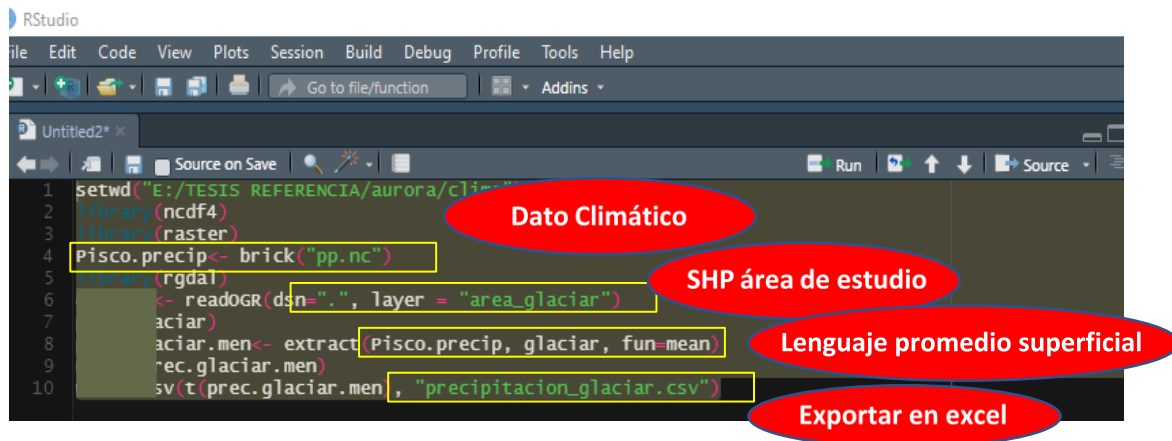
**Figura 14.**

*Panorama del programa R y Rstudio*



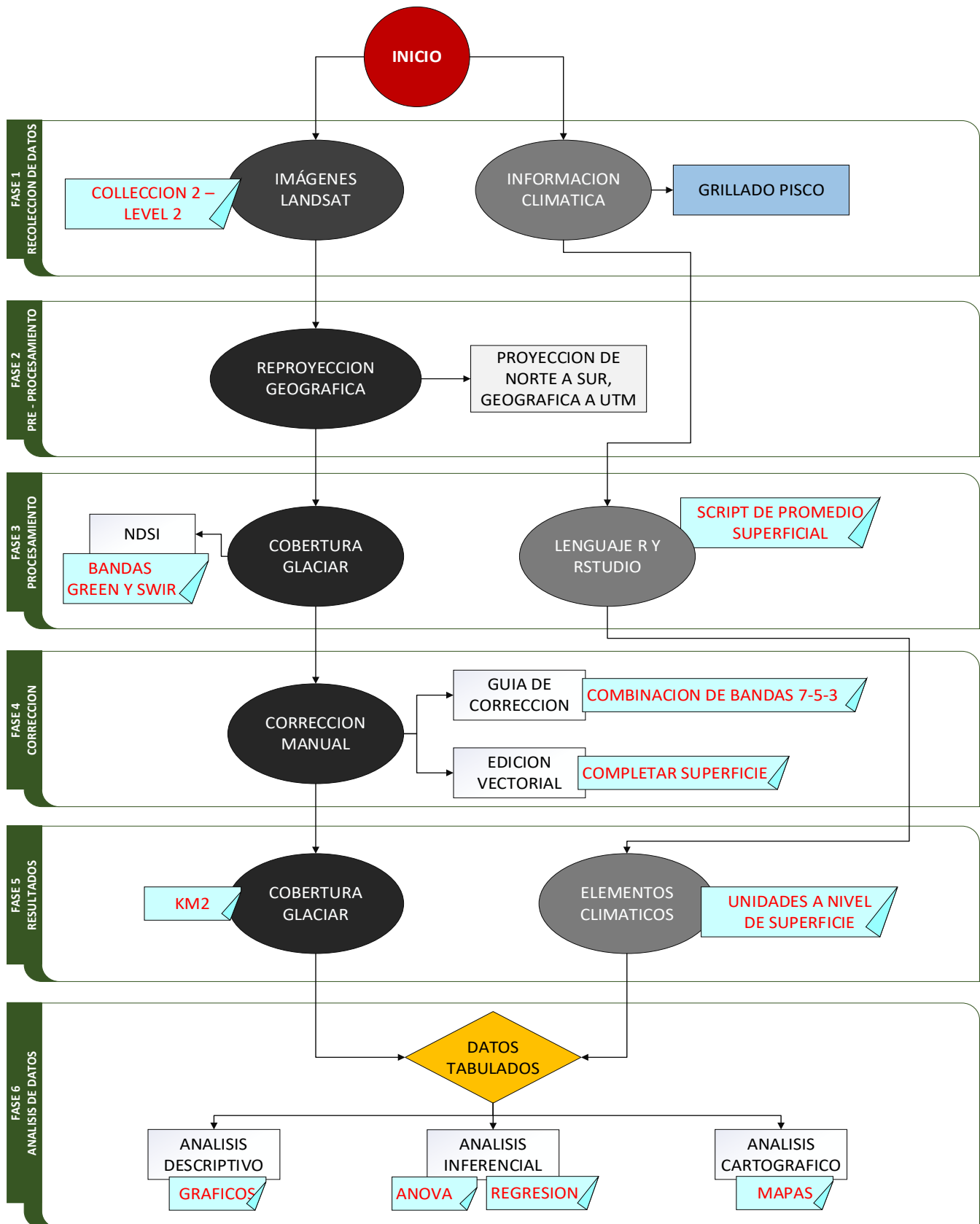
**Figura 15.**

*Script para información climática a nivel de superficie*



**Figura 16.**

*Diagrama de flujo de los procedimientos*



Nota. Flujoograma elaborado en Microsoft Visio 2019

## 2.6 Análisis de datos

Se tiene como datos tabulados durante el periodo 1988 hasta 2022, la cobertura glaciar, precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial. Los análisis estadísticos consistieron en procesos descriptivos, inferencial y cartográfico.

- **Proceso descriptivo:** en este proceso se consideró las gráficas lineales con el fin de conocer la tendencia promedio temporal en el periodo 1988 – 2022. Asimismo, se determinó el análisis descriptivo de cada variable en estudio, como la media, moda, máximo, mínimo y rango.
- **Proceso inferencial:** El proceso inferencial en este estudio incluyó la realización de una prueba de normalidad tipo Shapiro Wilk, dado que la muestra temporal tenía menos de 50 unidades. Luego se llevó a cabo una prueba de análisis de varianza (ANOVA) de una sola vía para determinar la influencia de los elementos climáticos de forma independiente en los cambios en la cobertura glaciar. La decisión se basó en el valor p, ya que valores inferiores a 0.05 indican una influencia significativa entre dos variables.

Después de la prueba de ANOVA, se utilizó la prueba de regresión lineal simple y múltiple para calcular el coeficiente de determinación  $R^2$ , que permite explicar la magnitud de la influencia determinada en la prueba de ANOVA.

- **Proceso cartográfico:** el proceso cartográfico fue únicamente dirigido para presentar los cambios espaciales de la cobertura glaciar, mediante mapas. Asimismo, se consideró un mapa adicional, referido a detección de cambio, el cual ubica los cambios de incremento o descenso de cobertura glaciar entre dos años de evaluación.

## 2.7 Aspectos Éticos

La ética se basa en la habilidad para utilizar los diferentes programas de información geográfica con el fin de presentar un resultado preciso. Además, se mantuvo una ética en el uso de los datos gubernamentales del SENAMHI-Perú y del USGS-EE.UU. Por otro lado, para la investigación se utilizó información secundaria, la cual fue adecuadamente citada.

## CAPÍTULO III. RESULTADOS

### 3.1 Dinámica espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2022:

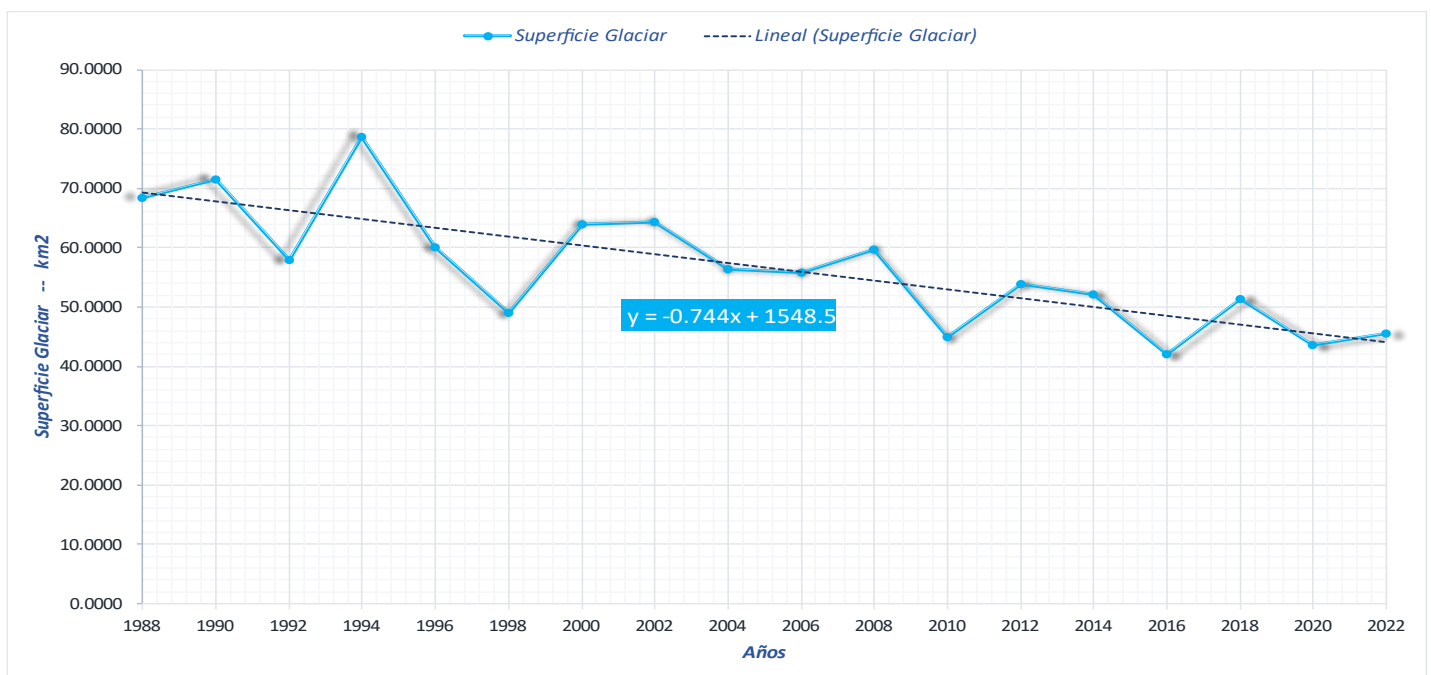
En esta sección se da a conocer los cambios de la cobertura glaciar durante el periodo 1988-2022, estas son expresadas en gráfico de barras y análisis cartográfico. Asimismo, se complementa con una proyección a futuro del posible cambio glaciar, mediante un análisis de regresión lineal.

#### 3.1.1 Análisis del cambio superficial de cobertura glaciar:

En la figura 17, se observa los cambios de la cobertura glaciar durante el periodo 1988-2022, se puede observar que en la proyección lineal el descenso de cobertura se da a un ritmo de 0,74 km<sup>2</sup>/año. Se presentó cobertura glaciar de 70 km<sup>2</sup> en el año 1988 y 45 km<sup>2</sup> en el año 2022, una pérdida de 25 km<sup>2</sup>.

**Figura 17.**

*Cambio superficial del nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2022*



*Nota.* Diagrama superficie glaciar vs tiempo

### 3.1.2 Análisis cartográfico del cambio superficial del nevado Huayhuash:

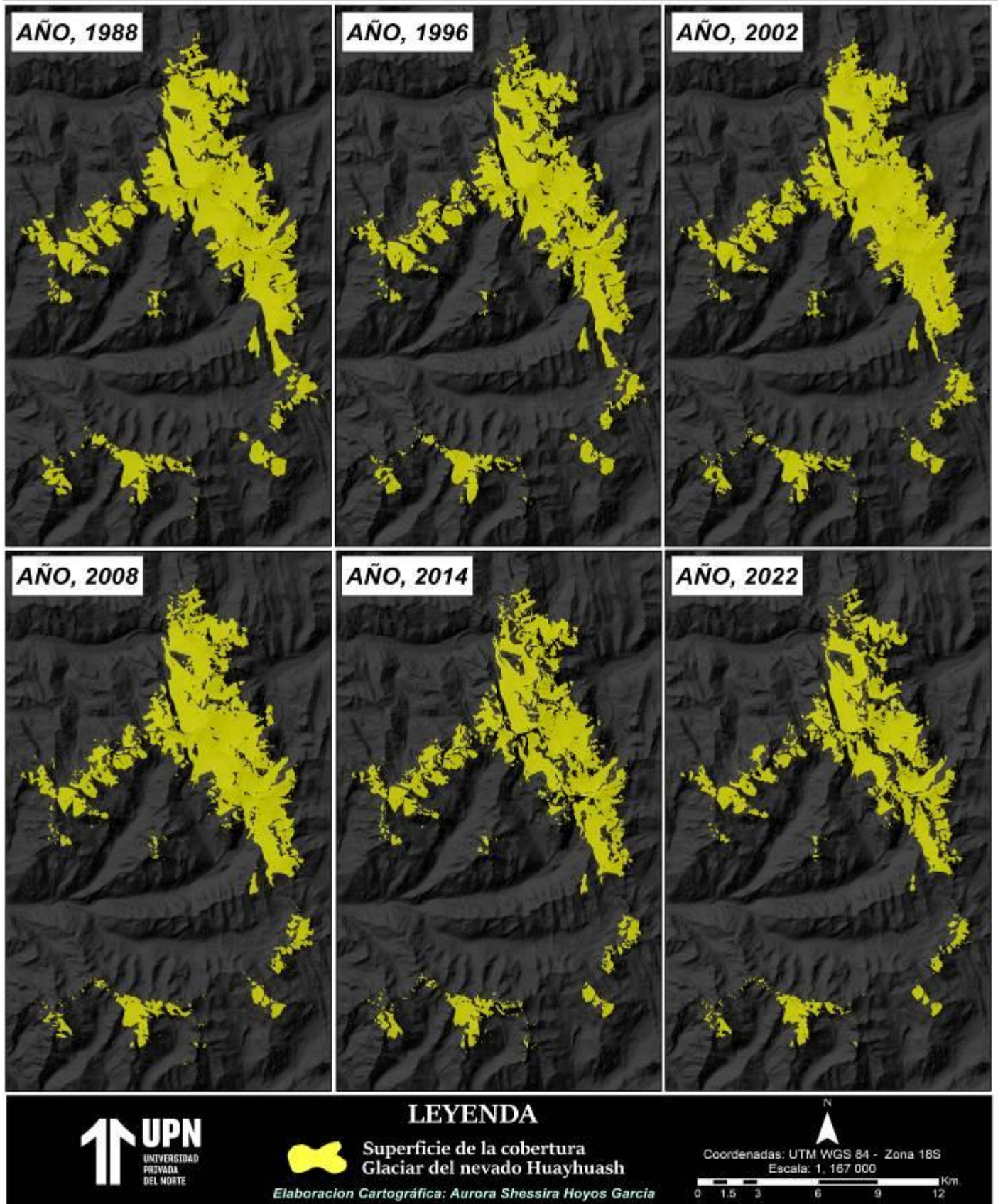
En la figura 18, se aprecia los cambios superficiales del nevado Huayhuash, los descensos de cobertura son reflejados mediante marcas vacías internas dentro del nevado, así como una pérdida periférica de la formación glaciaria.

En la figura 19, se observa los mapas de detección de cambio entre dos periodos. Pues en la comparación del primer periodo 1988 – 2006, se observa de tonalidad roja todas las superficies perdidas de glaciaria y la tonalidad verde la cobertura glaciaria de incremento. También se aprecia que la pérdida se desarrolló en todo el nevado. Seguido se tiene a la detección de cambio del segundo periodo 2006 – 2022, se denota de igual manera con tonalidad roja las superficies de cobertura glaciaria pérdida, y de tonalidad verde la superficie ganada. Finalmente, en la detección de cambio de todo el periodo 1988 – 2022, se observa que de forma general la pérdida es significativa en comparación a una ganancia de cobertura glaciaria, pues las superficies de descenso son más densas.



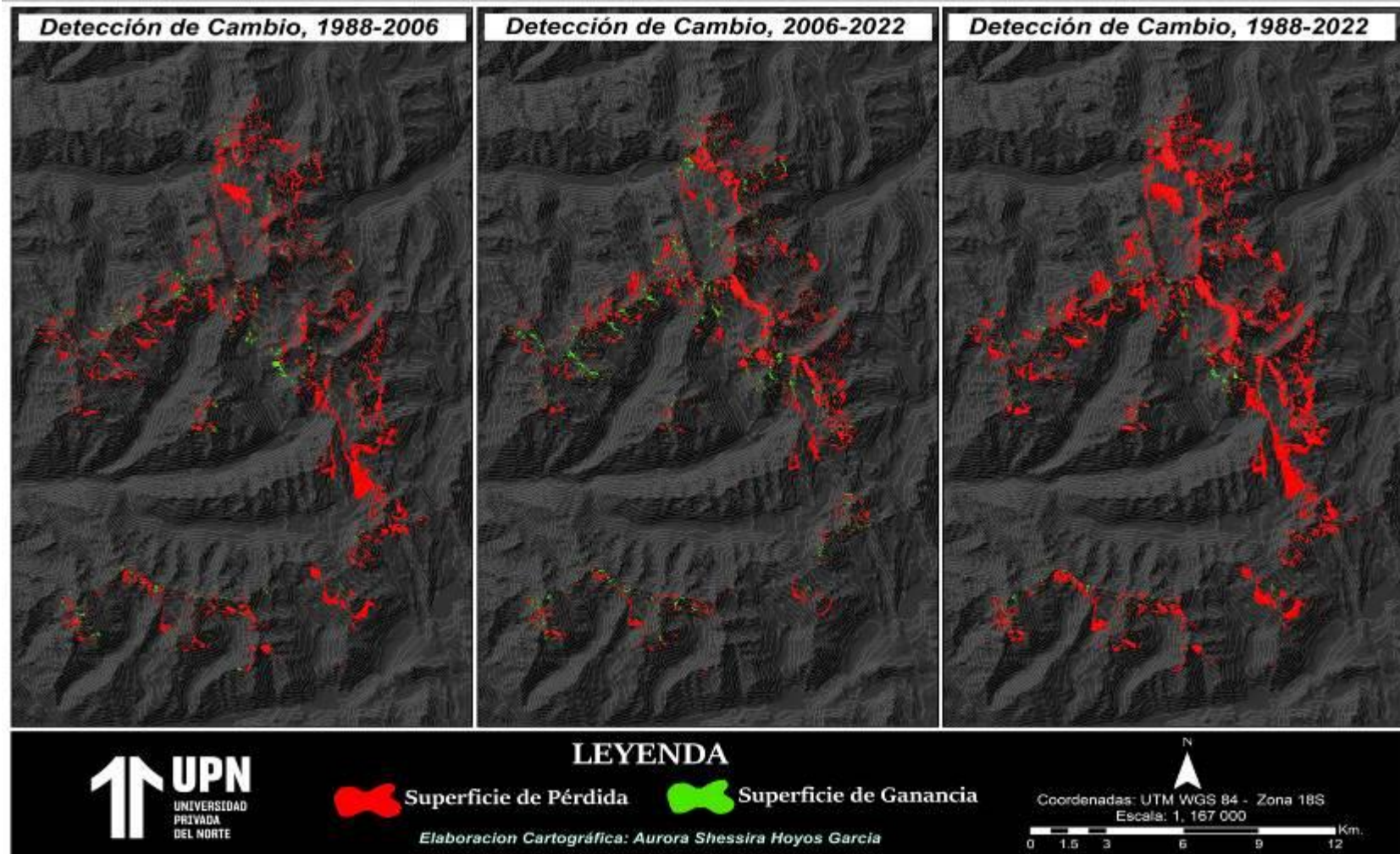
**Figura 18.**

*Mapa temporal de la cobertura glaciar (hielo y nieve)*



**Figura 19.**

*Mapa temporal de la cobertura glaciar (hielo y nieve)*



### 3.1.3 Estimación a futuro de la cobertura glaciar del nevado Huayhuash:

En relación a los cambios previstos en la cobertura glaciar durante el período de 1988 a 2022, se llevó a cabo una estimación adicional para los años 2030, 2035 y 2040 mediante una regresión lineal. Los resultados de la regresión lineal simple se muestran en la Tabla 3, la cual indica que el modelo predictivo es adecuado, ya que el valor p es menor a 0,05 con un  $R^2$  ajustado de 0,59. En la Tabla 4 se presentan los valores de los coeficientes de una ecuación lineal, que también son aceptables con un valor  $p < 0,05$ :

$$Y, \text{Cobertura Glaciar}_{km^2} = 1548,45 - 0,744 * X(\text{Tiempo}_{año})$$

Tabla 3.

*Resumen del Modelo de Regresión Simple*

| Modelo | R     | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación | Estadísticos de cambio |             |         |
|--------|-------|------------|---------------------|---------------------------------|------------------------|-------------|---------|
|        |       |            |                     |                                 | Cambio en R cuadrado   | Cambio en F | p-value |
| 1      | 0,786 | 0,618      | 0,594               | 6,44                            | 0,618                  | 25,865      | 0,00    |

Tabla 4.

*Coefficientes del modelo de regresión lineal Simple*

| Modelo | Coeficientes                     |             |                                  |        |        |      |
|--------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|--------|--------|------|
|        | Coeficientes no estandarizados B | Desv. Error | Coeficientes estandarizados Beta | t      | Sig.   |      |
| 1      | (Constante)                      | 1548,451    | 293,336                          |        | 5,279  | 0,00 |
|        | Tiempo                           | -0,744      | 0,146                            | -0,786 | -5,086 | 0,00 |

Para calcular la extensión del glaciar del nevado Huayhuash en los años 2030, 2035 y 2040, se sustituyó en la fórmula propuesta (X, tiempo en años / Y, superficie glaciar):

- Para X= 2030:

$$\text{Cobertura Glaciar}_{2030} = 1548,45 - 0,744 * \mathbf{2030}$$

$$\text{Cobertura Glaciar}_{2030} = \mathbf{38,13 km^2}$$

- Para X= 2035:

$$\text{Cobertura Glaciar}_{2035} = 1548,45 - 0,744 * \mathbf{2035}$$

$$\text{Cobertura Glaciar}_{2035} = \mathbf{34,41 km^2}$$

- Para X= 2040:

$$\text{Cobertura Glaciar}_{2040} = 1548,45 - 0,744 * 2040$$

$$\text{Cobertura Glaciar}_{2040} = 30,69 \text{ km}^2$$

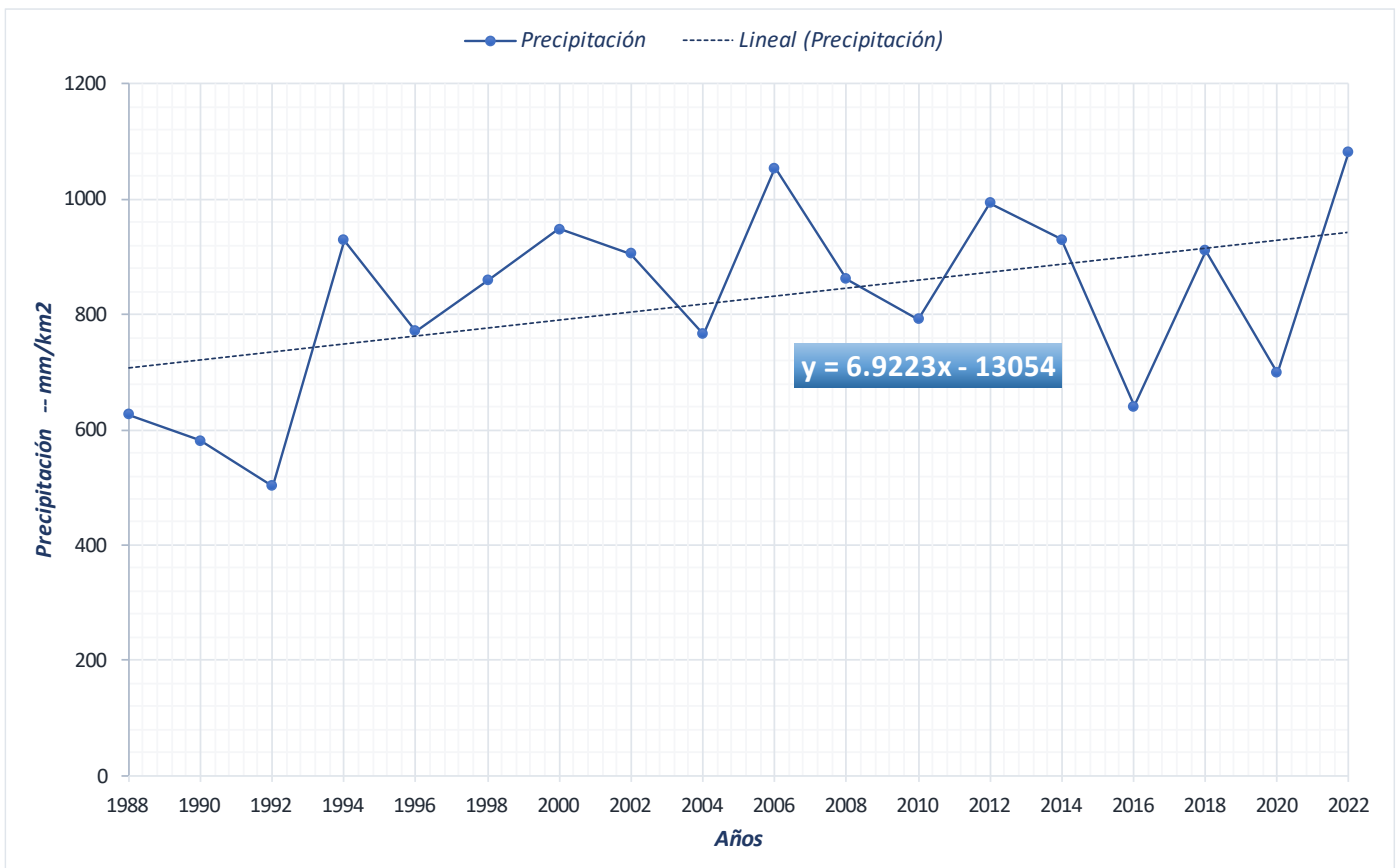
### 3.2 Comportamiento de los elementos climáticos en el nevado Huayhuash:

#### 3.2.1 Precipitación ambiental en el nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2022:

La figura 20 muestra cómo ha variado la cantidad de precipitación a lo largo del tiempo en el nevado Huayhuash, y se puede apreciar que ha habido una gran variabilidad en este comportamiento. Sin embargo, en promedio, se ha observado un aumento aproximado de 6,9 mm de agua por año.

**Figura 20.**

*Variación temporal de la precipitación*



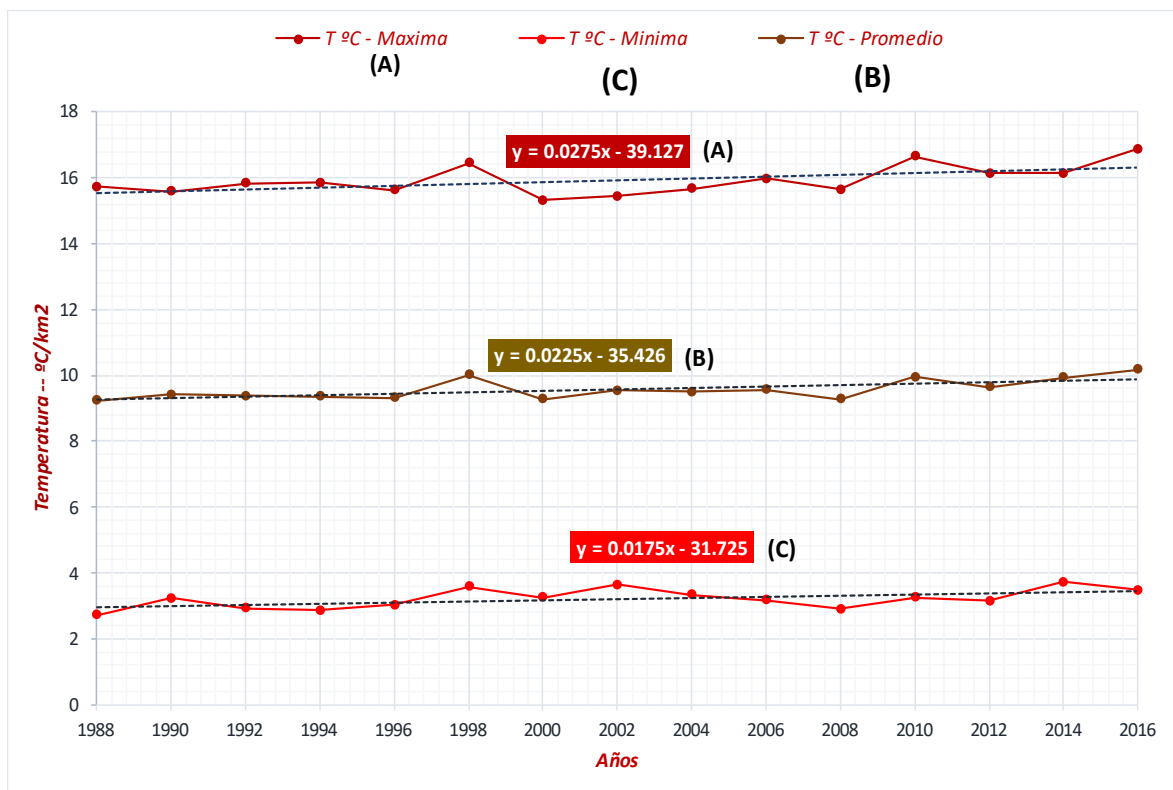
*Nota.* Gráfico lineal de la precipitación

### 3.2.2 Temperatura máxima, mínima y promedio en el nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2016:

La figura 21 muestra cómo ha variado la temperatura en el nevado Huayhuash a lo largo del tiempo, y en comparación con la precipitación, se puede observar un comportamiento más uniforme. Se ha observado que la temperatura máxima ha aumentado en promedio aproximadamente 0,027 °C por año, la temperatura mínima ha aumentado en promedio aproximadamente 0,017 °C por año, y el promedio de las temperaturas ha aumentado en promedio alrededor de 0,022 °C por año.

**Figura 21.**

*Variación temporal de la temperatura máxima, mínima y promedio*



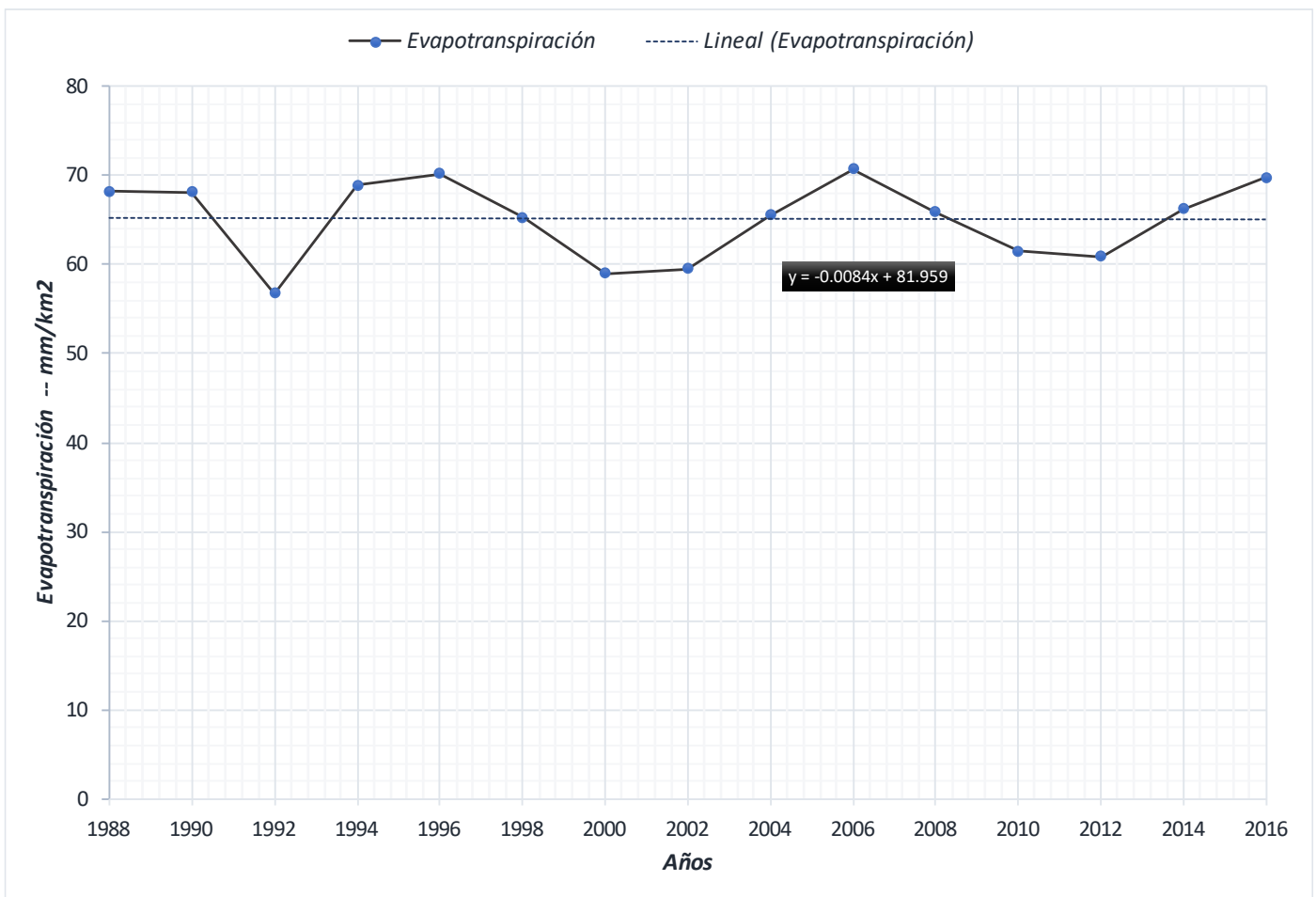
*Nota.* Gráfico lineal de temperatura máxima, mínima y promedio.

### 3.2.3 Evapotranspiración potencial en el nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2016:

En la **figura 22**, se observa el comportamiento de la evapotranspiración potencial, el cual presenta una dinámica muy variada con una tendencia ligera de descenso a una magnitud de 0,0084 mm de agua/km<sup>2</sup>.

**Figura 22.**

*Variación temporal de la evapotranspiración potencial*



*Nota.* Gráfico lineal de la evapotranspiración potencial

### 3.3 Análisis estadísticos de la cobertura glaciaria, precipitación, temperatura y evapotranspiración:

#### 3.3.1 Análisis estadístico descriptivo

En esta sección se presentan los datos estadísticos de las variables estudiadas, los cuales se muestran en la tabla 5. Se puede observar que la media de la evapotranspiración potencial es de 65,1 mm por kilómetro cuadrado, con un valor máximo de 70 mm por kilómetro cuadrado y un valor mínimo de 56 mm por kilómetro cuadrado. En cuanto a la precipitación, la media es de 825 mm por kilómetro cuadrado, con un valor máximo de 1083 mm por kilómetro cuadrado y un valor mínimo de 502 mm por kilómetro cuadrado. En cuanto a la temperatura máxima, se observa una media de 16 °C por kilómetro cuadrado, con un valor máximo de 17 °C por kilómetro cuadrado y un valor mínimo de 15 °C por kilómetro cuadrado. Por último, en cuanto a la temperatura mínima, se evidencia una media de 3 °C por kilómetro cuadrado, con un valor máximo de 3,7 °C por kilómetro cuadrado y un valor mínimo de 2,7 °C por kilómetro cuadrado.

**Tabla 5.**

*Resultados del análisis descriptivo de las variables*

| Estadístico             | Evapotranspiración Potencial mm/km <sup>2</sup> | Precipitación mm/km <sup>2</sup> | T. Máxima °C/km <sup>2</sup> | T. Mínima °C/km <sup>2</sup> | T. Promedio °C/km <sup>2</sup> | Cobertura Glaciaria km <sup>2</sup> |
|-------------------------|---|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Media</b>            | 65,10   | 825,44                           | 15,93                        | 3,22                         | 9,58                           | 56,64                               |
| <b>Mediana</b>          | 65,92   | 860,45                           | 15,84                        | 3,24                         | 9,51                           | 56,13                               |
| <b>Desv. Desviación</b> | 4,50  | 164,76                           | 0,45                         | 0,30                         | 0,30                           | 10,11                               |
| <b>Rango</b>            | 13,93   | 580,55                           | 1,55                         | 1,00                         | 0,94                           | 36,65                               |
| <b>Mínimo</b>           | 56,77   | 502,76                           | 15,33                        | 2,72                         | 9,23                           | 42,08                               |
| <b>Máximo</b>           | 70,70   | 1083,31                          | 16,87                        | 3,72                         | 10,17                          | 78,73                               |

*Nota.* Tabla con estadísticos descriptivos.

### 3.3.2 Análisis inferencial

El análisis inferencial se divide en tres pasos: primero, se realiza una prueba de normalidad para conocer la distribución de las variables y elegir los estadísticos de prueba adecuados; segundo, se aplica la prueba de ANOVA de una sola vía para determinar la relación entre la variable independiente y la dependiente; y tercero, se realiza un análisis de regresión lineal o múltiple, con el fin de evaluar en qué medida la variable independiente influye en la variable dependiente, y cuantificar el grado de explicación ante la existencia de una influencia significativa.

#### A. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks

La tabla 6 muestra los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, la cual indica que las variables estudiadas tienen una distribución normal, ya que los valores de p son mayores a 0,05. Por lo tanto, se puede utilizar la prueba de ANOVA para medir la influencia entre la variable independiente y la variable dependiente de manera adecuada.

**Tabla 6.**

*Resultados de la prueba de normalidad*

| <i>Variables</i>            | <i>gl</i> | <i>p-value</i> | <i>Interpretación</i> |
|-----------------------------|-----------|----------------|-----------------------|
| <b>Precipitación</b>        | 15        | 0,551          | Distribución Normal   |
| <b>Temperatura Máxima</b>   | 15        | 0,263          | Distribución Normal   |
| <b>Temperatura Mínima</b>   | 15        | 0,825          | Distribución Normal   |
| <b>Temperatura Promedio</b> | 15        | 0,057          | Distribución Normal   |
| <b>Evapotranspiración</b>   | 15        | 0,179          | Distribución Normal   |
| <b>Cobertura Glaciar</b>    | 15        | 0,998          | Distribución Normal   |

*Nota.* Prueba de normalidad Shapiro-Wilk, para muestras inferiores a 50 unidades

#### B. Prueba de ANOVA y Regresión Lineal Simple-Múltiple

##### Prueba de ANOVA:

La precipitación no tuvo influencia en los cambios ocurridos de la cobertura glaciar, pues el p-value resultó mayor a 0,05 (**ver tabla 7**). La temperatura máxima, mínima y promedio si



tuvo influencia en los cambios ocurridos de la cobertura glaciaria, pues los valores de p-value resultaron menores a 0,05 (ver tabla 8, 9 10). Finalmente, la evapotranspiración potencial no tuvo influencia en los cambios ocurridos de la cobertura glaciaria, pues el p-value resultó mayor a 0,05 (ver tabla 11).

**Tabla 7.**

*Prueba ANOVA para precipitación*

| ANOVA de un Factor      |                   |    |                  |       |         |
|-------------------------|-------------------|----|------------------|-------|---------|
|                         | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F     | p-value |
| <b>Entre grupos</b>     | 1736,562          | 17 | 102,151          | 2,763 | 0,62    |
| <b>Dentro de grupos</b> | 0,000             | 0  | 31,45            |       |         |
| <b>Total</b>            | 1736,562          | 17 |                  |       |         |

*Nota.* Dependiente: Glaciar / Factor 1: Precipitación

**Tabla 8.**

*Prueba ANOVA para determinar influencia de temperatura máxima*

| ANOVA de un Factor      |                   |    |                  |      |         |
|-------------------------|-------------------|----|------------------|------|---------|
|                         | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F    | p-value |
| <b>Entre grupos</b>     | 1358,53           | 14 | 97,03            | 5,63 | 0,012   |
| <b>Dentro de grupos</b> | 0,000             | 0  | 36,23            |      |         |
| <b>Total</b>            | 1358,53           | 14 |                  |      |         |

\*Dependiente: Glaciar / Factor 2<sup>a</sup>: Temperatura Máxima

**Tabla 9.**

*Prueba ANOVA para determinar influencia de temperatura mínima*

| ANOVA de un Factor      |                   |    |                  |       |         |
|-------------------------|-------------------|----|------------------|-------|---------|
|                         | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F     | p-value |
| <b>Entre grupos</b>     | 146,321           | 14 | 73,85            | 15,07 | 0,023   |
| <b>Dentro de grupos</b> | 2102,87           | 0  | 4,56             |       |         |
| <b>Total</b>            | 2251,56           | 14 |                  |       |         |

\*Dependiente: Glaciar / Factor 2<sup>b</sup>: Temperatura Mínima

**Tabla 10.**

*Prueba ANOVA para determinar influencia de temperatura promedio*

| ANOVA de un Factor      |                   |    |                  |      |         |
|-------------------------|-------------------|----|------------------|------|---------|
|                         | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F    | p-value |
| <b>Entre grupos</b>     | 894,37            | 14 | 178,45           | 6,45 | 0,030   |
| <b>Dentro de grupos</b> | 298,12            | 0  | 276,02           |      |         |
| <b>Total</b>            | 387,46            | 14 |                  |      |         |

\*Dependiente: Glaciar / Factor 2°: Temperatura Promedio

**Tabla 11.**

*Prueba ANOVA para determinar influencia de evapotranspiración*

| ANOVA de un Factor      |                   |    |                  |      |         |
|-------------------------|-------------------|----|------------------|------|---------|
|                         | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F    | p-value |
| <b>Entre grupos</b>     | 91,46             | 17 | 47,53            | 4,56 | 0,21    |
| <b>Dentro de grupos</b> | 276,4             | 0  | 10,56            |      |         |
| <b>Total</b>            | 698,68            | 17 |                  |      |         |

*Nota.* Dependiente: Glaciar / Factor 3: Evapotranspiración

### Prueba de Regresión Lineal y Múltiple:

Después de comprobar mediante la prueba de ANOVA que la temperatura es el único factor que influye en los cambios en la cobertura glaciar del nevado Huayhuash, se procedió a determinar el grado de explicación de esta influencia mediante la regresión lineal o múltiple. Antes de esto, se realizó una prueba de autocorrelación para descartar factores independientes que estén altamente relacionados entre sí. En la tabla 12 se puede observar que la temperatura promedio está altamente relacionada con la temperatura máxima y mínima (con un valor de p menor a 0.05), por lo que se decidió excluirlo del análisis de regresión.

**Tabla 12.**

*Prueba de autocorrelación*

|                               |                    | Tº Máxima | Tº Mínima | Tº Promedio |
|-------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-------------|
| <b>Correlación de Pearson</b> | <b>Tº Máxima</b>   | 1,00      | 0,31      | 0,88        |
|                               | <b>Tº Mínima</b>   | 0,31      | 1,00      | 0,71        |
|                               | <b>Tº Promedio</b> | 0,88      | 0,71      | 1,00        |
| <b>Sig. (unilateral)</b>      | <b>Tº Máxima</b>   | -         | 0,26      | 0,00        |
|                               | <b>Tº Mínima</b>   | 0,26      | -         | 0,00        |
|                               | <b>Tº Promedio</b> | 0,00      | 0,00      | -           |

*Nota.* Tx es temperatura máxima, PP es precipitación y Bf es bofedal

Luego se llevó a cabo una prueba de regresión lineal independiente para analizar la relación entre la variación de la cobertura glaciar y la temperatura máxima y mínima. En la tabla 13 se puede observar que los modelos de regresión son adecuados, ya que el valor de cambio de la prueba es menor a 0,05. Además, se evidencia que el coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$  ajustado) entre la temperatura máxima y los cambios en la cobertura glaciar es de 0,548. Esto significa que la variación en la temperatura máxima explica el 54,8% de los cambios ocurridos en la cobertura glaciar. De manera similar, el  $R^2$  entre la temperatura mínima y la cobertura glaciar es de 0,202, lo que indica que la variación en la temperatura mínima explica el 20,2% de los cambios en la cobertura glaciar. En resumen, se puede concluir que la temperatura máxima tiene una mayor influencia en los cambios en la cobertura glaciar.

**Tabla 13.**

*Resumen de Modelo de Regresión Lineal Simple*

|   | Modelo  | R     | $R^2$ | $R^2$ ajustado | Sig. Cambio en F |
|---|---|-------|-------|----------------|------------------|
| 1 | Predictores: (Constante), $T^{\circ}$ Máxima<br>Variable dependiente: Glaciar | 0,762 | 0,581 | 0,548          | 0,001            |
| 2 | Predictores: (Constante), $T^{\circ}$ Mínima<br>Variable dependiente: Glaciar | 0,509 | 0,259 | 0,202          | 0,023            |

*Nota.* Análisis de forma independiente

La tabla 14 muestra los resultados del análisis de regresión múltiple, el cual considera simultáneamente los efectos de varios factores en la variable dependiente. En este caso, los factores incluidos son la temperatura máxima y mínima).

Se puede observar que el valor del cambio de la prueba es menor a 0,05, lo que indica que la regresión es adecuada. Además, el estadístico de Durbin-Watson muestra que no existe correlación entre las variables predictoras de temperatura máxima y mínima, ya que el valor es de 2,71 y se encuentra dentro del rango de los puntos críticos [1,56 – 3,4]. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) resultó ser de 0,607, lo que significa que la temperatura máxima y

mínima juntas explican el 60,7% de los cambios ocurridos en la cobertura glaciar. En resumen, se puede concluir que la temperatura máxima y mínima en conjunto explican más los cambios en la cobertura glaciar que de manera independiente.

**Tabla 14.**

*Resumen de Modelo de Regresión Lineal Múltiple*

|          | <b>Modelo</b>  | <b>R</b> | <b>R<sup>2</sup></b> | <b>R<sup>2</sup> ajustado</b> | <b>Sig. Cambio en F</b> | <b>Durbin-Watson</b> |
|----------|--|----------|----------------------|-------------------------------|-------------------------|----------------------|
| <b>3</b> | Predictores: (Constante),<br>T <sup>o</sup> Máxima y T <sup>o</sup> Mínima | 0,814    | 0,663                | 0,607                         | 0,001                   | 2,716                |
|          | Variable dependiente: Glaciar  |          |                      |                               |                         |                      |

*Nota.* Análisis en conjunto

## CAPÍTULO IV. DISCUSIONES

**En los cambios superficiales del nevado Huayhuash durante el periodo 1988-2022, se pudo evidenciar que la cobertura glaciar desciende a un ritmo de 0,74 km<sup>2</sup>/año.** El factor que provoca el descenso de la cobertura glaciar en mayor medida es la variabilidad climática, pues es la mayor amenaza en zonas de alta montaña como los glaciares (Pastor, 2013). En el nevado Huayhuash se ha observado un aumento claro de la temperatura de 0,022 °C, lo que ha llevado a una mayor fusión de la masa glaciar, incluyendo la nieve y el hielo (Silverio, 2018). Al respecto indican que la cobertura glaciar compuesta de nieve son las más vulnerables a ser fusionadas en comparación a la masa de hielo (Stern et al., 2008), esto se debe a la formación sólida y ordenada de las moléculas de agua mediante los enlaces llamados puentes de hidrógeno (Martínez-Alva et al., 2020), porque mayor será los enlaces puente de hidrógeno en un hielo cristalino y por tanto será mayor su resistencia a ser fusionado (Jasso-Castañeda et al., 2023).

Asimismo, la presencia de nieve se da con mayor frecuencia en zonas de ablación, el cual corresponde a zonas entre 4500 a 5200 msnm. en el nevado Huayhuash, además la cobertura glaciar con mayor nieve se presenta en las masas de menor espesor (inferiores a 1,5 m). Por ello, distintos estudios demuestran que las zonas más vulnerables a ser fusionados por acción del incremento de temperatura son las coberturas compuestas por nieve y que por lo general se localizan en altitudes bajas de una montaña glaciar (Cogley et al., 2018; Lovell et al., 2018; Hernán, 2022).

En cuanto a la fase física de evaporación del agua, por acción del incremento de temperatura, este proceso es poco significativo, ya que en las montañas glaciares el grado de temperatura no es alto como para generar la evaporación del agua, debido a que requiere de un calor latente de 540 cal/g y en el nevado más próximo como la cordillera blanca de Ancash, el

calor latente logra alcanzar de manera promedio en 260 cal/g (Lokas et al., 2016; Dafne, 2015), esto indica que el proceso de evaporación en glaciares es no significativa (Falaschi et al., 2017). Este sustento es reflejado en el nevado Huayhuash, porque la temperatura promedio solo logró alcanzar un valor de 9,5°C y el grado de evapotranspiración fue baja con una magnitud de 65 mm/km<sup>2</sup>.

Con respecto a las precipitaciones en forma sólida (granizo), se sabe que es el aporte primordial para la formación de nieve y su posterior cristalización a una estructura más rígida, siempre y cuando las precipitaciones sean de clase granizo (Carenzo et al., 2016). Sin embargo, las precipitaciones generadas no son aprovechadas en su gran amplitud por los glaciares, porque algunas son escurridas por los suelos rocosos desnudos e infiltrados en rocas meteorizadas. Un estudio sobre el glaciar boliviano de Chacaltaya, demostró que, para una montaña, pierde precipitaciones en 30% en forma de esorrentía, esto debido a que toda su cobertura no está cubierta de glaciar (Brenning et al., 2012). Por tanto, en el nevado Huayhuash también se presenta pérdida de precipitaciones, por tanto, la cobertura glaciar no cubre el 100% de la montaña (Jones et al., 2019; Laute & Beylich, 2012). Por otro lado, la presencia de precipitaciones intensas en pendientes accidentados (pendiente superior a 70°) logran afectar la estabilidad rígida de una masa glaciar y posteriormente un deslizamiento de masa glaciar por acción de la gravedad y arrastre (Karimi et al., 2012; INAIGEM, 2020). Es así que en el análisis cartográfica de detección de cambio del nevado Huayhuash (ver figura 19), se observa en zonas bajas de la montaña, incremento de cobertura glaciar de forma inmediata, esto en parte es explicado por la masa glaciar proveniente de zonas altas y que fueron desestabilizadas por acción de la precipitación y temperatura.

Por otro lado, se reflejaron incrementos altos de cobertura glaciar en los años 1994 y 2000; y descensos significativos en los años 1996 y 2010. Estos cambios de forma significativa,

son atribuidos a factores climáticos locales como el Niño y la Niña (Francou & Pouyaud, 2008). Durante los años 1994 y 2000, se registró un evento de El Niño de intensidad moderada, el cual provocó un aumento en la temperatura del aire en la costa del Pacífico. Debido al viento, las nubes cargadas de vapor de agua producen una mayor precipitación en los Andes (Favier et al., 2014; Immerzeel et al., 2014; Jones et al., 2018). En el nevado Huayhuash, este fenómeno se reflejó en un aumento de la cantidad de precipitaciones durante los años mencionados, con una magnitud de 420 mm y 90 mm, respectivamente.

De igual modo, el descenso de la cobertura glaciaria evidenciado en los años 1996 y 2010, fue a causa de la Niña de clase moderada-fuerte (Purdie et al., 2014), puesto que este fenómeno provoca una temperatura baja del ambiente litoral pacífico (Joya et al., 2021), ello provoca menor formación de vapor de agua en las nubes (Ramírez y Muñoz, 2020), lo que es evidenciado en descenso de las precipitaciones (Grenfell, 2011). En el nevado Huayhuash se reflejó descensos de las precipitaciones con magnitudes de 150 mm y 70 mm, respectivamente; por tanto, hay menor formación de nieve (Van den Broeke et al., 2011). Cabe precisar que estos fenómenos son de forma temporal, por lo que los cambios, también son de forma temporal (Ahrens, 2006).

**En el mapa cartográfico de detección de cambio**, se pudo reflejar que la cobertura glaciaria descendió en todo el nevado con una pérdida de 33,5 % de cobertura durante el periodo 1988-2022. El descenso en la cobertura glaciaria se puede observar en el aumento del tamaño de las lagunas que rodean el nevado. Estas pérdidas en la cobertura glaciaria se produjeron con mayor intensidad en las zonas de ablación, que corresponden a las altitudes más bajas de la montaña en el nevado Huayhuash. Al respecto, Oerlemans et al. (2009), mencionan que las zonas de ablación son más propensas a ser derretidas por acción de la temperatura, porque su estado de cristalización no es estable y están mezcladas con detritos (Stefaniak et al.,

2021). Esta última aclaración tiene relevancia, puesto que se ha identificado en el nevado Huayhuash 5 superficies de morrena glaciar con magnitud de 8 km<sup>2</sup> a 10 km<sup>2</sup> (UGRH, 2014). De igual modo se identificó que dichas morrenas presentaban detritos o sedimentos de roca que fueron provenientes de una avalancha o erosión de las cumbres altas (Frey, et al., 2010). Por tanto, esto indica, que el nevado Huayhuash presenta cada vez mayor zona de ablación y menor zona de acumulación, lo que reflejaba la pérdida de cobertura glaciar (Caliskan et al., 2014), ya que las zonas de ablación son las más propensas a ser derretidas (Vuille, et al., 2018). Asimismo, teniendo en consideración la gradiente térmica altitudinal en la cordillera de los andes, la temperatura ambiental es mayor en zonas bajas que en zonas altas (Hock, 2015).

**En el comportamiento de las precipitaciones en el nevado**, se pudo evidenciar que la dinámica es variada con incrementos y descensos, pero con una tendencia de incremento a un ritmo de 6.9 mm/km<sup>2</sup>. También se denoto bajas precipitaciones en los años 1992,2016 y 2020. La variabilidad en las precipitaciones en el nevado Huayhuash se debe a su ubicación en las cadenas montañosas de la cordillera de los Andes (Rivera et al., 2016). Estas montañas impiden que los vientos húmedos procedentes de la costa del Pacífico escapen, lo que resulta en precipitaciones en forma de granizo debido al clima frío en la zona. Esto, a su vez, aumenta el grado de humedad relativa en la zona, que oscila entre el 85% y el 90%. (Janke et al., 2015) y su posterior condensación sólida (Arroyo & Artica, 2017). Asimismo, la precipitación en el nevado Huayhuash también es influenciada por la radiación solar, el cual es más intenso a mayor altitud. La radiación solar total anual promedio durante el periodo 1999-2019 para el nevado Huayhuash fue de 2191 kWh/m<sup>2</sup> (Carenzo et al., 2016). Esta insolación provoca la evaporación de agua de las superficies hídricas como las lagunas de origen glaciar y los suelos húmedos, esta evaporación, luego es retribuido con la



precipitación, provocando un ciclo hídrico local (Fernández Navarro & Ferrando Acuña, 2018).

No obstante, la variabilidad en las precipitaciones también es causada por los fenómenos climáticos de El Niño y La Niña, especialmente en las categorías moderada, fuerte y muy fuerte (Nawrot et al., 2016). Estas anomalías alteran la temperatura ambiental, incrementando la evaporación y la humedad relativa, para un posterior incremento o descenso de las precipitaciones, por alta concentración de agua en las nubes (INAIGEM, 2020). Como se pudo citar en líneas precedentes, el fenómeno del Niño en el nevado Huayhuash provoca un incremento temporal de las precipitaciones y el fenómeno de la Niña provoca una disminución de las precipitaciones (Garg et al., 2017).

**En el comportamiento de las temperaturas en el nevado, se pudo evidenciar que la dinámica es más uniforme con tendencia a incremento a un ritmo promedio de 0.022 °C/km<sup>2</sup>.** Donde la de mayor incremento se evidencia en la temperatura máxima. La variabilidad e incremento de la temperatura en el nevado Huayhuash se debe a la radiación directa del sol en las montañas altas con magnitud media alta de 2191 kwh/m<sup>3</sup> (Funaki et al., 2016), por consiguiente, a mayor altitud, menor es la capa atmosférica de protección frente a la radiación solar, por tanto, las montañas reciben mayor incidencia solar (Ojha et al., 2017). Asimismo, un componente calorífico que incrementa la temperatura ambiental son los suelos desnudos y rocosos (Bellaire et al., 2016), estos tipos de suelo tienen un albedo bajo de 0.22 (Anderson et al., 2018), esto indica mayor capacidad de retener la radiación solar, incrementando la temperatura y su posterior capacidad conductora de calor (Watson et al., 2018). De forma referencial se tiene al nevado Quisoquipina de Cusco, el cual evaluaron el comportamiento de albedo durante el periodo 2012 a 2014, en ello el balance energético demostró que a medida que se presencia mayor suelo desnudo por pérdida de

cobertura glaciar, mayor será la temperatura superficial, porque el estudio demostró un incremento de calor en 25% ante la pérdida de 10km<sup>2</sup> de cobertura glaciar (López-Moreno et al., 2014). Por tanto, el incremento de temperatura ambiental en Huayhuash, irá ascendiendo a medida que haya mayor suelo descubierto (Janke et al., 2017).

**En el comportamiento de la evapotranspiración potencial en el nevado**, se pudo evidenciar un comportamiento muy variado con una tendencia ligera a descenso con ritmo de -0.0084 mm/km<sup>2</sup>. En ella se presenta un valor significativo de descenso en 1992. Como se sabe la evapotranspiración es un proceso físico donde el agua pasa de líquido a gaseoso (Shugar et al., 2018). En este caso la evapotranspiración potencial fue determinado por el SENAMHI teniendo como uso el método de Hargreaves y Samani (2000), el cual usa como variables la temperatura media y la radiación solar (Alcalá-Reygosa et al., 2019). Por tanto, al no presenciar temperaturas altas (20°C), la evaporación no es significativa en las montañas glaciares (Campos et al., 2019; Li et al., 2018). Por el contrario, la acción de la temperatura en las montañas glaciológicas sólo permite la fusión de la cobertura glaciar, más no el proceso de evaporación (Pope & Rees, 2014). En el nevado Huayhuash la baja evapotranspiración, es evidenciado por las distintas lagunas adyacentes al nevado, el cual refleja únicamente el proceso físico de fusión. Asimismo, un estudio hidrológico en el nevado Huayhuash demostró un incremento de caudal de 10% entre los años 2007 y 2015. Esto explica, el incremento de agua para ser escurrida por las redes de drenaje de las montañas (Ali et al., 2017).

**Los resultados indicaron que la precipitación no influyó en los cambios de la cobertura glaciar**, el p-value en el estadístico de ANOVA fue superior a 0.05. La no influencia estadística indica que la variabilidad de las precipitaciones no tuvo asociación con los cambios de la cobertura glaciar. Sin embargo, en un balance de masa glaciar, las

precipitaciones en forma de granizo son los componentes principales para la formación de nieve y hielo (Lo Vecchio et al., 2018). Como se sabe este estudio trabajó cobertura glaciar, esto indica cambios a nivel de superficie, mas no a una dimensión volumétrica, el cual hubiese sido significativo ante una variabilidad de las precipitaciones (Fugazza et al., 2019). Asimismo, cuando más amplio sea el espesor de un glaciar, mayor tiempo tomará para evidenciar un cambio en la superficie, debido a las capas de hielo que la componen. Según una información de referencia proporcionada por el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), el espesor del glaciar situado en la Cordillera Blanca de Ancash varía entre 2.5 y 8 metros (Wortmann et al., 2019), teniendo estas magnitudes de referencia para nevado Huayhuash, explicaría porque la variabilidad de las precipitaciones en forma de granizo no tiene influencia estadística en los cambios superficiales de la cobertura glaciar, esto debido a su alto espesor de masa glaciar.

**Los resultados indicaron que la temperatura si tuvo influencia en los cambios de la cobertura glaciar,** pues el p-value en el estadístico de ANOVA fue inferior a 0.05. Es claro que la temperatura es el factor climático que más influye en los cambios en la cobertura glaciar, y esto se debe a una asociación de proporcionalidad: cuanto más alta sea la temperatura del aire, mayor será el flujo de calor turbulento, lo que se reflejará en la pérdida de cobertura glaciar en forma de fusión líquida (Hemingway et al., 2019), y en forma de desprendimiento de masa, este último tiene mayor ocurrencia en las cumbres de las montañas y las laderas empinadas (Mardones et al., 2018), ya que la temperatura desestabiliza la estructura sólida del glaciar (López, 2021). En el nevado Huayhuash se vio reflejado la pérdida de cobertura glaciar por dos tipos en formación líquida y en derrumbes, porque la formación líquida se refleja en el incremento superficial de lagunas, aproximadamente 11.5 km<sup>2</sup> (Francou et al., 2015). La otra forma de impacto de la temperatura es por los derrumbes. Em el nevado se ha evidenciado en el año 2018 una superficie de 22 km<sup>2</sup> en lenguas glaciares,

masa proveniente de las zonas altas de acumulación y que terminan en zonas de valle (Vignon, 2012), los cuales contienen las erosiones glaciológicas de montaña (Ramos, 2018). Cabe precisar que la temperatura es más intensa a menor altitud en los glaciares, esto indica que es más fuerte en zonas bajas.

**Los resultados indicaron que la evapotranspiración potencial no tuvo influencia en los cambios de la cobertura glaciar**, pues el p-value en el estadístico de ANOVA fue superior a 0.05. Claramente la evapotranspiración potencial es un factor dentro del balance de masa de cobertura glaciar, como factor de salida (Paez, 2016). Sin embargo, su magnitud no es definitiva para cambios de la cobertura glaciar, puesto que se evidenció una intensidad baja de aproximadamente 65 mm/km<sup>2</sup> (Wu et al., 2020), y con relación a ello, estudios indican que una evapotranspiración potencial significativa de impacto en la cobertura glaciar, debe ser de al menos 150 mm/km<sup>2</sup>, para poder generar la evaporación de masa glaciar (Buda et al., 2020). La baja magnitud en ecosistemas de montañas glaciares, es debido al clima frío predominante en los nevados (Liu et al., 2020).

**Las limitaciones** principales de la investigación son la escasa información hidrológica del territorio, lo que hubiese llevado un mejor análisis de balance hídrico. Asimismo, la accesibilidad a la zona glaciar del nevado es complicada para la determinación de muestra y corroboración de resultados, por lo cual se recurrirá a técnicas de obtención de información indirecta como la teledetección.

Una limitación encontrada en el proceso de la fotointerpretación de las imágenes satelitales, fueron las sombras generadas por las pendientes abruptas en el nevado Huayhuash, lo que provocó la confusión de presencia y ausencia de cobertura glaciar.

Las **implicancias** de este estudio es la comprensión de la pérdida de cobertura glaciaria y la magnitud de la influencia de los factores climáticos. Esto lleva a la necesidad de tomar medidas preventivas frente a una pérdida acelerada de la cobertura glaciaria. Asimismo, al monitorear los cambios en el tamaño y la forma de los glaciares, se puede obtener información valiosa sobre cómo el cambio climático está afectando al medio ambiente y cuáles podrían ser las consecuencias a largo plazo para los ecosistemas y la biodiversidad. Esta información es fundamental para la toma de decisiones en políticas públicas y la implementación de medidas para mitigar los efectos del cambio climático.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

- Se demostró un descenso de  $0.74 \text{ km}^2/\text{año}$  en cobertura glaciar de durante el periodo 1988-2022, estos descensos estuvieron influenciados por cambios físicos del hielo y la nieve, que pasan a estado líquido y desprendimiento de masa en las laderas accidentadas de las montañas.
- En el mapa cartográfico, se evidenció pérdida de cobertura glaciar en todo el nevado Huayhuash, esas pérdidas se desarrollaron en las zonas de ablación, las cuales son las más vulnerables a cambios térmicos.
- Las precipitaciones muestran una dinámica muy variada con un incremento promedio a ritmo de  $6.9 \text{ mm}/\text{km}^2$ . La variabilidad de las precipitaciones se debe a los fenómenos meteorológicos La Niña y El Niño. Asimismo, se encuentra involucrada la cadena montaña de los andes tropicales, los cuales retienen las nubes cargadas de agua.
- La temperatura media ambiental en el nevado Huayhuash demostró un incremento a un ritmo de  $0.022 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}^2$ . Este incremento se debió a la alta radiación solar y la mayor presencia de suelos desnudos/rocosos, los cuales retienen el calor y su conducción térmica ambiental.
- La evapotranspiración potencial mostró alta variabilidad en el tiempo con una tendencia ligera a descenso con ritmo de  $-0.0084 \text{ mm}/\text{km}^2$ . El descenso se debe a que la cobertura glaciar se pierde más por fusión que por evaporación.
- La precipitación no tuvo influencia estadística en los cambios presentados de la cobertura glaciar, esto debido a su posible espesor amplio de la masa glaciar.
- La temperatura tuvo una influencia estadísticamente significativa en los cambios observados en la cobertura glaciar, ya que un aumento en la temperatura afecta la

estructura de los glaciares, lo que resulta en fusión líquida y desprendimiento de masa de las laderas.

- La evapotranspiración potencial no tuvo influencia estadística en los cambios presentados de la cobertura glaciar, porque su magnitud promedio solo llega a 65 mm/km<sup>2</sup> y requiere de mayor impacto para presenciar cambios en la cobertura glaciar.

## BIBLIOGRAFIA

- Alcalá-Reygosa, J. (2019). Rock glaciers of the mountains of Mexico; a review of current knowledge and paleoclimatic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 96, 102321. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102321>.
- Ali, I., Shukla, A., & Romshoo, S. A. (2017). Assessing linkages between spatial facies changes and dimensional variations of glaciers in the upper Indus Basin, western Himalaya. *Geomorphology*, 284, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.005>
- ANA. (2014). Inventario de glaciares del Perú. Huaraz.
- Anderson, L. S., & Anderson, R. S. (2018). Debris thickness patterns on debris-covered glaciers. *Geomorphology*, 311, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.014>
- Aparicio Ramón. (2003). Salud pública y enfermería comunitaria. Dialnet. <https://doi.org/84-486-0490-3>.
- Arroyo, J., & Artica, L. (2017). Retroceso glaciar del Nevado Huaytapallana como consecuencia del calentamiento global. Instituto Geofísico del Perú.
- Arroyo, J., Gurmendi, P., & Machuca, E. (2015). Efectos de las anomalías climáticas en la cobertura de nieve de los glaciares centrales del Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 05(01). <https://doi.org/10.18259/acs.2015022>
- ARROYO, Jacinto y GURMENDI, Pedro.(2011.)Cambios en el régimen hídrico de la laguna Lasuntay Chuspicocha por variaciones en el Nevado Huaytapallana. *Revista IGP*, (2):141-150, 2011.ISSN: 2225-5141
- Asenjo Riquelme, C. A. (2009). NAVEGACIÓN Y OPERACIÓN EN. Tesis para optar alTítulo de: Ingeniero Naval, Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias dela Ingeniería Escuela de Ingeniería Naval, Valdivia.
- Autoridad Nacional del Agua (2012). Inventario de glaciares de las cordilleras Vilcanota y Carabaya. Unidad de glaciología y recursos hídricos.Ministerio de Agricultura.
- BATRA, N. (2005). Estimation and comparison of evapotranspiration from multiple satellites for clear sky days. Cincinnati: Tesis Master of Science in Environmental Engineering, Universidad de Cincinnati
- Bellaire, S., Jamieson, B., Thumlert, S., Goodrich, J., & Statham, G. (2016). Analysis of long-term weather, snow and avalanche data at Glacier National Park, B.C., Canada. *Cold Regions Science and Technology*, 121, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.10.010>
- Boquez J., & Karina Uribe Peña. (2007). La “reagrupación familiar” como concepto y límite a los poderes del Estado de Chile en materia migratoria. *Revista de Derecho*, 34(2), 225–246. <https://doi.org/https://dialnet.unirioja.es/servlet/dcart?info=link&codigo=8269402&orden=0>



- Brenning, A., (2003). La Importancia de los Glaciares de Escombros en los Sistemas Geomorfológico e Hidrológico de la Cordillera de Santiago: Fundamentos y Primeros Resultados. *Revista de Geografía Norte Grande*, (30), 7-22.
- Brenning, A., Long, S., & Fieguth, P. (2012). Detecting rock glacier flow structures using Gabor filters and IKONOS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 125, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.07.005>
- Brown, P. (2013). Climate News Network. Andes Tropical Glaciers going fast (en línea). Consultado en Julio 2015. Disponible en: <http://www.climatenewsnetwork.net/andes-tropical-glaciers-going-fast/>
- Caliskan, O., Gürgen, G., Yılmaz, E., & Yeşilyurt, S. (2014). Debris-covered Glaciers During Glacial and Interglacial Periods on the Taurus Mountains (Turkey). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 120, 716–721. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.02.154>
- Campos, N., Tanarro, L. M., Palacios, D., & Zamorano, J. J. (2019). Slow dynamics in debris-covered and rock glaciers in Hofsdalur, Tröllaskagi Peninsula (northern Iceland). *Geomorphology*, 342, 61–77. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.005>
- CAN (CLIMATE ACTION NETWORK), (2014). Glaciares Andinos: La necesidad de una agenda transversal. *Climate Action Network*, pp. 27.
- CAN. (2013). Glaciares andinos: La necesidad de una agenda transversal.
- Carenzo, M., Pellicciotti, F., Mabillard, J., Reid, T., & Brock, B. W. (2016). An enhanced temperature index model for debris-covered glaciers accounting for thickness effect. *Advances in Water Resources*, 94, 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.001>
- Carenzo, M., Pellicciotti, F., Mabillard, J., Reid, T., & Brock, B. W. (2016). An enhanced temperature index model for debris-covered glaciers accounting for thickness effect. *Advances in Water Resources*, 94, 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.001>
- Casassa, G. y otros, (2007). Current status of Andean glaciers. *Global and Planetary Change*, Volumen 59, pp. 1-9.
- CASTILLO F, E. (1996). *Agrometeorología*. Ediciones Mundi – Prensa. Barcelona, Esp. 517 pp
- CASTILLO PALMA, E., (2017). “Factores ambientales de temperatura y precipitación que inciden en la dinámica de la montaña glaciar Pastoruri”. S.l.: s.n.
- CASTILLO, Eloy. (2017). Factores ambientales de temperatura y precipitación que inciden en la dinámica de la montaña glaciar Pastoruri. Tesis (Titulación en Ingeniería Ambiental). Lima: Universidad Cesar Vallejo. Disponible en: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/3507>
- Chisolm, R., McKinney, D., Gomez, J., Voss, K., (2012). Emerging Glacial Lakes in the Cordillera Blanca, Peru: A Case Study at Arteson Glacier. *American Geophysical Union Conference*

- CHUVIECO SALNERO, E., 1990. Fundamentos de teledetección espacial. S.l.: s.n. ISBN8432126802.
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. Primera edición. Madrid. Editorial Rialph.
- CHUVIECO, E., 2002. Teledetección ambiental. 2002. S.l.: s.n.
- Collet M. (2010). Suivi spatio-temporel des calottes glaciaires De l'Antisana et du Cotopaxi (équateur): Analyse par télédétection dans un contexte de changement climatique. Tesis Universidad de Rennes 2-Haute Bretagne. Rennes, Francia.
- Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (1992). Climate Change Secretariat (UNFCCC). pp. 1-44. ISBN: 9292190466
- Cortés, C. B., & López Gama, H. (2011). Factores que afectan el desempeño académico de los estudiantes de nivel superior en Rioverde, San Luis Potosí, México. CPU-e, Revista de Investigación Educativa, (12), 1-18.
- Coudrain, A., Francou, B. & Kundzewicz, Z. W., (2005). Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources. Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 50(6), pp. 925-932.
- CUADROS AMANQUI, B., (2014). Evolución de la cobertura glaciar del Nevado Ananea entre 1985 - 2010. Investigación Andina, vol. 14, pp. 11
- Cuadros-Amanqui, B. (2019). Evolución de la Cobertura Glaciar del Nevado Ananea entre 1985-2010. Concytec.gov.pe. [https://alicia.concytec.gov.pe/vufind/Record/UANT\\_123d18acab58e463f3de58a7f2a0eac8](https://alicia.concytec.gov.pe/vufind/Record/UANT_123d18acab58e463f3de58a7f2a0eac8)
- Cuffey, K. M. & Paterson, W. S. B., (2010). The Physics of Glaciers. 4 ed. USA: Elsevier.
- Dafne, C. (2015). Efecto de la cobertura vegetal nativa sobre la desglaciación del nevado Huaytapallana en diferentes altitudes. Uncp.edu.pe. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3501>
- DE FINA, A; AREVALO, A. C. 1983. Climatología y Fenología Agrícola. 2 ed. Editorial Universitaria. Buenos Aires, Arg. Pp 48-50,
- Díaz, H., & Markgraf, V. (2000). El Niño and the Southern Oscillation. Multiscale variability and global and regional impacts. Cambridge University Press, New York, pp. 496.
- Ding, D. H. Shangguan, and R. J. Wang, . (2019). "Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015, Advances in Climate Change Research, vol. 10, no. 4, pp. 203–213, doi:10.1016/J.ACCRE.2020.03.003.
- Dingman, S. L. (2002). Physical Hydrology (Segunda ed.). New Jersey: Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall.
- Falaschi, Daniel, Lenzano, Maria Gabriela, Tadono, Takeo, Vich, Alberto Ismael, & Lenzano, Luis Eduardo. (2017). Balance de masa geodésico 2000-2011 de los glaciares de la Cuenca Del Río Atuel, Andes Centrales de Mendoza (Argentina). Geoacta, 42(2), 7-22. Recuperado en 04 de marzo de 2023, de

[http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1852-77442017000200002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-77442017000200002&lng=es&tlng=es).

- Favier, V., Wagnon, P., Charazin, J. P., Maisincho, L., & Coudrain, A. (2004). One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 109, 1-15. doi:10.1029/2003JD004359
- Fernández Navarro, H. A., & Ferrando Acuña, F. J. (2018). Glaciares rocosos en la zona semiárida de Chile: relevancia de un recurso hídrico sin protección normativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27(2). <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n2.63370>
- Flores, Assael (2020). Análisis cuantitativo de variabilidad climática en relación a la pérdida superficial con datos Landsat en nevados peruanos 2010-2020. Upeu.edu.pe. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/20.500.12840/5414>
- Francou, B. (2015). The Guardian. Global warming spells disaster for tropical Andes glaciers (en línea). Disponible en: <http://www.theguardian.com/science/2015/jan/27/global-warming-glacierdepletion-andes>
- Francou, B., & Pouyaud, B. (2008). Glaciares: ¿cómo y dónde estudiarlos? *Revista Virtual REDESMA*, 2(3), 9-17.
- FRANCOU, Bernard y POUYAUD, Bernard. (2014). Métodos de observación de glaciares en los andes tropicales, mediciones de terreno y procesamiento de datos (en línea) Francia: Junio de 2014. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/282171220>
- Fugazza, D., Senese, A., Azzoni, R. S., Maugeri, M., Maragno, D., & Diolaiuti, G. A. (2019). New evidence of glacier darkening in the Ortles-Cevedale group from Landsat observations. *Global and Planetary Change*, 178, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.04.014>
- Funaki, S., & Asaoka, Y. (2016). Long-term Change in Ablation Area of Tropical Glaciers by Landsat Data. *Procedia Engineering*, 154, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.438>
- Garg, P. K., Shukla, A., & Jasrotia, A. S. (2017). Influence of topography on glacier changes in the central Himalaya, India. *Global and Planetary Change*, 155, 196–212. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.07.007>
- Garreaud, R. D., (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, Volumen 22, pp. 3-11.
- Geoestudios. (2008). *Industria Minera; Industria Minera*. <https://www.industriaminera.cl/producto/geoestudios-ltda-evaluacion-geotecnica-general-alternativas/>
- Gonzales Ferro, Luis Ángel. (2015). Estudio Multitemporal del Nevado Ampay en el Contexto del Cambio Climático: 1986 – 2011. Auspiciado por el Instituto de Investigación Universidad Región. Monografía 24 paginas, Cusco

- Groeber, P. (2021). Bosquejo paleogeográfico de los glaciares del Diamante y Atuel. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 9(2), 89–108. <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/1377>
- GUTIÉRREZ. M. 2000. Teledetección Nociones y aplicaciones. Madrid - España. 431p.
- Hemingway, J. D., Spencer, R. G. M., Podgorski, D. C., Zito, P., Sen, I. S., & Galy, V. V. (2019). Glacier meltwater and monsoon precipitation drive Upper Ganges Basin dissolved organic matter composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 244, 216–228. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.10.012>
- Hernán, L. (2022). Eventos hidrometeorológicos de lluvia sobre nieve en los Andes de Chile Central. *Uchile.cl*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188859>
- Hock, R. (2005). Glacier melt: a review of processes and their modeling. *Progress in Physical Geography*, 29, 3, 362-391.
- Hoffmann, D. (2015). La contribución de los glaciares al agua de La Paz. [https://www.cambioclimatico-bolivia.org/pdf/cc-20150608-la\\_contrib\\_\\_\\_\\_.pdf](https://www.cambioclimatico-bolivia.org/pdf/cc-20150608-la_contrib____.pdf)
- Huayaney, M. E. A., & de la Cruz, J. F. M. (2009). Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca. *Investigaciones Sociales*, 13(22), 71-83.
- Huayaney, M., & Ramos Alonzo, R. (2018). Evolución de los glaciares de los nevados Collquepucre, Llongote, Pariacaca y Ticcla en la cuenca del río Cañete. *Investigaciones Sociales*, 21(38), 97–106. <https://doi.org/10.15381/is.v21i38.14219>
- Huddart, D. & Stott, T., (2010). *Earth Environment. Present, past and future*. s.l.:Wiley & Sons
- Huddart, D. & Stott, T., (2010). *Earth Environment. Present, past and future*. s.l.:Wiley & Sons
- Immerzeel, W. W., Kraaijenbrink, P. D. A., Shea, J. M., Shrestha, A. B., Pellicciotti, F., Bierkens, M. F. P., & de Jong, S. M. (2014). High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing of Environment*, 150, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.025>
- INAIGEM,(2017).“Informe de la Situación de los Glaciares y Ecosistemas de montaña.
- INAIGEM. (2016).Ministerio del Ambiente.Disponible en: <http://www.inaigem.gob.pe/>
- INAIGEM.(2017).MANUAL metodológico de inventario nacional de glaciares.Disponible en: <http://www.inaigem.gob.pe/biblioteca/publicaciones/compilado>ISSN: 2017-12673
- INAMHI, (2001). Estudio sobre el cambio climático, Detección de cambio climático en el Ecuador. [www.inamhi.gov.ec/meteorologia/ecambio.htm](http://www.inamhi.gov.ec/meteorologia/ecambio.htm)
- INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DEMONTAÑA, 2020. Inventario nacional de glaciares. S.l.: s.n. ISBN9788578110796. Disponible en: [www.inaigem.gob.pe](http://www.inaigem.gob.pe).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014): Cambio Climático 2014:Informe de síntesis. Contribución del Grupo de trabajo I, II y III al Quinto

- Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático". IPCC, Ginebra, Suiza.
- IPCC, 2013. *Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- IPCC, 2014. *Climate Change (2014): Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom and New York: University Cambridge Press.
- IPCC. (2001). Segundo informe de evaluación, Cambio Climático 2001: Efectos, adaptación, y vulnerabilidad. Los ecosistemas y la diversidad biológica.
- IPCC. Cambio climático. (2014). Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs. ISBN: 9789291693436
- Janke, J. R., Bellisario, A. C., & Ferrando, F. A. (2015). Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. *Geomorphology*, 241, 98–121. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.034>
- Janke, J. R., Ng, S., & Bellisario, A. (2017). An inventory and estimate of water stored in firn fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River Basin, Chile. *Geomorphology*, 296, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.002>
- Jasso-Castañeda, Carolina, Gama-Castro, Jorge E., Solleiro-Rebolledo, Elizabeth, & Díaz-Ortega, Jaime. (2012). Morfogénesis, procesos y evolución del horizonte Bw cámbico en tefrapaleosuelos del volcán Nevado de Toluca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(1), 37-47. Recuperado en 04 de marzo de 2023, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222012000100004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222012000100004&lng=es&tlng=es).
- Jones, D. B., Harrison, S., & Anderson, K. (2019). Mountain glacier-to-rock glacier transition. *Global and Planetary Change*, 181, 102999. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102999>
- Jones, D. B., Harrison, S., Anderson, K., Selley, H. L., Wood, J. L., & Betts, R. A. (2018). The distribution and hydrological significance of rock glaciers in the Nepalese Himalaya. *Global and Planetary Change*, 160, 123–142. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.11.005>
- Joya, E., Bromand, M. T., Murtaza, K. O., & Dar, R. A. (2021). Current glacier status and ELA changes since the Late Pleistocene in the Hindu Kush Mountains of Afghanistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 219, 104897. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104897>
- Karimi, N., Farokhnia, A., Shishangosht, S., Elmi, M., Eftekhari, M., & Ghalkhani, H. (2012). Elevation changes of Alamkouh glacier in Iran since 1955, based on remote

- sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.04.009>
- Kaser, G. & Osmaston, H., (2002). *Tropical Glaciers*. Cambridge: s.n
- KASER, G. y OSMASTON, H., (2002). *Tropical glaciers*. S.l.: UNESCO 2002. ISBN 0 52163333 8.
- Kaser, G., (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, pp. 93-103.
- Knight, P. G. (1999) *Glaciers*. Primera edición. Cheltenham: Stanley Thornes, 261pp.
- Kozhikkodan Veetil, B., Pereira, S. F. R., Wang, S., Valente, P. T., Grondona, A. E. B., Rondón, A. C. B., Rekowsky, I. C., De Souza, S. F., Bianchini, N., Bremer, U. F., & Simões, J. C. (2016). Un análisis comparativo del comportamiento diferencial de los glaciares en los Andes Tropicales usando teledetección. *Investigaciones Geográficas*, 51, 3. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2016.41215>
- Kuhn, M. (1989). The response of the equilibrium line altitude to climatic fluctuations: theory and observations. In Oerlemans, J., ed. *Glacier fluctuations and climatic change*. Dordrecht, etc., Kluwer Academic Publishers, 407–417.
- Kuhn, M. (1995). The mass balance of very small glaciers. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 31, 171–179
- Laute, K., & Beylich, A. A. (2012). Influences of the Little Ice Age glacier advance on hillslope morphometry and development in paraglacial valley systems around the Jostedalbreen ice cap in Western Norway. *Geomorphology*, 167-168, 51–69. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.010>
- Lehmkuhl, F. (2000). Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. *Quaternary International* (65-66): 15-29
- Lehmkuhl, F. (2006). Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments. *Quaternary International* (65-66): 15-29
- Li, G., Lin, H., & Ye, Q. (2018). Heterogeneous decadal glacier downwasting at the Mt. Everest (Qomolangma) from 2000 to ~ 2012 based on multi-baseline bistatic SAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 206, 336–349. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.032>
- Lo Vecchio, A., Lenzano, M. G., Durand, M., Lannutti, E., Bruce, R., & Lenzano, L. (2018). Estimation of surface flow speed and ice surface temperature from optical satellite imagery at Viedma glacier, Argentina. *Global and Planetary Change*, 169, 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.08.001>
- Lokas, E., Zaborska, A., Koliccka, M., Rózycki, M., & Zawierucha, K. (2016). Accumulation of atmospheric radionuclides and heavy metals in cryoconite holes on an Arctic glacier. *Chemosphere*, 160, 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.06.051>
- López Avendaño, J. E., Díaz Valdés, T., Watts Thorp, C., Rodríguez, J. C., Castellanos Villegas, A. E., Partida Ruvalcaba, L., & Velázquez Alcaraz, T. D. (2015).

- EVAPOTRANSPIRACIÓN Y COEFICIENTES DE CULTIVO DE CHILE BELL EN EL VALLE DE CULIACÁN, MÉXICO. *Terra Latinoamericana*, 33(3), 209-219.
- López, A. I. (2021). Los glaciares de todo el mundo se están derritiendo rápidamente, confirma el estudio más amplio hasta la fecha - National Geographic en Español. National Geographic En Español. <https://www.ngenespanol.com/ecologia/los-glaciares-de-todo-el-mundo-se-estan-derritiendo-rapidamente/>
- López-Moreno, J. I., Fontaneda, S., Bazo, J., Revuelto, J., Azorin-Molina, C., Valero-Garcés, B., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., Zubieta, R., & Alejo-Cochachín, J. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.10.010>
- Lovell, A. M., Carr, J. R., & Stokes, C. R. (2018). Topographic controls on the surging behaviour of Sabche Glacier, Nepal (1967 to 2017). *Remote Sensing of Environment*, 210, 434–443. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.036>
- Lundgren, P., Samsonov, S., Lopez, V. and Ordoñez, M., (2015). Deep source model for Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, constrained by interferometric synthetic aperture radar observations. *Geophysical Research Letters*. 42(12), pp. 4816-4823. Available at: Available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015GeoRL..42.4816L> DOI :10.1002/2015GL063858
- Magrin, G., C. Gay García, D. CruzChoque, J.C. Giménez, A.R. Moreno, G.J. Nagy, C. Nobre & A. Villamizar. (2007). Latin America. pp. 581-615. In: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson (eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Mantua, N.J., & Hare, S.R. (2002). The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography*, 58, 35–44.
- Mardones, M., Aguayo, M., Smith, E., & Ruiz, P. (2018). Retroceso glacial reciente en el Campo de Hielo Norte, región de Aysén, Chile: relación con variaciones climáticas. *Revista de Geografía Norte Grande*, 121-147.
- Martínez-Alva, Germán, Gheno-Heredia, Yaqueline Antonia, Vieyra-Reyes, Patricia, Martínez-Campos, Ángel Roberto, Castillo-Cadena, Julieta, López-Arriaga, Jerónimo Amado, Manzur-Quiroga, María de los Ángeles, & Arteaga-Reyes, Tizbe Teresa. (2020). GEODISPONIBILIDAD DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EN SUELOS AGRÍCOLAS QUE REPRESENTAN RIESGO PARA EL AMBIENTE Y LA SALUD DE LA POBLACIÓN DEL NEVADO DE TOLUCA, MÉXICO. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(4), 847-856. Epub 13 de septiembre de 2021. <https://doi.org/10.20937/rica.53614>
- Melissa. (2022). Identificación de eventos meteorológicos asociados a la ocurrencia de precipitación en patrones de vientos horizontales en la tropósfera para el Altiplano peruano boliviano en invierno. [Unmsm.edu.pe. https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12672/18296](https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12672/18296)

- MINAM. (2009). Plan maestro del Parque Nacional Huascarán 2010 - 2015. SERNANP, Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. Huaraz - Perú
- Moreno G. (1996). Introducción a la metodología de la investigación educativa. 2ª ed. Mexico, Guadalajara: Progreso S.A de C.V. p. p.128
- Nawrot, A. P., Migala, K., Luks, B., Pakszys, P., & Glowacki, P. (2016). Chemistry of snow cover and acidic snowfall during a season with a high level of air pollution on the Hans Glacier, Spitsbergen. *Polar Science*, 10(3), 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.06.003>
- Nijhawan, R., Garg, P. K., & Thakur, P. K. (2016). Monitoring of glacier in Alaknanda basin using remote sensing data. *Perspectives in Science*, 8, 381–383. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.081>
- Obregón et al. (2019), "CLIMATE SCENARIOS FOR PERU TO 2030,". Available: <http://www.senamhi.gob.pe>  
<http://www.senamhi.gob.pe>
- Oerlemans, J., Giessen, R.H., & van den Broeke, M.R. (2009). Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland), *J. Glaciol.*, 55, 729–736.
- Ohmura, A. (2012). Enhanced temperature variability in high-altitude climate change. *Theor. Appl. Climatol.* 110, 499–508.
- Ojha, S., Fujita, K., Sakai, A., Nagai, H., & Lamsal, D. (2017). Topographic controls on the debris-cover extent of glaciers in the Eastern Himalayas: Regional analysis using a novel high-resolution glacier inventory. *Quaternary International*, 455, 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.08.007>
- Ortega, Rafael. (2021). Relación entre el comportamiento dinámico del área glaciaria del nevado Santocoronado y las variaciones climáticas del entorno, Moquegua 2019. Unam.edu.pe. <https://doi.org/http://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/256>
- Paez, B., & García, C. A. (2016). Análisis Multitemporal del Retroceso Glaciario en la Sierra Nevada de Santa Marta - Colombia para los Períodos 1986, 1996, 2007 y 2014. Udistrital.edu.co. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/11349/3508>
- Painter, J. (2007) "Deglaciation in the Andean regions. Human Development Report Office Occasional Paper". PNUD, 21 p.
- Peixoto, J.P. and Oort, A.H. (1992) *Physics of climate*. American Institute of Physics, New York.
- Peña, L., & Moraes, D. (2020). Effects of Climate Change on the glaciers of the Nevados de Chillán Volcanic Complex. *Uchile.cl*. <https://doi.org/https://www.revistaterraaustralis.cl/index.php/rgch/article/view/61>
- Petrakov, D., Shpuntova, A., Aleinikov, A., Käab, A., Kutuzov, S., Lavrentiev, I., Stoffel, M., Tutubalina, O., & Usabaliev, R. (2016). Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan, during 2003–2013. *Science of the Total Environment*, 562, 364–378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.162>



- Pizarro-Tapia, Roberto, Cabrera-Jofre, Cynthia, Morales-Calderón, Carolina, & Flores-Villanelo, Juan Pablo. (2011). Variación temporal de las precipitaciones y caudales en la cuenca del Maipo, y la potencial influencia glaciaria en la producción de agua (1963-2006). *Tecnología y ciencias del agua*, 2(3), 05-19. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222011000300001&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000300001&lng=es&tlng=es).
- Polk, M. H., Young, K. R., Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., & Carey, M. (2017). Exploring hydrologic connections between tropical mountain wetlands and glacier recession in Peru's Cordillera Blanca. *Applied Geography*, 78, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.11.004>
- Ponce, E. (2008). Análisis de cambio de cobertura vegetal y fragmentación en el Corredor de Conservación Comunitaria El Ángel - Bosque Golondrinas, provincia del Carchi (1996 - 2005). Tesis para obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente. Escuela Superior Politécnica del Ejército. Sangolquí, Ecuador
- Pope, A., & Rees, G. (2014). Using in situ spectra to explore Landsat classification of glacier surfaces. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.08.007>
- Pouyaud, B., Francou, B., Ribstein, P., Wagnon, P., & Berton, P. (1998). Programa "nieves y glaciares tropicales" (NGT): resultados (1991-1996) obtenidos en Bolivia. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(3), .
- Purdie, H., Anderson, B., Chinn, T., Owens, I., Mackintosh, A., & Lawson, W. (2014). Franz Josef and Fox Glaciers, New Zealand: Historic length records. *Global and Planetary Change*, 121, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.06.008>
- Rabatel, A. y otros, (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, Volumen 7, pp. 81-102.
- RAMOS ALONZO, R.B., (2018). Evolución de la cobertura glaciaria del nevado Coropuna y su relación con el entorno climático. S.l.: Universidad Agraria La Molina. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3321>.
- Ramos, A. (2018). Evolución de la cobertura glaciaria del nevado Coropuna y su relación con el entorno climático. *Lamolina.edu.pe*. <https://doi.org/P40.R35-T BAN UNALM>
- Reinthal, J., Paul, F., Granados, H. D., Rivera, A., & Huggel, C. (2019). Area changes of glaciers on active volcanoes in Latin America between 1986 and 2015 observed from multi-temporal satellite imagery. *Journal of Glaciology*, 65(252), 542-556.
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., & Vuille, M. (2016). Balance de masaglaciar. Valdivia, Chile: Centro de Estudios Científicos .
- Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C., & Lange, H. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Investigaciones Geográficas*, 34, 29. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2000.27709>
- Rojo Abuin, J. M. (2007). Regresión lineal múltiple. Informe de Laboratorio de Estadística, Instituto de Economía y Geografía, Madrid.

- Romero Saldaña, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Revista Enfermería del Trabajo*, 6(3), 105-114.
- Saavedra, M. Calvo, and Y. César Jiménez, (2011) "Caracterización climática de la circulación atmosférica en América del Sur,"
- Sánchez, Marcela, & Carvacho, Luis. (2006). Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAAVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. *Revista de geografía Norte Grande*, (36), 49-60. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000200003>
- SENANP. (2010). Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas Del Perú. Disponible en: <http://www.sernanp.gob.pe/huascarán>
- Shugar, D. H., Clague, J. J., & McSaveney, M. J. (2018). Late Holocene activity of Sherman and Sheridan glaciers, Prince William Sound, Alaska. *Quaternary Science Reviews*, 194, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.016>
- Stefaniak, A. M., Robson, B. A., Cook, S. J., Clutterbuck, B., Midgley, N. G., & Labadz, J. C. (2021). Mass balance and surface evolution of the debris-covered Miage Glacier, 1990–2018. *Geomorphology*, 373, 107474. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107474>
- Stern, Charles R, Navarro H, Ximena, Pino N, Jimena D, & Vega S.M., Rodrigo M.. (2008). New Obsidian Source In The Araucanía Región (South Central Chile): Chemical And Archaeological Context Of The Black Riolitic Obsidian From The Nevados De Sollipulli. *Magallania (Punta Arenas)*, 36(2), 185-193. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-22442008000200014>
- Sustentable, C. (2006). Glaciares y minería: Continua la destrucción de los glaciares .
- Tang, X. Lv, and Y. He, .(2013). "Features of climate change and their effect on glacier snow melting in Xinjiang, China," *Comptes Rendus Geoscience*, vol.345, no. 2, pp. 93–100, doi: 10.1016/J.CRTE.2013.01.005.
- Tarbut & Lutgens, (2005). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. 8 ed. Madrid: Pearson.
- TARBUCK, Edward y LUTGENS, Frederick. (2005). *Ciencias de la Tierra*. 8.a ed. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid. 712 pp. ISBN: 8420549983
- Tunupa. (2010). Glaciares, agua y biodiversidad. *Boletín N° 64*.
- Úbeda, J. (2010). El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera occidental de los andes centrales). Tesis para optar al grado de Doctor. Madrid, España. Universidad Complutense De Madrid
- UGRH (2014). Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas. Ministerio de Agricultura y Riego, Autoridad Nacional del Agua, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos. UGRH-ANAMINAGRI, Lima, 81 pp.
- Ulloa Pilar. (2020). Evolución temporal de albedo en función de la variabilidad climática en glaciares de Los Andes semiáridos, zona Central de Chile. *Uchile.cl*. <https://doi.org/https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173930>
- UNEP, (2007). *Global Outlook for Ice & Snow*. Birkeland: s.n.

- USGS, (2014). <http://landsat.usgs.gov/>. Available at: [http://landsat.usgs.gov/about\\_landsat5.php](http://landsat.usgs.gov/about_landsat5.php)
- VALDERRAMA, Santiago.(2015).Pasos para elaborar proyectos de investigación científica. 5.a ed.Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 495 pp.ISBN: 9786123028787
- VARGAS GONZÁLES, C.; VILLON REINOSO, C.; PASAPERA GONZALES, J.(2009). Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial – CONIDA.Comparación de Técnicas para el mapeo de cobertura glaciar con imágenes LANDSATy ASTER en la Cordillera Blanca. Ancash - Perú.
- Vaughan, D., Comiso, J. C., Allison, I., & Zhang, T. (2013). Observations: Cryosphere. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. ResearchGate; unknown. [https://www.researchgate.net/publication/285661352\\_Observations\\_Cryosphere\\_Climate\\_Change\\_2013\\_The\\_Physical\\_Science\\_Basis](https://www.researchgate.net/publication/285661352_Observations_Cryosphere_Climate_Change_2013_The_Physical_Science_Basis)
- Vergara, W., Deeb, A., Valencia, A., Bradley, R., Francou, B., Zarzar, A.,Grünwaldt, A. y Haeussling, S. (2007) “Economic Impacts of Rapid Glacier retreatin the Andes” *EOS Transactions, American Geophysical Union*. Volumen 88,Número 25, p. 261-268.
- VIGNON, F., (2002). Glaciares y recursos hidricos en el valle alto deI rio Santa. , no.January 2002, pp. 63.
- VILLÓN, Máximo.(2004). Hidrología. Cartago: Tecnológica de Costa Rica. 474 pp.ISBN: 9977661596
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. y Bradley, R. (2008). “Climate Change and Tropical Andean Glaciers: Past, present and future”*Earth Science Reviews*. Volumen 89, p. 79-96.
- Vuille, M.; Diaz, H. F. y Vergara, W. (2018) “Threats to WaterSupplies in the Tropical Andes” *Science*. Volumen 312. Número 5781, p. 1755-1756
- Watson, C. S., King, O., Miles, E. S., & Quincey, D. J. (2018). Optimising NDWI supraglacial pond classification on Himalayan debris-covered glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 217, 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.020>
- Wortmann, M., Bolch, T., Su, B., & Krysanova, V. (2019). An efficient representation of glacier dynamics in a semi-distributed hydrological model to bridge glacier and river catchment scales. *Journal of Hydrology*, 573, 136–152. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.006>
- Xiang, X., Lv, X., & He, Y. (2018). Features of climate change and their effects on glacier snow melting in Xinjiang, China. *Comptes Rendus Geoscience*, 345(2), 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.01.005>
- Zalazar, L. V., Hidalgo, F., Castro, M. A., Gargantini, H., Giménez, M. M., Pitte, P. M., Ruiz, L. E., & Villalba, R. (2018). Glaciares de Argentina: Resultados preliminares del Inventario Nacional de Glaciares. Conicet.gov.ar. <https://doi.org/2519-7649>
- Zeballos, Gabriel, Soruco, Álvaro, Cusicanqui, Diego, Joffré, Rafael, & Rabatel, Antoine. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y

humedales de alta montaña en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 49(3), 14-26.  
[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1605-25282014000300003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282014000300003&lng=es&tlng=es).

## ANEXOS

### Anexo 1. Ficha de Registro de cobertura glaciar

|                                     |                                     |                                     |   |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| UBICACIÓN DEL<br>AREA DE<br>ESTUDIO | NEVADO HUAYHUASH - ANCASH           |                                     |   |
| COORDENADAS                         | 0°16'08"S 76°54'19"O                |                                     |   |
| PERIODO DE<br>ANALISIS              | 1988-2022                           |                                     |   |
| AÑO                                 | <b>PRECIPITACION</b>                | <b>TEMPERATURA<br/>PROMEDIO</b>     | <b>EVAPOTRANSPIRAICON<br/>POTENCIAL</b> |
|                                     | milímetros por<br>kilómetro         | grados centígrados por<br>kilómetro | milímetros por kilómetro                |
|                                     | cuadrado -<br>(mm/km <sup>2</sup> ) | cuadrado - (°C/km <sup>2</sup> )    | cuadrado - (mm/km <sup>2</sup> )        |
| 1988                                |                                     |                                     |   |
| 1990                                |                                     |                                     |   |
| 1992                                |                                     |                                     |   |
| 1994                                |                                     |                                     |   |
| 1996                                |                                     |                                     |   |
| 1998                                |                                     |                                     |   |
| 2000                                |                                     |                                     |   |
| 2002                                |                                     |                                     |   |
| 2004                                |                                     |                                     |   |
| 2006                                |                                     |                                     |   |
| 2008                                |                                     |                                     |   |
| 2010                                |                                     |                                     |   |
| 2012                                |                                     |                                     |   |
| 2014                                |                                     |                                     |   |
| 2016                                |                                     |                                     |   |
| 2018                                |                                     |                                     |   |
| 2020                                |                                     |                                     |   |
| 2022                                |                                     |                                     |   |

## Anexo 2. Registro de precipitación superficial y temperatura superficial

| UBICACIÓN DEL<br>AREA DE<br>ESTUDIO |          | NEVADO HUAYHUASH - ANCASH       |  |                       |
|-------------------------------------|----------|---------------------------------|--|-----------------------|
| COORDENADAS                         |          | 0°16'08"S 76°54'19"O            |  |                       |
| PERIODO DE<br>ANALISIS              |          | 1988-2022                       |  |                       |
| AÑO                                 | SATELITE | FECHA DE<br>IMAGEN<br>ADQUIRIDA | COBERTURA GLACIAR                          |                       |
|                                     |          |                                 | Kilómetros<br>cuadrados (km <sup>2</sup> ) | Tasa de Cambio<br>(%) |
| 1988                                |          |                                 |  |                       |
| 1990                                |          |                                 |  |                       |
| 1992                                |          |                                 |  |                       |
| 1994                                |          |                                 |  |                       |
| 1996                                |          |                                 |  |                       |
| 1998                                |          |                                 |  |                       |
| 2000                                |          |                                 |  |                       |
| 2002                                |          |                                 |  |                       |
| 2004                                |          |                                 |  |                       |
| 2006                                |          |                                 |  |                       |
| 2008                                |          |                                 |  |                       |
| 2010                                |          |                                 |  |                       |
| 2012                                |          |                                 |  |                       |
| 2014                                |          |                                 |  |                       |
| 2016                                |          |                                 |  |                       |
| 2018                                |          |                                 |  |                       |
| 2020                                |          |                                 |  |                       |
| 2022                                |          |                                 |  |                       |

Anexo 3. Validación de instrumentos

**Experto N°1**

**INFORME DE OPINIÓN DE EXPERTOS DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN**

**I. DATOS GENERALES**

**1.1. Apellidos y Nombres del validador: Cotrina Tello, Tania Estela**

**1.2. Cargo: Consultor ambiental**

**1.3. Especialidad del validador: Ciencias ambientales y Geomática**

**1.4. Título de la Investigación: INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LOS CAMBIOS DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO HUAYHUASH DURANTE EL PERIODO 1988-2022, ANCASH.**

**1.5. Autor del Instrumento: Aurora Shessira Hoyos García**

**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN**

En la siguiente tabla se busca valorar los instrumentos de recolección de datos referente a los elementos climáticos y la cobertura glaciar (ver capítulo IV).

| CRITERIOS                     | INDICADORES   | VALORACIÓN           |                   |                 |                     |                      |
|-------------------------------|---|----------------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
|                               |   | Deficiente<br>00-20% | Regular<br>21-40% | Buena<br>41-60% | Muy Buena<br>61-80% | Excelente<br>81-100% |
| <b>Claridad</b>               | Esta formulado con lenguaje apropiado y específico                |                      |                   |                 |                     | x                    |
| <b>Objetividad</b>            | Esta expresado en conductas observables                           |                      |                   |                 | x                   |                      |
| <b>Actualidad</b>             | Adecuado al avance de la ciencia y tecnología                     |                      |                   |                 | x                   |                      |
| <b>Organización</b>           | Existe una organización lógica                                    |                      |                   |                 | x                   |                      |
| <b>Suficiencia</b>            | Comprende los aspectos en cantidad y calidad                      |                      |                   |                 | x                   |                      |
| <b>Intencionalidad</b>        | Adecuado para valorar aspectos de las estrategias                 |                      |                   |                 |                     | x                    |
| <b>Consistencia</b>           | Basados en aspectos teórico-científicos                           |                      |                   |                 |                     | x                    |
| <b>Coherencia</b>             | Entre los índices, indicadores y dimensiones                      |                      |                   |                 | x                   |                      |
| <b>Metodología</b>            | La estrategia responde al propósito del diagnóstico               |                      |                   |                 | x                   |                      |
| <b>Pertinencia</b>            | El instrumento es funcional para el propósito de la investigación |                      |                   |                 | x                   |                      |
| <b>PROMEDIO DE VALIDACION</b> | 16  |                      |                   |                 |                     |                      |

Nota. Valorar de forma numérica

### III. PERTINENCIA DE LOS ITEMS O REACTIVOS DEL INSTRUMENTO

En este capítulo se busca valorar los indicadores que conforman el instrumento de recolección de datos, tanto para los elementos climático como para la cobertura glaciar.

#### 3.1. VARIABLE INDEPENDIENTE: ELEMENTOS CLIMATICOS (PRECIPITACION, TEMPERATURA Y EVAPOTRANSPIRACION)

| DIMENSIÓN                             | INDICADOR  | VALORACIÓN |                            |              |
|---------------------------------------|--|------------|----------------------------|--------------|
|                                       |  | SUFICIENTE | MEDIANAMENTE<br>SUFICIENTE | INSUFICIENTE |
| Variabilidad de precipitaciones       | Precipitación superficial (mm/km <sup>2</sup> )      | x          |                            |              |
| Variabilidad de temperaturas          | Temperatura superficial (°C/km <sup>2</sup> )        | x          |                            |              |
| Variabilidad de la evapotranspiración | Evapotranspiración superficial (mm/km <sup>2</sup> ) | x          |                            |              |

**Nota:** Marcar con un X según la clase de valoración

#### 3.2. VARIABLE DEPENDIENTE: COBERTURA GLACIAR

| DIMENSIÓN   | INDICADOR                               | VALORACIÓN |                            |              |
|-------------|---|------------|----------------------------|--------------|
|             |   | SUFICIENTE | MEDIANAMENTE<br>SUFICIENTE | INSUFICIENTE |
| Superficie  | Kilómetros cuadrados (km <sup>2</sup> ) | x          |                            |              |
|             | Tasa de Cambio (%)                      | x          |                            |              |
| Cartografía | Mapa temático (1988 – 2022)             | x          |                            |              |

**Nota:** Marcar con un X según la clase de valoración

PROMEDIO DE VALORACION: 100 %

(x) El instrumento puede ser aplicado, tal como está elaborado

( ) El instrumento debe ser mejorado antes de ser aplicado

Fecha: 30.11.2023



Firma del experto informante

DNI N° 41399777



**Experto N°2**
**INFORME DE OPINIÓN DE EXPERTOS DE INSTRUMENTO DE  
 INVESTIGACIÓN**
**I. DATOS GENERALES**
**1.1. Apellidos y Nombres del validador: Medina Tarrillo Gilmer**
**1.2. Cargo: Docente**
**1.3. Especialidad del validador: Geógrafo**
**1.4. Título de la Investigación: INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN,  
 TEMPERATURA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LOS CAMBIOS DE LA  
 COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO HUAYHUASH DURANTE EL  
 PERIODO 1988-2022, ANCASH.**
**1.5. Autor del Instrumento: Aurora Shessira Hoyos García**
**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE  
 RECOLECCIÓN**

En la siguiente tabla se busca valorar los instrumentos de recolección de datos referente a los elementos climáticos y la cobertura glaciaria (ver capítulo IV).

| CRITERIOS                     | INDICADORES   | VALORACIÓN           |                   |                 |                     |                      |
|-------------------------------|---|----------------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
|                               |   | Deficiente<br>00-20% | Regular<br>21-40% | Buena<br>41-60% | Muy Buena<br>61-80% | Excelente<br>81-100% |
| Claridad                      | Esta formulado con lenguaje apropiado y específico                |                      |                   |                 | x                   |                      |
| Objetividad                   | Esta expresado en conductas observables                           |                      |                   |                 | x                   |                      |
| Actualidad                    | Adecuado al avance de la ciencia y tecnología                     |                      |                   |                 |                     | x                    |
| Organización                  | Existe una organización lógica                                    |                      |                   |                 | x                   |                      |
| Suficiencia                   | Comprende los aspectos en cantidad y calidad                      |                      |                   |                 |                     | x                    |
| Intencionalidad               | Adecuado para valorar aspectos de las estrategias                 |                      |                   |                 | x                   |                      |
| Consistencia                  | Basados en aspectos teórico-científicos                           |                      |                   |                 |                     | x                    |
| Coherencia                    | Entre los índices, indicadores y dimensiones                      |                      |                   |                 |                     | x                    |
| Metodología                   | La estrategia responde al propósito del diagnóstico               |                      |                   |                 | x                   |                      |
| Pertinencia                   | El instrumento es funcional para el propósito de la investigación |                      |                   |                 |                     | x                    |
| <b>PROMEDIO DE VALIDACION</b> |   |                      |                   |                 |                     |                      |

Nota. Valorar de forma numérica

### III. PERTINENCIA DE LOS ITEMS O REACTIVOS DEL INSTRUMENTO

En este capítulo se busca valorar los indicadores que conforman el instrumento de recolección de datos, tanto para los elementos climático como para la cobertura glaciar.

#### 3.1. VARIABLE INDEPENDIENTE: ELEMENTOS CLIMATICOS (PRECIPITACION, TEMPERATURA Y EVAPOTRANSPIRACION)

| DIMENSIÓN                             | INDICADOR  | VALORACIÓN |                         |              |
|---------------------------------------|--|------------|-------------------------|--------------|
|                                       |  | SUFICIENTE | MEDIANAMENTE SUFICIENTE | INSUFICIENTE |
| Variabilidad de precipitaciones       | Precipitación superficial (mm/km <sup>2</sup> )      | X          |                         |              |
| Variabilidad de temperaturas          | Temperatura superficial (mm/km <sup>2</sup> )        | X          |                         |              |
| Variabilidad de la evapotranspiración | Evapotranspiración superficial (mm/km <sup>2</sup> ) | X          |                         |              |

**Nota:** Marcar con un X según la clase de valoración

#### 3.2. VARIABLE DEPENDIENTE: COBERTURA GLACIAR

| DIMENSIÓN   | INDICADOR                               | VALORACIÓN |                         |              |
|-------------|---|------------|-------------------------|--------------|
|             |   | SUFICIENTE | MEDIANAMENTE SUFICIENTE | INSUFICIENTE |
| Superficie  | Kilómetros cuadrados (km <sup>2</sup> ) | X          |                         |              |
|             | Tasa de Cambio (%)                      | X          |                         |              |
| Cartografía | Mapa temático (1988 – 2022)             | X          |                         |              |

**Nota:** Marcar con un X según la clase de valoración

PROMEDIO DE VALORACION: 100%

( X ) El instrumento puede ser aplicado, tal como está elaborado

( ) El instrumento debe ser mejorado antes de ser aplicado

Fecha: 30/01/2023



Firma del experto informante  
DNI N° 41303225

**Experto N°3**
**INFORME DE OPINIÓN DE EXPERTOS DE INSTRUMENTO DE  
 INVESTIGACIÓN**
**I. DATOS GENERALES**
**1.1. Apellidos y Nombres del validador: Lleclish Rojas, Henry Edinson**
**1.2. Cargo: Consultor Independiente**
**1.3. Especialidad del validador: Ingeniero Ambiental**
**1.4. Título de la Investigación: INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN,  
 TEMPERATURA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LOS CAMBIOS DE LA  
 COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO HUAYHUASH DURANTE EL  
 PERIODO 1988-2022, ANCASH.**
**1.5. Autor del Instrumento: Aurora Shessira Hoyos García**
**II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE  
 RECOLECCIÓN**

En la siguiente tabla se busca valorar los instrumentos de recolección de datos referente a los elementos climáticos y la cobertura glaciaria (ver capítulo IV).

| CRITERIOS                     | INDICADORES   | VALORACIÓN           |                   |                 |                     |                      |
|-------------------------------|---|----------------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
|                               |   | Deficiente<br>00-20% | Regular<br>21-40% | Buena<br>41-60% | Muy Buena<br>61-80% | Excelente<br>81-100% |
| Claridad                      | Esta formulado con lenguaje apropiado y específico                |                      |                   |                 | x                   |                      |
| Objetividad                   | Esta expresado en conductas observables                           |                      |                   |                 |                     | x                    |
| Actualidad                    | Adecuado al avance de la ciencia y tecnología                     |                      |                   |                 |                     | x                    |
| Organización                  | Existe una organización lógica                                    |                      |                   |                 |                     | x                    |
| Suficiencia                   | Comprende los aspectos en cantidad y calidad                      |                      |                   |                 | x                   |                      |
| Intencionalidad               | Adecuado para valorar aspectos de las estrategias                 |                      |                   |                 |                     | x                    |
| Consistencia                  | Basados en aspectos teórico-científicos                           |                      |                   |                 | x                   | x                    |
| Coherencia                    | Entre los índices, indicadores y dimensiones                      |                      |                   |                 |                     | x                    |
| Metodología                   | La estrategia responde al propósito del diagnóstico               |                      |                   |                 |                     | x                    |
| Pertinencia                   | El instrumento es funcional para el propósito de la investigación |                      |                   |                 |                     | x                    |
| <b>PROMEDIO DE VALIDACION</b> |   |                      |                   |                 |                     | x                    |

Nota. Valorar de forma numérica

### III. PERTINENCIA DE LOS ITEMS O REACTIVOS DEL INSTRUMENTO

En este capítulo se busca valorar los indicadores que conforman el instrumento de recolección de datos, tanto para los elementos climático como para la cobertura glaciar.

#### 3.1. VARIABLE INDEPENDIENTE: ELEMENTOS CLIMATICOS (PRECIPITACION, TEMPERATURA Y EVAPOTRANSPIRACION)

| DIMENSIÓN                             | INDICADOR  | VALORACIÓN |                         |              |
|---------------------------------------|--|------------|-------------------------|--------------|
|                                       |  | SUFICIENTE | MEDIANAMENTE SUFICIENTE | INSUFICIENTE |
| Variabilidad de precipitaciones       | Precipitación superficial (mm/km <sup>2</sup> )      | x          |                         |              |
| Variabilidad de temperaturas          | Temperatura superficial (mm/km <sup>2</sup> )        | x          |                         |              |
| Variabilidad de la evapotranspiración | Evapotranspiración superficial (mm/km <sup>2</sup> ) | x          |                         |              |

Nota: Marcar con un X según la clase de valoración

#### 3.2. VARIABLE DEPENDIENTE: COBERTURA GLACIAR

| DIMENSIÓN   | INDICADOR                               | VALORACIÓN |                         |              |
|-------------|---|------------|-------------------------|--------------|
|             |   | SUFICIENTE | MEDIANAMENTE SUFICIENTE | INSUFICIENTE |
| Superficie  | Kilómetros cuadrados (km <sup>2</sup> ) | x          |                         |              |
|             | Tasa de Cambio (%)                      | x          |                         |              |
| Cartografía | Mapa temático (1988 – 2022)             | x          |                         |              |

Nota: Marcar con un X según la clase de valoración

PROMEDIO DE VALORACION: \_\_\_\_\_ 100 \_\_\_\_\_ %

( x ) El instrumento puede ser aplicado, tal como está elaborado

( ) El instrumento debe ser mejorado antes de ser aplicado

Fecha: 08/02/2023



Firma del experto informante

DNI N°72192497

Anexo 4. Matriz de Operacionalización de Variables (MOV)

| VARIABLES                   | DEFINICIÓN CONCEPTUAL  | DEFINICIÓN OPERACIONAL                          | DIMENSIONES  | INDICADORES          | ESCALA DE MEDICIÓN       |
|-----------------------------|--|---|--|----------------------|--------------------------|
| <b>COBERTURA GLACIAR</b>    | Superficie glaciár de montaña cubierta por nieve y hielo (Huggel, 2015)          | La cobertura glaciár es medida el índice NDSI I | Evolución del glaciár  | superficie           | Kilómetros cuadrados     |
| <b>ELEMENTOS CLIMATICOS</b> | Son los elementos climáticos que alteran la composición atmosférica (IPCC, 2014) | Se medida a través de la variabilidad           | Variabilidad de precipitaciones<br>Variabilidad de temperatura<br>Variabilidad de evapotranspiración | Promedio superficial | Unidades/km <sup>2</sup> |